

**EL BAMBÚ TONKIN (*Pseudosasa amabilis*) COMO MATERIAL A EXPLORAR EN EL ECODISEÑO. EL DISEÑO DE UN PUESTO DE MERCADO COMO CASO DE ESTUDIO**

**Tonkin bamboo (*Pseudosasa amabilis*) as a material to explore in Ecodesign. The design of a market stall as a case study**

Óscar González-Yebra<sup>1\*</sup> <http://orcid.org/0000-0003-2258-3967>

Adrián Lozano Rey<sup>2</sup> <http://orcid.org/0000-0003-1643-7795>

Alfredo Tolón Becerra<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7420-3340>

Caori P. Takeuchi<sup>4</sup> <https://orcid.org/0000-0002-6273-7118>

<sup>1</sup>Universidad de Almería (UAL), Centro de Investigación en Agrosistemas Intensivos Mediterráneos y Biotecnología Agroalimentaria (CIAMBITAL), Almería, España.

<sup>2</sup>Asociación Ibérica del Bambú (AsIB), Madrid/Lisboa, España/Portugal.

<sup>3</sup>Universidad de Almería (UAL), Escuela Superior de Ingeniería, Almería, España.

<sup>4</sup>Universidad Nacional de Colombia (UNAL), Facultad de Ingeniería, Bogotá, Colombia.

\*Autor de correspondencia: [oglezyebra@ual.es](mailto:oglezyebra@ual.es)

**Recibido:** Diciembre 12, 2022

**Aceptado:** August 07, 2023

**Posted online:** August 08, 2023

**RESUMEN**

El análisis del ciclo de vida (ACV) permite evaluar el impacto ambiental en las diferentes etapas de un diseño/producto. En el caso de la etapa de selección de materiales, entre las materias primas que tienen un mayor impacto ambiental y alto consumo energético se encuentra el acero. En este contexto, en esta investigación se estudia el uso del bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) como material estructural y estrategia de Ecodiseño, se compara su impacto medioambiental con el del acero en un rediseño de un puesto de mercado para frutas y verduras. Para llevar a cabo el proceso de diseño, se ha trabajado bajo el enfoque de Diseño para la Sostenibilidad (D4S) con la herramienta SolidWorks®, en la que se ha desarrollado el diseño de detalle, incluyendo el estudio del comportamiento estático y ACV, es decir, el estudio de la sostenibilidad de la estructura en el marco del nuevo paradigma de la Economía Circular. Se realizó el rediseño con bambú Tonkin, a partir de un muestreo que arrojó unos datos medios de 30 mm de diámetro y espesor de 6 mm. Los resultados obtenidos, de forma teórico-experimental y con la simulación numérica, confirman el bambú Tonkin tanto en el análisis de elementos finitos (FEA) como en el estudio de sostenibilidad (ACV), es un material con unas excelentes cualidades estructurales a la vez que tiene un impacto medioambiental mínimo. Es por ello, que se proponen nuevas líneas de trabajo y se invita a otros grupos de investigación a que se interesen sobre este material verde desconocido.

**Palabras clave:** Análisis de ciclo de vida, economía circular material estructural, proceso de diseño, herramientas CAD/CAE, *Pseudosasa amabilis*, sostenibilidad.

**ABSTRACT**

52  
53  
54  
55  
56  
57  
58  
59  
60  
61  
62  
63  
64  
65  
66  
67  
68  
69  
70  
71  
72  
73  
74  
75  
76  
77

The life cycle analysis (LCA) allows to evaluate the environmental impact in the different stages of a design/product. In the case of the material selection stage, among the raw materials that has a high enviromental impact and energy consumption is the steel. In this context, this research studies the use of Tonkin bamboo (*Pseudosasa amabilis*) as a structural material and an Ecodesign strategy, it compares its environmental impact with that of steel in a redesign of a market stall for fruits and vegetables. To carry out the design process, the study worked under the Design for Sustainability (D4S) approach with the SolidWorks® tool, in which the detailed design has been developed, including the study of the static behavior and ACV, that is, the study of the sustainability of the structure within the framework of the new paradigm of the Circular Economy. The material selected for the redesign is a Tonkin bamboo, from a sampling that threw average data of 30 mm in diameter and thickness of 6 mm. The results obtained, theoretical-experimentally and whit the numerical simulation, confirm that the Tonkin bamboo, both in the finite element analysis (FEA) and in the sustainability study (ACV), is a material with excellent structural qualities as well as minimal environmental impact. For this reason, new lines of work are proposed and other research groups are invited to be interested in this unknown green material.

**Keywords:** circular economy, life-cycle assessment, design process, CAD/CAE tools, *Pseudosasa amabilis*, structural material, sustainability,

## INTRODUCCIÓN

78

79

80 Los bambúes (bambusoideae) son plantas angiospermas perennes, familia herbácea de  
81 las poáceas (Liese 1998). Estas plantas crecen de forma nativa en todos los continentes  
82 excepto en Europa y la Antártida (Peña *et al.* 2015), existiendo más de 1250 especies en  
83 todo el mundo, aunque menos de 100 especies tienen propiedades para su uso estructural  
84 (Trujillo y López 2020). Entre ellas destacan las siguientes especies: *Guadua angustifolia*  
85 Kunth (América del Sur), *Phyllostachys edulis* o Moso (China) y el *Dendrocalamus*  
86 *asper*. La distribución geográfica natural del bambú se concentra en la franja tropical,  
87 subtropical, y templada, desde el nivel del mar hasta los 4.300 msnm (Peña *et al.* 2015).  
88 Su rápida tasa de crecimiento significa que potencialmente pueden actuar como  
89 sumideros de carbono muy efectivos, especialmente si se utiliza una extracción selectiva  
90 regular (Kuehl y Yiping 2012). En concreto, según Xu *et al.* (2022a) el potencial de  
91 almacenamiento de carbono de una tonelada de bambú es alrededor de 140 kg mayor que  
92 la misma cantidad de madera.

### 93 **El bambú como material para el diseño, fabricación y construcción**

94 Tradicionalmente el bambú ha formado parte de diferentes culturas con distintos  
95 usos, en las que se ha empleado desde material de construcción hasta material para  
96 productos de artesanía, muebles, pulpa, papel (Kaur 2018). En este contexto, la fase de  
97 selección del bambú ha sido convencionalmente empírica, siendo el “color” una de las  
98 principales características que han tomado como referencia los productores, para saber el  
99 momento en que se pueden comercializar los culmos, es por ello, que se debería avanzar  
100 hacia una estandarización de las distintas edades del bambú mediante colorimetría  
101 (Hernández-López *et al.* 2021). Cuando los culmos de bambú se utilizan para productos  
102 duraderos, como viviendas, pueden actuar como materiales muy sostenibles y respetuosos  
103 con el medio ambiente, secuestrando del orden de 5 toneladas de carbono por hectárea al

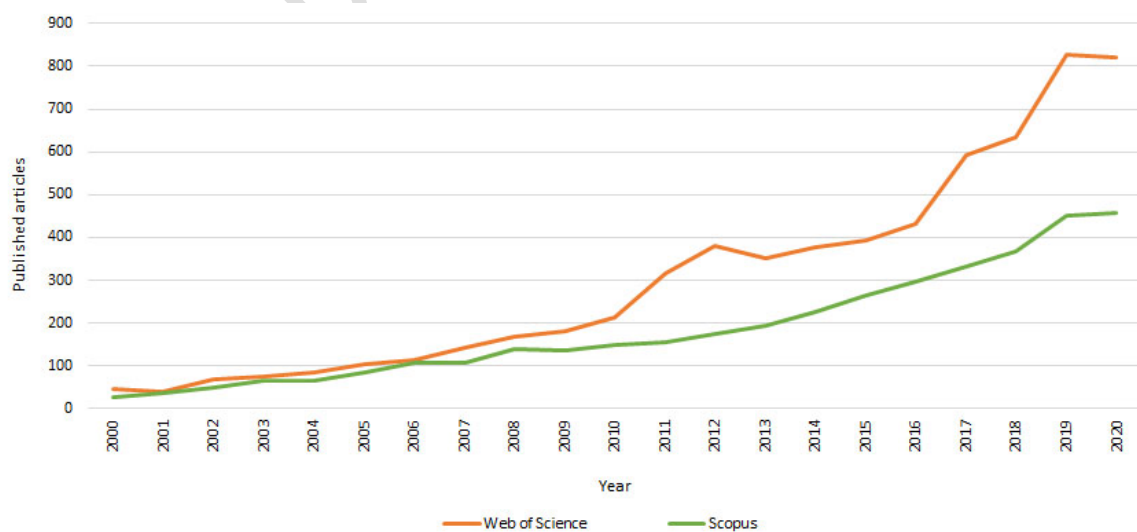
104 año (Song *et al.* 2011). La propia naturaleza del bambú, su morfología cilíndrica con  
105 acumulación de fibras en la cara externa y su alto grado de elasticidad, lo convierten en  
106 un material especialmente apto para construcciones sismo resistentes (Kaminski *et al.*  
107 2016a). El bambú en su hábitat natural trabaja como una viga en voladizo con un apoyo  
108 fijo en la tierra, sujeto a su propio peso y a la carga del viento, por lo tanto, tiene una  
109 naturaleza estructural optimizada para resistir momentos flectores (Tan *et al.* 2011). Así  
110 mismo, la resistencia a la tracción del bambú es ideal para reemplazar al acero incluso en  
111 aplicaciones de carga (Van der Lugt *et al.* 2006, Van Dam *et al.* 2018).

112

113 La *Guadua angustifolia* junto con el bambú Moso y el *Dendrocalamus asper* son las  
114 variedades de bambú con mejor comportamiento estructural (Escamilla y Habert 2014),  
115 si bien, de cara a la fabricación de una estructura es muy importante en el proceso de  
116 diseño tener en cuenta que se trata de un material anisotrópico (Takeuchi 2004). Por otro  
117 lado, el bambú también se emplea de forma laminar, en paneles, esterillas, etc. (Mora *et*  
118 *al.* 2008, Xiao *et al.* 2013, Nguegang-Nkeuwa *et al.* 2022), y en dimensiones más  
119 pequeñas para la producción de tableros aglomerados (José y Beraldo 2010), e incluso en  
120 combinación con otros materiales como el pino y el mate (Rush *et al.* 2023) o residuos  
121 de caña de azúcar (Brito *et al.* 2022), entre otros. Por todo ello, el bambú es un recurso  
122 natural, que no se debe pasar por alto para frenar el cambio climático (Yadav y Mathur,  
123 2021). Asimismo, se ha demostrado que el bambú es más sostenible que el acero, el  
124 hormigón y la madera en general (Van Der Lugt *et al.* 2003, Van der Lugt *et al.* 2006),  
125 incluso en los casos en los que se vende a países de Europa occidental. Por otro lado, en  
126 un estudio realizado por Amada y Untao (2001), en el que compararon los valores de  
127 tenacidad a la fractura del bambú con otros tipos de maderas y metales, el valor promedio

128 obtenido para el bambú fue de  $56,8 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ , siendo más alto que el de la aleación de  
129 aluminio, el abeto Douglas o la Pícea (abeto rojo).

130 Las características del bambú como material estructural han sido estudiadas por  
131 multitud de investigadores de todo el mundo, se pueden mencionar algunos de los  
132 estudios y manuales que se utilizan como referencia, como son los de Zhou (1981),  
133 Hidalgo-López (1981), Amada *et al.* (1996), Luna *et al.* (2014) y Zaragoza-Hernández *et*  
134 *al.* (2015). Actualmente, se trata de una línea de trabajo en constante crecimiento, tal y  
135 como se puede observar en la Figura 1, que hace referencia a una búsqueda realizada en  
136 las bases de datos “Web of Science (WoS)” y “Scopus”, la cual fue acotada para los  
137 artículos publicados en los primeros 20 años del siglo XXI (período 2000-2020),  
138 utilizando para ello el siguiente patrón de búsqueda: (“bamboo\*”) AND (“material\*” OR  
139 “structural material\*” OR “construction material\*” OR “building material\*” OR  
140 “manufacturing material\*” OR “production material\*” OR “construction equipment\*”  
141 OR “design material\*”). En síntesis, se identifica una clara tendencia ascendente en el  
142 número de publicaciones científicas, con más de 6000 artículos publicados e indexados  
143 en WoS hasta el año 2020.



144 **Figura 1:** Tendencia en las publicaciones científicas referentes al bambú como material  
145 estructural, tomando como referencia las bases de datos Web of Science (todas las  
146 colecciones) y Scopus desde el año 2000 hasta el 2020.  
147

148 Aunque en las últimas décadas el estudio del bambú como material estructural está  
149 despertando el interés entre la comunidad científico-técnica, uno de los principales  
150 obstáculos de este trabajo, ha sido la ausencia de investigaciones previas (literatura  
151 científica) en las que se estudie y analice estructuralmente el bambú Tonkin (*Pseudosasa*  
152 *amabilis*). En este contexto, se ha realizado una búsqueda bibliográfica más específica en  
153 las bases de datos anteriores, apareciendo sólo 5 artículos referentes a al bambú Tonkin  
154 como material estructural (5 en WoS y 4 en Scopus), estando 4 de ellos indexados en  
155 ambas bases de datos. En la Tabla 1 se recoge una recapitulación de los estudios  
156 analizados.

157 **Tabla 1:** Estudios publicados hasta la fecha sobre la variedad de bambú Tonkin como  
158 material.  
159

TÍTULO	AUTORES
Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls	Moroz <i>et al.</i> 2014
Dynamic variation of fuel properties of Tonkin Cane ( <i>Pseudosasa amabilis</i> ) during maturation	Cheng <i>et al.</i> 2015
Bamboo bicycle - Past or future?	Penava <i>et al.</i> 2016
The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles	Jakovljević <i>et al.</i> 2017
Internode morphometrics and allometry of Tonkin Cane <i>Pseudosasa amabilis</i>	Cheng <i>et al.</i> 2017

160  
161 En estos 5 trabajos previos (Tabla 1) se recoge información específica sobre el bambú  
162 Tonkin, pudiéndose clasificar según las características de la caña y usos. Atendiendo a  
163 sus características, en uno de los estudios se comprobó que la capacidad calorífica de la  
164 caña aumenta en proporción con su madurez, obteniendo valores más altos que algunas  
165 maderas leñosas (Cheng *et al.* 2015). Por otro lado, Cheng *et al.* (2017) estudiaron la

166 morfología y alometría del bambú Tonkin, recopilando sus valores característicos en  
167 función de diferentes parámetros. Asimismo, en otro estudio se observó la variación de  
168 sus propiedades mecánicas en función del grado de humedad (Jakovljevic *et al.* 2017).  
169 Respecto a sus usos, se obtuvieron valores muy favorables en comparación a otros  
170 materiales empleados en la fabricación de cuadros de bicicleta (Penava *et al.* 2016), lo  
171 cual abre la posibilidad para su empleo como una alternativa sostenible. En último lugar,  
172 en zonas donde predomina, el bambú Tonkin puede ser una alternativa a los muros  
173 reforzados con acero en viviendas de bajo coste (Moroz *et al.* 2014).

174 Este trabajo pretende contribuir a avanzar en el vacío existente en la literatura  
175 científica en torno al bambú Tonkin como material, para ello se busca explorar como  
176 estrategia de Ecodiseño su utilización de cara a analizar y valorar si mejora el ciclo de  
177 vida, en relación con los diseños de estructuras livianas (e.g., un puesto de mercado) que  
178 se comercializan actualmente en acero. En ese sentido, tal y como apunta González-Yebra  
179 (2014), descubrir y trabajar la versatilidad del bambú puede convertirlo en un óptimo  
180 recurso, que ofrezca nuevas oportunidades de obtener ingresos en actividades  
181 industrialmente sostenibles. Hay que tener en cuenta que, a día de hoy, la producción  
182 mundial del acero (WSP) no ha parado de crecer debido a su gran demanda, hasta el punto  
183 de que se puede llegar a considerar como un indicador mensual de la actividad económica  
184 mundial real (Ravazzolo y Vespignani 2020). Teniendo en cuenta dicho escenario, en el  
185 presente estudio se han planteado los siguientes objetivos específicos: i) Explorar las  
186 posibilidades del bambú como material estructural y estrategia de Ecodiseño. ii) Realizar  
187 un rediseño de una estructura de puesto de mercado para frutas y verduras con bambú  
188 mediante herramientas CAD-CAE para posteriormente, comprobar el comportamiento  
189 mecánico del bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) mediante un estudio de elementos  
190 finitos (AEF). iii) Desarrollar un Análisis del Ciclo Vida (ACV) comparando el diseño

191 comercial (acero galvanizado) con el rediseño propuesto en bambú, donde el ACV se  
192 acota a los 4 indicadores principales que miden el impacto ambiental: huella de carbono,  
193 consumo de energía, acidificación del aire y eutrofización.

## 194 **MATERIALES Y MÉTODOS**

195 La metodología seguida ha sido D4S (“Design for Sustainability”) desarrollada por  
196 la universidad holandesa Delft University of Technology. Se basa en observar el ciclo de  
197 vida de un producto, incluyendo la extracción, el procesamiento y el suministro de las  
198 materias primas y la energía requerida para su desarrollo. Los factores claves son el  
199 consumo de materiales de entrada (agua, energía en cada una de las etapas del ciclo de  
200 vida) y la producción de materiales de salida (agua, calor, emisiones y desechos) (Crul y  
201 Diehl 2007). Este enfoque de Eco-Rediseño está cada vez más interiorizado en la  
202 ingeniería del diseño (Brezet y Silvester 2004). En el caso de este trabajo, se siguió con  
203 un enfoque similar al desarrollado por Pérez-Ortega *et al.* (2021), es decir incluye en un  
204 mismo flujo de trabajo “herramientas CAD-CAE” y “estrategias de Ecodiseño”,  
205 proponiendo la incorporación de un material con menos impacto medioambiental (i.e., el  
206 bambú Tonkin).

207 Para el proceso de diseño y modelado en 3D el software elegido ha sido SolidWorks®  
208 (2018), dado que ofrece un gran surtido de complementos y módulos CAD-CAE. Entre  
209 ellos, en este estudio se ha trabajado con “SW Simulation” y “SW Sustainability”. El  
210 módulo Simulation permite realizar un AEF para evaluar la resistencia mecánico-  
211 estructural del bambú Tonkin. En dicho módulo se tienen en cuenta: material, uniones,  
212 conexiones, cargas, tamaño de mallado para el cálculo de la simulación y análisis estático.  
213 Los resultados del estudio están calculados con base en el criterio de máxima tensión de  
214 Von Mises (Ecuación 1), el cual indica las deformaciones y esfuerzos que se producen en  
215 las distintas partes de un material o estructura.



$$\sigma_{vM} = \left[ \frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad [1]$$

217 Donde:  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ , y  $\sigma_3$  son las tensiones principales (MPa).

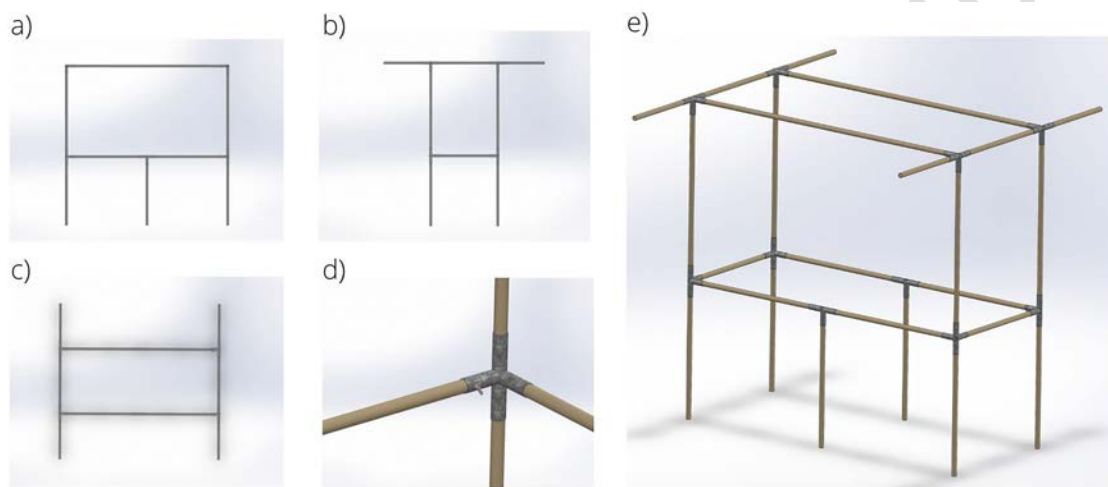
218 El paquete SolidWorks® y específicamente el módulo Simulation, se ha utilizado  
219 previamente de forma experimental en la industria del mueble (Koç *et al.* 2011), tanto en  
220 estudios con maderas como con materiales derivados de éstas, para determinar los  
221 esfuerzos a los que estaban sometidos dichos materiales (Gaff y Gašparík 2013, Gaff *et*  
222 *al.* 2015, Gašparík *et al.* 2017). En esta línea, Vratuša *et al.* (2017) apuntan a que  
223 SolidWorks® podría ser una herramienta útil para el cálculo de los desplazamientos,  
224 deformaciones y tensiones de componentes de madera, reduciendo de esta forma las fases  
225 de diseño e indirectamente el tiempo y los costos.

226 Por otro lado, el módulo Sustainability incorpora la base de datos del ACV del PE  
227 International y utiliza un modelo general de procesos que emplea el software de ACV.  
228 SW Sustainability se basa en la metodología de CML elaborada por el Instituto de  
229 Ciencias Medioambientales de la Universidad de Leiden en los Países Bajos, utilizada  
230 para calcular los factores de impacto, a día de hoy, se considera como una de las más  
231 completas (Vinodh *et al.* 2012).

### 232 **Caso de Estudio**

233 Como caso de estudio de investigación aplicada y con carácter exploratorio, se  
234 propone la incorporación del análisis de ciclo de vida (vector medioambiental) en el  
235 proceso de rediseño CAD de un puesto de mercado para frutas y verduras, siendo la  
236 principal estrategia de diseño, el cambio de material de acero a bambú (variedad Tonkin).  
237 Hay que tener en cuenta, que la fase de diseño es la de mayor potencial a la hora de  
238 minimizar los impactos tanto ambientales como sociales. A modo de justificación del  
239 caso de estudio propuesto se puede mencionar que, en estudios recientes en los que se  
240 han llevado a cabo varios paneles de investigación en torno la presencia de la componente

241 “Diseño” en el sector agroalimentario, se apunta a la necesidad de proporcionar nuevos  
242 incentivos para el impulso del Diseño (y el Ecodiseño) como un importante factor de  
243 innovación no tecnológica en el ámbito de la industria agroalimentaria (González-Yebra  
244 *et al.* 2019<sup>a</sup>, González-Yebra *et al.* 2019b). En la Figura 2 se muestra una composición  
245 gráfica con el diseño de detalle en 2D y 3D desarrollado en Solidwork®, para el estudio  
246 del comportamiento mecánico y medioambiental del bambú Tonkin para la estructura del  
247 puesto de mercado.



248  
249 **Figura 2:** Vistas y detalle estructura final rediseñada en bambú Tonkin. Izda.: a) Vista de  
250 alzado, b) Perfil izquierdo, c) Vista en planta, d) Detalle de unión tipo conexión mediante  
251 tornillo y tuerca de mariposa. Dcha.: f) Perspectiva 3D del rediseño con cañas de bambú  
252 del puesto de mercado.

### 253 Aproximación al bambú Tonkin

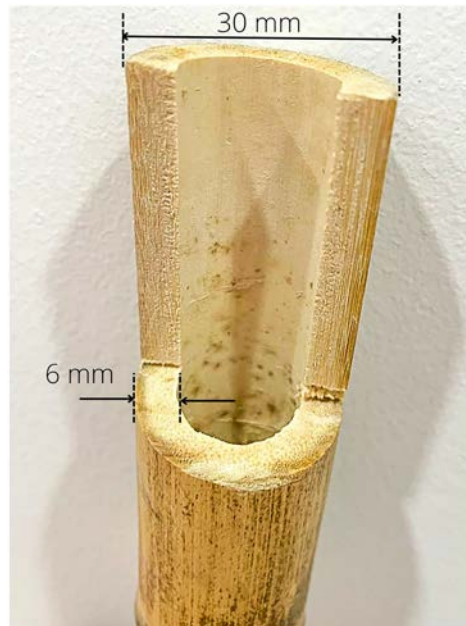
254 El bambú Tonkin (*Pseudosasa amabilis*) predomina de forma natural en la zona sur  
255 de China (Cheng *et al.* 2017). El Tonkin presenta un alto rendimiento como  
256 biocombustible, presentando un poder calorífico de 19 MJ/kg, superior incluso a algunas  
257 de las maderas leñosas, pudiéndose alcanzar este poder calorífico con tan sólo 1 año de  
258 maduración de la caña (Cheng *et al.* 2015). Desde el punto de vista estructural, sólo un  
259 grupo de investigación de Croacia ha determinado por medio de ensayos algunas  
260 propiedades mecánicas de 5 cañas, para la fabricación de bicicletas de bambú (Penava *et*  
261 *al.* 2016, Jakovljevic *et al.* 2017). Por otro lado, es importante tener en cuenta, que las

262 características dimensionales del bambú deben ser consideradas en el proceso de  
 263 caracterización de cualquier especie (Harries *et al.* 2017). Para ello se ha aplicado la  
 264 norma ISO 19624:2018 (International Organization for Standardization 2018), que  
 265 identifica el diámetro, la pared (espesor) y las propiedades que necesitan ser  
 266 caracterizadas dentro de un proceso de clasificación. Llegándose a considerar que el  
 267 diámetro es una propiedad más importante que debe tenerse en cuenta para caracterizar  
 268 una especie concreta (Trujillo y Jangra 2016). Por tanto, para conocer una especie  
 269 determinada es de vital importancia identificar los diámetros típicos y espesores de pared.

270 Dada la escasez de información disponible sobre el bambú Tonkin, se llevó a cabo  
 271 junto a Bambusa Estudio (empresa española de distribución de bambú), un muestreo  
 272 aleatorio para un diámetro exterior de bambú Tonkin de 30 mm aproximadamente, mismo  
 273 diámetro que la estructura que se comercializa en la actualidad en acero. Actualmente,  
 274 hay disponibles bambú Tonkin con diámetros de 20, 30 y 40 mm. En la Tabla 2 se  
 275 detallan los datos y parámetros obtenidos ( $\mu$ , Mo) de las muestras analizadas de 30 mm  
 276 de diámetro. Para el diseño y simulación de la estructura se ha considerado la moda como  
 277 parámetro más representativo, es decir, un diámetro exterior de 30 mm y un espesor 6  
 278 mm (Figura 3).

279 **Tabla 2:** Resultados del muestreo de las cañas de madera de bambú Tonkin  
 280 (*Pseudosasa amabilis*) de calibre 30 mm.

CAÑA DE BAMBÚ TONKIN	Ø EXT (mm)	ESPEJOR DE PARED (mm)
1	30	7
2	32	6
3	30	6
4	30	6
5	30	8
6	30	6
7	30	7
8	32	6
9	30	6
10	31	5
<b>Media (<math>\mu</math>)</b>	<b>30,5</b>	<b>6,3</b>
<b>Moda (Mo)</b>	<b>30</b>	<b>6</b>



**Figura 3:** Ejemplo físico de bambú Tonkin de 30 mm de diámetro propuesta para el rediseño del puesto de mercado.

En la Tabla 3 se muestran los datos referentes a la geometría de la caña, así como las propiedades mecánicas consideradas en el diseño y simulación de la estructura de bambú Tonkin, si bien, dada la limitación de datos y carencia de estudios técnicos sobre esta variedad, se han utilizado valores medios de las especies de bambú con uso estructural (Kaminski *et al.* 2016b, Ghavami y Moreia 1996), con el propósito de llevar a cabo la simulación y ACV del Tonkin. Es importante comentar, que el bambú como material no está incluido dentro de la biblioteca de materiales de SolidWorks® (2018), por tanto, en este caso se creó y definió el material, incorporando las propiedades mecánicas que lo caracterizan (i.e., Módulo Elástico, Coeficiente de Poisson, Densidad y Límite elástico a flexión). Si se utilizase otro tipo de bambú este procedimiento se debería reformular, dado que cada especie tiene unas características diferentes.

301 **Tabla 3:** Datos geométricos y mecánicos utilizados para el modelado del material  
302 (madera de bambú Tonkin) en SolidWorks®.  
303

PARÁMETROS	DATOS	FUENTE
Diámetro caña Tonkin	30 mm	Tabla 2 (este estudio)
Espesor caña Tonkin	6 mm	Tabla 2 (este estudio)
Módulo elástico	13500 MPa	(Kaminski <i>et al.</i> 2016b)
Coefficiente de Poisson	0,22	(Ghavami y Moreia 1996)
Densidad (Humedad 12 %)	650 kg/m <sup>3</sup>	(Kaminski <i>et al.</i> 2016b)
Límite elástico (Flexión)	30 MPa	(Kaminski <i>et al.</i> 2016b)

304  
305

## 306 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 307 Características técnico-mecánicas (Análisis de elementos finitos)

308

309 Tras el análisis y simulación realizado con SolidWorks® (2018), cabe destacar un  
310 mejor comportamiento de la estructura diseñada en bambú Tonkin, frente a los valores  
311 obtenidos de la estructura comercial en acero. El bambú se comporta mejor que el acero  
312 tanto en el análisis tensional como en el de deformaciones (Figura 4). En la Tabla 4, se  
313 puede comprobar que en el análisis tensional, el acero está bajo unas cargas que suponen  
314 un 95 % de la tensión máxima admisible, mientras que el bambú está sometido bajo las  
315 mismas cargas a un 71 % (respecto a la tensión máxima admisible). Por otro lado, los  
316 valores de deformaciones en la estructura de acero son más de 4 veces superiores que en  
317 la estructura de bambú (Tabla 4). Por último, se puede afirmar que la estructura propuesta  
318 en bambú Tonkin resiste los esfuerzos a los que está sometidos, ya que se cumple la  
319 Ecuación 2.

320

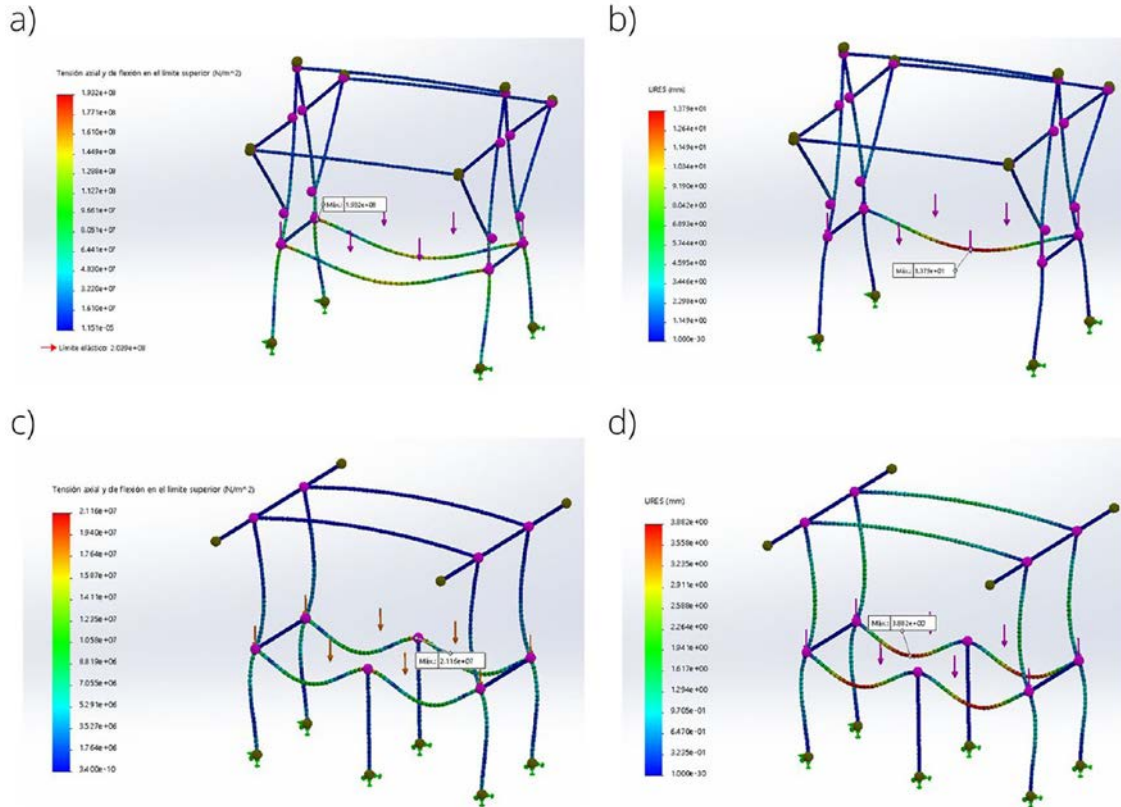
321

$$\sigma \leq \sigma_{M\acute{a}x} \quad [2]$$

322

323

324



325  
 326  
 327  
 328  
 329  
 330  
 331

**Figura 4:** Simulación mecánica en SolidWorks®. Izda.: Diagramas de tensiones de la estructura original en acero (a) y de la estructura propuesta en madera de bambú Tonkin (c). Dcha.: Diagramas de deformaciones de la estructura en acero (b) y de la estructura en Tonkin (d).

332  
 333  
 334

**Tabla 4:** Resultados del análisis de elementos finitos, comparativa mecánica entre la estructura de acero y la propuesta en bambú Tonkin.

MATERIAL	T (N/m <sup>2</sup> )	C E-3	T máx. (N/m <sup>2</sup> )	% T	D (m)	D (mm)
Acero	1,932 x 10 <sup>8</sup>	SI	2,039 x 10 <sup>8</sup>	95 %	1,379 x 10 <sup>-2</sup>	17,9
Bambú	2,116 x 10 <sup>7</sup>	SI	3 x 10 <sup>7</sup>	71 %	3,882 x 10 <sup>-3</sup>	3,9

335  
 336  
 337  
 338

Donde: T = Tensiones, C E-3= Cumple ecuación 2 ( $\sigma \leq \text{máx.}$ ), T máx. = Tensión máxima, % T = Porcentaje tensión respecto a la tensión máxima, D = Deformaciones.

339

### Impacto medioambiental y circularidad (Análisis del ciclo de vida)

340

La gran ventaja que se puede observar entre ambos materiales (acero y bambú), tal y

341

como se puede observar en la Tabla 5, es que el bambú es una materia prima que no

342

necesita ningún proceso de transformación de gran impacto para su empleo estructural.

343 En cambio, el acero conformado en forma tubular requiere de un proceso de extrusión, el  
344 cual tiene un consumo elevado de electricidad y gas natural.

345 Por otro lado, la estructura de bambú es casi 6 veces más ligera que la estructura de  
346 acero, factor importante a tener en cuenta en la fase de montaje y desmontaje de dicha  
347 estructura. Atendiendo al análisis de ciclo de vida de un producto (ACV), se establecen 4  
348 indicadores clave para la evaluación del impacto medioambiental: i) Huella de carbono;  
349 ii) Energía total consumida; iii) Acidificación atmosférica y iv) Eutrofización del agua.

350 **i) Huella de carbono:** El bambú genera poco dióxido de carbono y otros gases  
351 relacionados con la combustión de combustibles. Es así un recurso en el que su impacto  
352 es mínimo en comparación con el acero. La huella de carbono es por tanto un indicador  
353 para medir el impacto global como el potencial de calentamiento global (GWP). Este  
354 factor está ligado a problemas medioambientales como la desaparición de glaciares,  
355 extinción de especies y la aparición del cambio climático. Como se recoge en la Tabla 6,  
356 el valor obtenido del bambú es aproximadamente 16 veces inferior en cuanto al nivel de  
357 dióxido de carbono generado en la fase del ciclo de vida. En el acero tiene un valor de  
358 123 kgCO<sub>2e</sub> (kilogramos de dióxido de carbono por metro cuadrado), mientras que en el  
359 bambú un 8,06 kgCO<sub>2e</sub>.

360 **ii) Energía total consumida:** La energía total consumida tiene en cuenta la  
361 electricidad, combustible y energía utilizada para obtener y procesar dichos combustibles,  
362 utilizados durante el ciclo de vida de un producto. Esa energía se expresa como el valor  
363 del poder calorífico neto de la demanda de energía. Se puede observar en la Tabla 6, que  
364 el valor la energía empleada en el ciclo de vida del acero es 58 veces superior al del  
365 bambú, es decir, 1680 MJ y 29 MJ respectivamente.

366

367 **iii) Acidificación atmosférica:** El dióxido de azufre y el óxido de nitrógeno  
368 incrementan la acidez del agua de lluvia, ésta hace que la tierra y el agua se acidifique,  
369 afectando tóxicamente sobre la flora y fauna acuática. Como se puede comprobar en la  
370 Tabla 6, se obtiene un valor del acero 14 veces superior al del bambú, en concreto 0,473  
371 kgCO<sub>2e</sub>0 en el ciclo de vida del acero y de 0,0326 kgCO<sub>2e</sub> para el bambú.

372 **iv) Eutrofización del agua:** El nitrógeno y el fosfato de aguas residuales generan  
373 algas que agotan el oxígeno del agua, destruyendo la flora y fauna. Aquí la diferencia  
374 entre ambas es menor, tal y como se puede observar en la Tabla 6, aunque el indicador  
375 del acero sigue siendo más elevado que el del bambú, unas 1,4 veces superior. Obteniendo  
376 un valor de 0,0108 kgPO<sub>4e</sub> en el acero y 0,0077 kgPO<sub>4e</sub> en el bambú.

377 En síntesis, todos los indicadores estudiados en este trabajo son mucho más  
378 favorables en el ciclo de vida del bambú Tonkin, además presenta la ventaja de poseer  
379 una alta capacidad de captación y secuestro del carbono atmosférico. Esta característica  
380 lo hace un recurso a tener en cuenta para reducir el impacto del cambio climático (Yiping  
381 *et al.* 2010), dado que como se ha analizado en este estudio, el impacto ambiental de la  
382 utilización del bambú Tonkin como recurso estructural es mínimo. Dado que las fases de  
383 su proceso de tratamiento requieren de muy poca energía, estando entre dichas fases el  
384 corte, la preservación y la limpieza mediante hidrolimpiadora. Si bien, queda evidenciado  
385 que el mayor impacto corresponde al transporte (Xu *et al.* 2022b). Por todo ello, mediante  
386 la utilización del bambú, se podría lograr la sustitución de materiales intensivos en  
387 emisiones como, por ejemplo, el acero, el cemento y el PVC, en una amplia gama de  
388 productos de larga duración (Borowski *et al.* 2022). En esta línea, como ejemplo, se han  
389 hecho algunos esfuerzos para conceptualizar y explorar teóricamente la opción del  
390 bambú, como una alternativa viable y sostenible de material, para el diseño de  
391 invernaderos tipo parral en el sureste de España (González-Yebra y Garzón 2015),



392 posteriormente en México se estudió un prototipo de invernadero con cuatro especies  
 393 diferentes de bambú (Romero-Méndez *et al.* 2017), con el que se reducía claramente el  
 394 impacto ambiental del diseño.

395 Por último, dentro de los objetivos del presente trabajo, se encuentra una relación  
 396 directa con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS). La Organización Internacional  
 397 del Bambú y Ratán (INBAR) trabaja con los países para enfocar el uso del bambú y ratán  
 398 como recurso estratégico, apoyando el desarrollo sostenible y planes de acción de  
 399 economía verde. En su estrategia y desempeño contribuyen directamente a siete ODS  
 400 relacionados con el bambú: i) Acabar con la pobreza en todas sus formas; ii) Proporcionar  
 401 servicios de energía modernos; asequibles, sostenibles y confiables para todos; iii) Acceso  
 402 a una vivienda adecuada y asequible; iv) Uso eficiente de los recursos naturales; v)  
 403 Abordar el cambio climático; vi) Proteger y restaurar los ecosistemas terrestres; vii)  
 404 Revitalizar la asociación mundial para el desarrollo sostenible.

405 **Tabla 5:** Comparación del impacto medioambiental entre la estructura de acero y la de  
 406 madera de bambú Tonkin.  
 407

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL		ACERO GALVANIZADO	BAMBÚ TONKIN
- Contenido reciclado		12 %	0 %
- Peso		40,3 kg	6,804 kg
- Proceso de fabricación		Extrusión	Ninguno
- Área de superficie		6,84 m <sup>2</sup>	3,5 m <sup>2</sup>
- Duración		10 años	10 años
- Fabricación	Región	Asia	Asia
	Proceso	Extrusión	Ninguno
	Consumo de electricidad	0,142 kWh	0 kWh
	Consumo de gas natural	1,16 x 10 <sup>6</sup> J	0 J
	Tasa de desecho	5,5 %	0
- Utilización	Región	Europa	Europa
	Tiempo	10 años	10 años
- Transporte	Barco	1,6 x 10 <sup>4</sup> km	1,6 x 10 <sup>4</sup> km

408

409

410 **Tabla 6:** Valores impacto medioambiental según la huella de carbono, la energía total  
 411 consumida, la acidificación atmosférica y la eutrofización del agua en el ciclo de vida  
 412 del acero galvanizado y del bambú Tonkin.  
 413

		Material	Fabricación	Transporte	Fin de la vida útil	Totales
<b>HC</b> (kgCO <sub>2</sub> e)	<b>Acero</b>	87	8,4	1,6	36	123
	<b>Tonkin</b>	2,5	0	0,246	5,1	8,06
<b>ETC</b> (MJ)	<b>Acero</b>	1200	120	20	340	1680
	<b>Tonkin</b>	29	0	3,1	2,9	29
<b>AA</b> (kgSO <sub>2</sub> e)	<b>Acero</b>	0,221	0,037	0,052	0,163	0,473
	<b>Tonkin</b>	0,023	0	8,1 x 10 <sup>-3</sup>	1,5 x 10 <sup>-3</sup>	0,0326
<b>EA</b> (kgPO <sub>4</sub> e)	<b>Acero</b>	2,1 x 10 <sup>-3</sup>	1,8 x 10 <sup>-3</sup>	4,9 x 10 <sup>-3</sup>	2 x 10 <sup>-3</sup>	0,0108
	<b>Tonkin</b>	2,9 x 10 <sup>-3</sup>	0	7,7 x 10 <sup>-4</sup>	4,1 x 10 <sup>-3</sup>	0,0077

414 Donde: AHC = Huella de carbono, ETC = Energía total consumida, AA = Acidificación  
 415 atmosférica, EA = Eutrofización del agua.  
 416  
 417

## 418 CONCLUSIONES

419 El presente trabajo de carácter exploratorio se ha realizado con el propósito de dar a  
 420 conocer el Tonkin, una variedad de bambú prácticamente desconocida, como un primer  
 421 avance para visibilizarlo como una alternativa para su uso como material estructural, con  
 422 unas excelentes cualidades/características mecánicas comparables al acero tubular, así  
 423 como un evidente menor impacto medioambiental, ya que se trata de un recurso natural  
 424 y no requiere de apenas gasto energético. En síntesis, para el caso de estudio planteado,  
 425 los cuatro indicadores clave de la medición de la sostenibilidad son muy elevados en la  
 426 estructura de acero, en comparación con la estructura de bambú Tonkin. Es importante  
 427 reseñar, que el desarrollador de software Dassault Systèmes hasta la fecha no incluye en  
 428 SolidWorks® (2018) el bambú como material, por la dificultad que supone que existan  
 429 tantas especies distintas para uso estructural (cerca de 100 especies), en este contexto, los  
 430 datos y hallazgos obtenidos en este estudio pueden servir de referencia para otros  
 431 investigadores. Como valoración final, se ha podido comprobar que el Tonkin, es un

432 material que ha sido escasamente estudiado, si bien se trata de una alternativa verde con  
433 un importante potencial, por lo que se invita a otros grupos de investigación a que se  
434 interesen sobre este material, como una oportunidad para muchos sectores económicos.  
435 En ese sentido, se abre aquí el debate para un posible reemplazo del acero, así como de  
436 otros metales predominantes y maderas tradicionales, por ende, este trabajo puede servir  
437 como punto de partida para emprender nuevas líneas de investigación:

- 438 i) Caracterizar mecánicamente el Tonkin para su uso como material estructural  
439 en base a la norma ISO 22157:2019 (International Organization for  
440 Standardization 2019), mediante la realización de diferentes ensayos de  
441 laboratorio, Tracción paralela a las fibras, compresión paralela a las fibras,  
442 flexión y corte longitudinal, sobre una muestra mínima de 12 cañas. Así como,  
443 determinar una serie de parámetros que son desconocidos hasta la fecha  
444 (módulo elástico, coeficiente de Poisson, densidad y límite elástico).
- 445 ii) Diseñar y desarrollar una nueva unión más sostenible que sea desmontable  
446 para unir cañas de bambú Tonkin.
- 447 iii) Estudiar la viabilidad del cultivo (caracterización agronómica) del bambú  
448 Tonkin en Europa occidental, como incentivo y desarrollo socioeconómico  
449 de zonas en riesgo de despoblación (e.g., España vaciada).
- 450 iv) Evaluar y comparar desde la perspectiva de la economía (circular), que  
451 beneficios podría suponer la fabricación de estructuras livianas (similares a la  
452 del caso de estudio) en bambú Tonkin, en lugar del tradicional acero  
453 galvanizado.
- 454 v) Estudiar el impacto ambiental de diferentes alternativas de recubrimientos al  
455 bambú para garantizar su durabilidad en el tiempo

456 Por lo tanto, vale la pena realizar más investigaciones para avanzar en las líneas  
457 propuestas y en otras, que permitan conocer las posibilidades reales de este material  
458 desconocido, el bambú Tonkin.

#### 459 **CONTRIBUCIONES DE AUTORÍA**

460 **Ó. G-Y.:** Conceptualización; Investigación; Metodología; Análisis Formal; Escritura –  
461 borrador original. **A. L-R.:** Investigación; Curación de datos; Análisis Formal; Escritura:  
462 revisión y edición. **A. T-B.:** Supervisión; Recursos; Adquisición de fondos; Escritura:  
463 revisión y edición. **C. P. T.:** Supervisión; Validación; Redacción – revisión y edición.

464

#### 465 **AGRADECIMIENTOS**

466 A la Junta de Andalucía por el Contrato Postdoctoral (Ref, DOC\_01126) del primer autor,  
467 período durante el que realizó una estancia en el “Instituto Universitario de Ciencias  
468 Ambientales (IUCA)” de la Universidad Complutense de Madrid, de la que es fruto este  
469 trabajo. También se agradece el apoyo recibido por parte del grupo “Análisis, Diseño y  
470 Materiales, GIES” de la Universidad Nacional de Colombia, de la “Asociación Ibérica  
471 del Bambú (AsIB)” y la empresa “Bambusa Estudio”, en especial a Isaac González,  
472 Eugenia Muscio y Pierre Boucher por su colaboración y asesoramiento técnico.

473

#### 474 **REFERENCIAS**

475 **Amada, S.; Munekata, T.; Nagase, Y.; Ichikawa, Y.; Kirigai, A.; Zhifei, Y. 1996.**  
476 The mechanical structures of bamboos in viewpoint of functionally gradient and  
477 composite materials. *J Compos Mater* 30(7): 800-819.  
478 <https://doi.org/10.1177/002199839603000703>

479

480 **Amada, S.; Untao, S. 2001.** Fracture properties of bamboo. *Compos Part B-Eng*  
481 32(5): 451-459. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(01\)00022-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(01)00022-1)

482

483 **Borowski, P.F.; Patuk, I.; Bandala, E.R. 2022.** Innovative Industrial Use of  
484 Bamboo as Key “Green” Material. *Sustainability* 14(4): 1955.  
485 <https://doi.org/10.3390/su14041955>

486

- 487 **Brezet, H.; Silvester, S. 2004.** Design for sustainability (D4S): Towards advanced  
488 producto concepts. *Environ Eng Manag J* 3(4): 591-602.  
489
- 490 **Brito, F. M. S.; Bortoletto-Júnior, G.; Paes, J.B. 2022.** Wettability and decay of  
491 particleboards manufactured with thermally treated sugarcane residue and bamboo  
492 (*Dendrocalamus asper*) particles. *Maderas-Cienc Tecnol* 24(30): 1-18.  
493 <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100430>  
494
- 495 **Cheng, L.; Adhikari, S.; Wang, Z.; Ding, Y. 2015.** Dynamic variation of fuel  
496 properties of Tonkin Cane (*Pseudosasa amabilis*) during maturation. *Energ Fuel*  
497 29(4): 2408-2415. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b00385>  
498
- 499 **Cheng, L.; Hui, C.; Reddy, G.V.; Ding, Y.L.; Shi, P.J. 2017.** Internode  
500 morphometrics and allometry of Tonkin Cane *Pseudosasa amabilis*. *Ecol Evol*  
501 7(22): 9651-9660. <https://doi.org/10.1002/ece3.3483>  
502
- 503 **Crul, M.R.M.; Diehl, J.C. 2007.** Diseño para la sostenibilidad: un enfoque práctico  
504 para economías en vías de desarrollo. United Nations Environment Programme  
505 (UNEP), Paris, Francia.  
506
- 507 **Escamilla, E.Z.; Habert, G. 2014.** Environmental impacts of bamboo-based  
508 construction materials representing global production diversity. *J Clean Prod* 69:  
509 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.067>  
510
- 511 **Gaff, M.; Gašparík, M. 2013.** The development of stresses during the shaping of  
512 the surface of aspen wood and their impact on the quality of the  
513 surface. *BioResources* 8(3): 3741-3752. <https://bit.ly/44N9HYi>  
514
- 515 **Gaff, M.; Gašparík, M.; Borůvka, V.; Haviarová, E. 2015.** Stress simulation in  
516 layered wood-based materials under mechanical loading. *Mater Des* 87(15): 1065-  
517 1071. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.08.128>  
518
- 519 **Gašparík, M.; Gaff, M.; Babiak, M. 2017.** Tension stress simulations of layered  
520 wood using a finite element method. *Wood Research* 62(4), 517-528.  
521 <https://bit.ly/42xiRXu>  
522
- 523 **Ghavami, K.; Moreira, L.E. 1996.** Development of a new joint for bamboo space  
524 structures. *Wit Trans Built Env* 21: 201-210.  
525
- 526 **González-Yebra, Ó.; Garzón, E. 2015.** El Bambú (*Guadua angustifolia*) como  
527 material estructural empleado en el diseño de Invernaderos tipo Almería. *Ingeniería*  
528 *Civil* 177: 107-113. [http://193.145.71.12/index.php/ingenieria-](http://193.145.71.12/index.php/ingenieria-civil/article/view/521)  
529 [civil/article/view/521](http://193.145.71.12/index.php/ingenieria-civil/article/view/521)  
530
- 531 **González-Yebra, Ó. 2014.** Caracterización del bambú *Guadua* (*Guadua*  
532 *Angustifolia*) para el diseño e industrialización en España Vol. 94. Universidad de  
533 Almería, Almería, España.  
534

- 535 **González-Yebra, Ó.; Aguilar, M.A.; Aguilar, F.J. 2019a.** A first approach to the  
536 Design Component in the agri-food industry of southern Spain. *Rev Fac Cienc Agrar*  
537 *51*(1): 125-146. <https://bit.ly/3I1gSCf>  
538
- 539 **González-Yebra, Ó.; Aguilar, M.A.; Aguilar, F.J. 2019b.** Is the Design a Vector  
540 to be Considered in the Agri-food Industry? An Interprofessional Analysis in  
541 Andalusia (Spain). In: *Advances on Mechanics, Design Engineering and*  
542 *Manufacturing II*. Cavas-Martínez, F.; Eynard, B.; Fernández-Cañavate, F.;  
543 Fernández-Pacheco, D.; Morer, P.; Nigrelli, V. (Eds.). Springer, Cham.  
544 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8\\_59](https://doi.org/10.1007/978-3-030-12346-8_59)  
545
- 546 **Harries, K.A.; Bumstead, J.; Richard, M.; Trujillo, D. 2017.** Geometric and  
547 material effects on bamboo buckling behaviour. *P I Civil Eng-Str B* 170(4): 236-  
548 249. <https://doi.org/10.1680/jstbu.16.00018>  
549
- 550 **Hernández-López, S.; Ávalos-Vargas, A.; Zamudio-Sánchez, F.J., Orozco-**  
551 **Gutiérrez, G.; Borja-de la Rosa, A.M. 2021.** Colorimetría de los tallos del bambú  
552 (*Guadua angustifolia*) en tres estados de madurez. *Maderas-Cienc Tecnol* 23(8): 1-  
553 10. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2021000100408>  
554
- 555 **Hidalgo-López, O. 1981.** Manual de construcción con bambú. Estudios Técnicos  
556 Colombianos LTDA-Editores. Universidad Nacional de Colombia. Centro de  
557 investigación de Bambú y Madera (CIBAM).  
558
- 559 **International Organization for Standardization. 2018.** Bamboo structures –  
560 Grading of bamboo culms – Basic principles and procedures. ISO 19624:2018. ISO.  
561 Ginebra, Suiza. <https://www.iso.org/standard/65528.html>  
562
- 563 **International Organization for Standardization. 2019.** Bamboo structures –  
564 Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test  
565 methods. ISO 22157:2019. ISO. Ginebra, Suiza.  
566 <https://www.iso.org/standard/65950.html>  
567
- 568 **Jakovljević, S.; Lisjak, D.; Alar, Ž.; Penava, F. 2017.** The influence of humidity  
569 on mechanical properties of bamboo for bicycles. *Constr Build Mater* 150: 35-48.  
570 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.189>  
571
- 572 **José, F. J.; Beraldo, A.L. 2010.** Tableros de partículas de bambú (*Bambusa vulgaris*  
573 Schrad) y resina poliuretana a base de aceite de rícino (*Ricinus communis* L.).  
574 *Ambient Constr* 10(4): 259-266. [https://doi.org/10.1590/S1678-](https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400018)  
575 [86212010000400018](https://doi.org/10.1590/S1678-86212010000400018)  
576
- 577 **Kaminski, S.; Lawrence, A.; Trujillo, D. 2016a.** Structural use of bamboo Part 1:  
578 Introduction to bamboo. *The Structural Engineer* 94(8): 40-43.  
579 <https://bit.ly/44NaubI>  
580
- 581 **Kaminski, S.; Lawrence, A.; Trujillo, D.; Feltham, I.; López, L.F. 2016b.**  
582 Structural use of Bamboo Part 3: Design values. *The Structural Engineer* 94(12):  
583 42–45. <https://bit.ly/3pyBzyZ>  
584

- 585 **Kaur, P.J. 2018.** Bamboo availability and utilization potential as a building  
586 material. *Forest Res Eng Int J* 2(5): 240-242.  
587 <https://doi.org/10.15406/freij.2018.02.00056>  
588
- 589 **Koç, K.H.; Kizilkaya, K.; Erdinler, E.S.; Korkut, D.S. 2018.** The use of finite  
590 element method in the furniture industry. *Global J Business Manag* 12(2): 1-11.  
591 <https://bit.ly/42PmQON>  
592
- 593 **Kuehl, Y.; Yiping, L. 2012.** Carbon Off-Setting with Bamboo. International  
594 Network for Bamboo and Rattan (INBAR), Working Paper n°. 71, Beijing, China.  
595
- 596 **Liese, W. 1998.** The anatomy of bamboo culms. International Network for Bamboo  
597 and Rattan (INBAR), Technical report n°. 18, Beijing, China.  
598
- 599 **Luna, P.; Lozano, J.; Takeuchi, C. 2014.** Determinación experimental de valores  
600 característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas-Cienc*  
601 *Tecnol* 16(1): 77-92. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007>  
602
- 603 **Mora-Rodríguez, L.; Hernández-González, J.R.; Martirena-Hernández, J.F.;**  
604 **Ariel-Jiménez, S. 2008.** El tablero de bambú prensado, una nueva propuesta  
605 tecnológica. *Rev Ing Constr* 23(3): 179-186. <https://bit.ly/41t1ZzN>  
606
- 607 **Moroz, J.G.; Lissel, S.L.; Hagel, M.D. 2014.** Performance of bamboo reinforced  
608 concrete masonry shear walls. *Constr Build Mater* 61: 125-137.  
609 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.006>  
610
- 611 **Nguegang-Nkeuwa, W.; Zhang, J.; Semple, K.E.; Chen, M.; Xia, Y.; Dai, C.**  
612 **2022.** Bamboo-based composites: A review on fundamentals and processes of  
613 bamboo bonding. *Compos B Eng* 235: 109776.  
614 <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2022.109776>  
615
- 616 **Penava, F.; Jakovljević, S.; Alar, Ž. 2016.** Bamboo bicycle–past or future?. *Indecs*  
617 14(1): 70-79. <https://doi.org/10.7906/indec.14.1.7>  
618
- 619 **Peña, C.; Cabrera, A.; Emilia, M.; Castro, A.; Michelena, E.; Rúgolo de**  
620 **Agrasar, Z.; Soria, P.; Zagare, V. 2015.** *Solución Bambú: Guía para el manejo*  
621 *sustentable del Género Phyllostachys*. Editorial Tigre, Buenos Aires, Argentina.  
622
- 623 **Pérez-Ortega, S.; González-Yebra, Ó.; Oliva, R.M.; Álvarez, A.J. 2021.**  
624 Theoretical study for redesign of an agricultural package applying ecodesign  
625 strategies and CAD/CAE tools. *Dyna* 96(4): 435-440. <https://doi.org/10.6036/9979>  
626
- 627 **Ravazzolo, F.; Vespignani, J. 2020.** World steel production: A new monthly  
628 indicator of global real economic activity. *Can J Economics* 53(2): 743-766.  
629 <https://doi.org/10.1111/caje.12442>  
630
- 631 **Romero-Méndez, M.J., Rodríguez-Ortiz, J.C., Lara-Compeán, I., Betancourt-**  
632 **Urbina, M.A., Alcalá-Jáuregui, J.A., Villarreal-Guerrero, F.; Cárdenas-**  
633 **Martínez, A.I. 2017.** Prototipo de invernadero con estructura de bambú: selección

- 634 de materiales, diseño e impacto ambiental. *Rev Mex Cienc Agric* 8(5): 1059-1072.  
635 <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i5.108>  
636
- 637 **Rush, F.; Hilling, E; Chagas-Mustefaga, E.; Trevisan, R; Prata, J.G; De**  
638 **Magalhães-Miranda, G. 2023** Particleboard experimental production with bamboo,  
639 pine and mate for one product of new applications. *Maderas-Cienc Tecnol* 25(14):  
640 1-12. <http://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100414>  
641
- 642 **SolidWorks®. 2018.** Dassault Systèmes SolidWorks Corp. Waltham,  
643 Massachusetts, EE. UU.  
644
- 645 **Song, X.; Zhou, G.; Jiang, H.; Yu, S.; Fu, J.; Li, W.; Wang, W.; Ma, Z.; Peng,**  
646 **C. 2011.** Carbon sequestration by Chinese bamboo forests and their ecological  
647 benefits: assessment of potential, problems, and future challenges. *Environ Rev* 19:  
648 418-428. <https://doi.org/10.1139/a11-015>  
649
- 650 **Takeuchi, C.P. 2004.** Comportamiento estructural de la guadua angustifolia.  
651 Uniones en guadua. *Ing Invest* 24(2): 3-7. <https://bit.ly/3O7Wrr4>  
652
- 653 **Tan, T.; Rahbar, N.; Allameh, S.M.; Kwofie, S.; Dissmore, D.; Ghavami, K.;**  
654 **Soboyejo, W.O. 2011.** Mechanical properties of functionally graded hierarchical  
655 bamboo structures. *Acta Biomater* 7(10): 3796-3803.  
656 <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2011.06.008>  
657
- 658 **Trujillo, D.; Jangra, S., 2016.** *Grading of Bamboo*. International Network for  
659 Bamboo and Rattan (INBAR), Working Paper n°. 79, Beijing, China.  
660
- 661 **Trujillo, D.J.; López, L.F. 2020.** Bamboo material characterisation.  
662 In *Nonconventional and Vernacular Construction Materials*. Harries, K.A., Sharma,  
663 B. (Eds.). Woodhead Publishing, Sawston. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102704-2.00018-4>  
664  
665
- 666 **Van Dam, J.E.G.; Elbersen, H.W.; Daza-Montaño, C.M. 2018.** Bamboo  
667 production for industrial utilization. *Perennial grasses for bioenergy and*  
668 *bioproducts* 175-216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812900-5.00006-0>  
669
- 670 **Van der Lugt, P.; Van den Dobbelsteen, A.A.J.F.; Abrahams, R. 2003.** Bamboo  
671 as a building material alternative for Western Europe? A study of the environmental  
672 performance, costs and bottlenecks of the use of bamboo (products) in Western  
673 Europe. *J Bamboo Ratt* 2(3): 205-223.  
674 <https://doi.org/10.1163/15691590332255513>  
675
- 676 **Van der Lugt, P.; Van den Dobbelsteen; A.A.J.F.; Janssen, J.J A. 2006.** An  
677 environmental, economic and practical assessment of bamboo as a building material  
678 for supporting structures. *Constr Build Mater* 20(9): 648-656.  
679 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.02.023>  
680
- 681 **Vinodh, S.; Jayakrishna, K.; Alegria, D. 2012.** Environmental impact assessment  
682 of an automotive component using eco-indicator and CML methodologies. *Clean*  
683 *Technol Envir* 14(2): 333-344. <https://doi.org/10.1007/s10098-011-0405-x>



- 684 **Vratuša, S.; Kariž, M.; Ayrilmis, N.; Kuzman, M.K. 2017.** Finite element  
685 simulations of the loading and deformation of plywood seat shells. *Eur J Wood Prod*  
686 75: 729–738. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1160-4>  
687
- 688 **Xiao, Y.; Yang, R.Z.; Shan, B. 2013.** Production, environmental impact and  
689 mechanical properties of glubam. *Constr Build Mater* 44: 765-773.  
690 <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.087>  
691
- 692 **Xu, X.; Xu, P.; Zhu, J.; Li, H.; Xiong, Z. (2022a).** Bamboo construction materials:  
693 Carbon storage and potential to reduce associated CO<sub>2</sub> emissions. *Sci Total Environ*  
694 814(25): 152697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152697>  
695
- 696 **Xu, P.; Zhu, J.; Li, H.; Wei, Y.; Xiong, Z.; Xu, X. 2022b.** Are bamboo  
697 construction materials environmentally friendly? A life cycle environmental impact  
698 analysis. *Environ Impact Asses* 96: 106853.  
699 <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2022.106853>  
700
- 701 **Yadav, M.; Mathur, A. 2021.** Bamboo as a sustainable material in the construction  
702 industry: An overview. *Mater Today-Proc* 43(5): 2872-2876.  
703 <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.125>  
704
- 705 **Yiping, L.; Yanxia, L.; Buckingham, K.; Henley, G.; Guomo, Z. 2010.** Bamboo  
706 and Climate Change Mitigation. International Network for Bamboo and Rattan  
707 (INBAR), Technical report n°. 32, Beijing, China.  
708
- 709 **Zaragoza-Hernández, I.; Ordóñez-Candelaria, V.R.; Bárcenas-Pazos, G.M.;**  
710 **Borja-de la Rosa, A.M.; Zamudio-Sánchez, F.J. 2015.** Propiedades físico-  
711 mecánicas de una guadua mexicana (*Guadua aculeata*). *Maderas-Cienc*  
712 *Tecnol* 17(3): 505-516. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000045>  
713
- 714 **Zhou, F.C. 1981.** Studies on physical and mechanical properties of bamboo  
715 woods. *J Nanjing Technol Coll For Prod* 2(32): 1-32.  
716 <http://nldxb.njfu.edu.cn/EN/10.3969/j.jssn.1000-2006.1981.02.001>  
717