



UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESTUDIO DEL BAMBÚ Y SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

TESIS DOCTORAL
ALBA FERNÁNDEZ SÁNCHEZ

Memoria presentada para la obtención del grado de
Doctora por la Universidad de Granada

DIRIGIDA POR
Dr. Juan Manuel Santiago Zaragoza

TUTORIZADA POR
Dr. Antolino Gallego Molina

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE GRANADA
Granada, España
Enero de 2022



UNIVERSIDAD DE GRANADA

ESTUDIO DEL BAMBÚ Y SU USO EN LA CONSTRUCCIÓN. CARACTERIZACIÓN MECÁNICA

TESIS DOCTORAL
ALBA FERNÁNDEZ SÁNCHEZ

DIRIGIDA POR
Dr. Juan Manuel Santiago Zaragoza

TUTORIZADA POR
Dr. Antolino Gallego Molina

PROGRAMA DE DOCTORADO EN INGENIERÍA CIVIL

E.T.S. DE INGENIERÍA DE EDIFICACIÓN
UNIVERSIDAD DE GRANADA
Granada, España
Enero de 2022

Editor: Universidad de Granada. Tesis Doctorales
Autor: Alba Fernández Sánchez
ISBN: 978-84-1117-348-3
URI: <http://hdl.handle.net/10481/75423>

Para mi tita Conchi

Te quise, te quiero y te querré siempre

A mis padres, José y Juani

Os quiero

A Ana María Cruz Valdivieso

Por todo y mucho más, gracias

RESUMEN

El bambú es uno de los materiales de construcción más respetuosos con el medio ambiente y que más colabora en la lucha contra el cambio climático, pues es una de las plantas con mayor capacidad de absorción de dióxido de carbono (CO₂) del mundo. Además, su particular estructura lo dota de características físicas únicas y de una buena resistencia a compresión, tracción y flexión en relación con su limitada densidad.

Existen más de 1600 especies de bambú catalogadas, cada una de las cuales presenta sus propios atributos y singularidades. Por este motivo, el bambú tiene un enorme abanico de usos y aplicaciones. Desde hace milenios se emplea como cultivo, alimento y medicina, así como para fabricar papel, artesanías, muebles, instrumentos y ropa. También se utiliza para controlar la erosión del suelo en las cercanías de ríos y otras fuentes de agua. Entre sus aplicaciones más recientes, se ha descubierto que es capaz de descontaminar aguas residuales contaminadas con arsénico y/o con azul de metileno.

Pero sin duda uno de sus usos más antiguos es como material y elemento constructivo. En América del Sur y Asia, se emplea en todo tipo de construcciones, desde puentes y casas humildes hasta colosales andamios y magistrales edificaciones internacionalmente reconocidas y galardonadas. Sin embargo, en España no existe ninguna normativa que regule su uso en edificación, por lo que el bambú no está contemplado como material de construcción y, por lo tanto, no puede emplearse con carácter estructural, quedando su uso restringido al ámbito de los materiales de acabado.

En este contexto, esta Tesis Doctoral realiza, mediante una amplia revisión bibliográfica, un estudio sobre el bambú, sus características, propiedades y principales usos. También se detalla su empleo como material de construcción en otros países y se explica su situación actual en España. Por último, se evalúan experimentalmente dos especies: la *Guadua angustifolia Kunth* y la *Bambusa vulgaris Vulgaris*.

Para ello, y como primer paso, se describen las características generales del bambú, así como sus características físicas y mecánicas. También se detallan sus ventajas e inconvenientes, los principales países productores y algunos de sus usos más extendidos.

A continuación, se profundiza en el uso del bambú en el sector de la Construcción. Se explican los diferentes elementos constructivos que pueden fabricarse con él y los usos concretos que pueden dársele en edificación. Además, se muestran ejemplos de todo tipo de construcciones realizadas con bambú a lo largo del mundo y se describen brevemente las normativas sobre el uso del bambú en la construcción existentes actualmente en distintos países.

Por último, se analiza la situación del bambú en España y se describen pormenorizadamente las especies que están siendo estudiadas actualmente en la Universidad de Granada. Como parte de dicha investigación, se evalúan experimentalmente dos especies de bambú, calculando la resistencia que ofrecen ante las principales sollicitaciones a las que se ven expuestos los edificios.

La investigación llevada a cabo en esta Tesis ha permitido conocer los valores de resistencia de las especies analizadas, determinando cómo responden a las condiciones climáticas de Granada.

SUMMARY

Bamboo is one of the most respectful building materials with the environment and one of the most helpful materials in the fight against climate change, as it is one of the plants with the highest CO₂ absorption capacity in the world. Furthermore, its particular structure endows it with unique physical characteristics and good resistance to compression, tensile and bending concerning its limited density.

There are more than 1600 catalogued bamboo species, each of which has its attributes and uniqueness. For this reason, bamboo has a vast range of uses and applications. For millennia it has been used as a crop, food and medicine, as well as to make paper, handicrafts, furniture, instruments and clothing. Bamboo is also used to control soil erosion in the vicinity of rivers and other water sources. Among its most recent applications, it has been discovered that it is capable of decontaminating wastewater contaminated with arsenic and/or methylene blue.

But without a doubt, one of its oldest uses is as a material and a constructive element. In South America and Asia, it is used in all types of constructions, from humble bridges and houses to colossal scaffolding and internationally recognized and award-winning masterful buildings. However, in Spain there are no normative that regulate its use in buildings, so bamboo is not considered as a construction material and, therefore, cannot be used structurally, leaving its use restricted to the field of finishing materials.

In this context, this Doctoral Thesis carries out, through an extensive bibliographic review, a study on bamboo, its characteristics, properties and main uses. Its use as a building material in other countries is also detailed and its current situation in Spain is explained. Finally, two species are experimentally evaluated: *Guadua angustifolia* Kunth and *Bambusa vulgaris* Vulgaris.

To do this, and as a first step, the general characteristics of bamboo are described, as well as its physical and mechanical characteristics. Its advantages and disadvantages, the main producing countries and some of its most widespread uses are also detailed.

Next, the use of bamboo in the Construction sector is delved into. The different building elements that can be manufactured with it and the specific uses that can be given to it in a building are explained. In addition, examples of all types of constructions made with bamboo throughout the world are shown and the regulations on the use of bamboo in construction that currently exist in different countries are briefly described.

Finally, the situation of bamboo in Spain is analysed and the species currently being studied at the University of Granada are described in detail. As part of this research, two species of bamboo are experimentally evaluated, calculating the resistance that they offer to the main stresses to which buildings are exposed.

The research carried out in this Thesis has made it possible to know the resistance values of the analysed species, determining how they respond to the climatic conditions of Granada.

COLABORACIONES

En la elaboración de esta Tesis Doctoral se ha contado con el soporte y apoyo de varios expertos en diferentes áreas de trabajo. La elaboración de esta investigación ha sido posible gracias a sus aportaciones e imprescindibles contribuciones. Entre ellos:

La Dra. **Ana María Cruz Valdivieso**, docente e investigadora de la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación: Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación (TEP 232), por ser la creadora y líder de este proyecto, por impulsar la investigación, promocionarla y hacer que cada día más y más personas se enamoren del bambú.

El Arquitecto **Jorge Morán Ubidia**, por ser la principal fuente de información teórica y práctica sobre el bambú y su uso en construcción, así como por ejercer de anfitrión durante nuestra estancia en Ecuador y servirnos de inspiración para seguir apostando por el bambú.

El Ingeniero en Agronegocios **César Roberto Mosquera Cuaces**, Director General de RM Bambú, por organizar e invitarnos a participar en un taller teórico-práctico sobre el cultivo del bambú, su tratamiento químico y las principales formas de trabajarlo con herramientas manuales.

El Ingeniero Forestal **Germán Hugo Gutiérrez**, Director General de Excella Colombia SAS, por su aportación al conocimiento sobre el cultivo y la explotación comercial del bambú, en especial de la especie *Bambusa vulgaris Vulgaris*.

El Dr. **José Rodríguez Montero**, docente e investigador de la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación: Mecánica de Sólidos y Estructuras (TEP 167), a quien agradecemos la posibilidad de poder llevar a cabo los ensayos de la especie *Bambusa vulgaris Vulgaris* en el Laboratorio de Mecánica de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada.

El Dr. **Ignacio Valverde Palacios**, docente e investigador de la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación: Materiales de Construcción, Restauración y Dinámica de Suelos (TEP 942), a quien agradecemos la posibilidad de poder llevar a cabo los ensayos de la especie *Guadua angustifolia Kunth* en el Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.

El Dr. **Francisco José Rescalvo Fernández**, investigador de la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación: Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación (TEP 232), por su colaboración en el diseño y análisis de los resultados del proyecto de investigación base de esta Tesis Doctoral.

La Dra. **Elisabet Suárez Vargas**, docente e investigadora de la Universidad de Granada, integrante del grupo de investigación: Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación (TEP 232), por su contribución en la realización de los ensayos de emisión acústica y el análisis de los resultados de los mismos.

Las empresas **Volterra Ecosystem S.L.** y **Viveros Algaidas S.L.**, que han aportado gratuitamente las especies de bambú cultivadas en las plantaciones experimentales. Y la empresa **Bambusa Estudio**, que nos proporcionó la *Guadua angustifolia Kunth* ensayada y nos invitó a participar en el 1^{er} Simposio Ibérico del Bambú.

Las empresas **Caja Rural de Granada[®] S.Coop.** y **La Huerta Xpaña[®] S.L.**, así como el **Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA)**, que han aportado gratuitamente las fincas experimentales en las que se están cultivando las distintas especies de bambú.

Los técnicos **Miriam Castillo Rodríguez, Javier Muñoz Sánchez y Alfonso Segura Maroto**, miembros del grupo de investigación: Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación (TEP 232), que contribuyeron a la elaboración y ensayo de los distintos tipos de especímenes de bambú que se presentan en esta Tesis.

Los técnicos **Rafael Núñez Núñez y Luis Jiménez Moya**, técnicos del Laboratorio de Materiales de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada, por su colaboración en la preparación de los ensayos de caracterización del bambú.

Don **Abelardo Martín López**, técnico responsable de la finca experimental “La Nacla”, ubicada en Motril (Granada, España) y propiedad de Caja Rural de Granada[®] S.Coop., y **María Ángeles Ripoll**, técnico especialista titular de IFAPA, por su cuidado y atención a las respectivas plantaciones experimentales que se están desarrollando.

Los Graduados en Edificación **Yolanda Medina Sánchez, Juan Medina Espinosa y Guadalupe Sánchez Malagón**, que realizaron su Proyecto Fin de Grado dentro del grupo de investigación, contribuyendo al desarrollo de esta Tesis Doctoral.

AGRADECIMIENTOS

Quiero comenzar dando las gracias a todas las personas, empresas e instituciones que han contribuido en mayor o menor a que esta Tesis Doctoral vea la luz. Sin su ayuda, no habría sido posible llevar a cabo esta investigación.

A la Dra. Ana María Cruz Valdivieso debo darle las gracias por tantas cosas que no sé ni por dónde empezar. Fue ella quien inició todo esto y quien apostó por mí cuando ni yo misma lo hacía. Me descubrió este increíble material y me volvió una *“Loca del Bambú”* tan rápido que ni me di cuenta. Es mi profesora, mi amiga y, a veces, hasta mi madre. Pero, sobre todo, es mi ejemplo a seguir y espero con toda mi alma poder estar algún día a su altura. Sólo puedo decir gracias.

Al Dr. Juan Manuel Santiago Zaragoza y al Dr. Antolino Gallego Molina les debo el que se hayan atrevido a dirigirme y tutorizarme, cosa que no es nada fácil he de reconocer. Ambos han sido pilares fundamentales de este estudio, pues me han dirigido y supervisado en todo momento, revisando mis progresos y corrigiéndome cada vez que ha sido necesario. Tener la oportunidad de aprender y trabajar con ellos es un regalo de valor incalculable para cualquier persona y aún me emociona pensar que yo he tenido esa oportunidad. Gracias por todo y, en especial, por depositar vuestra confianza en mí. Vuestro compromiso con esta profesión es admirable.

No puedo olvidarme de mencionar a mis compañeros del grupo IDIE, en especial a Francisco José Rescalvo Fernández, por tener la paciencia necesaria para enseñarme todo aquello que no sabía y por soportar todas mis preguntas y peticiones. Y por supuesto quiero darles las gracias también a Elisabet Suárez Vargas, Chihab Abarkane, Miriam Castillo Rodríguez, Javier Muñoz Sánchez y Alfonso Segura Maroto, que me han ayudado sin dudar siempre que lo he necesitado. Todos ellos han sido imprescindibles para el adecuado desarrollo de esta investigación.

A mi familia quiero agradecerles de todo corazón su apoyo. En primer lugar, a mis padres, José y Juani. Lo normal sería agradecerles sus enseñanzas, amor, dedicación y demás, pero lo cierto es que lo que deseo agradecerles de verdad es sus constantes *“No puedes dejarlo”* y sus *“Ya te queda menos”*, cuando me veían enfadada o triste. A ellos les debo todo cuanto he conseguido en mi vida y, ahora, una cosa más. Os quiero. Y del mismo modo quiero darle las gracias al resto de mi familia, pues todos ellos me han dado siempre su apoyo y me han preguntado cada vez que nos veíamos *“¿Cómo llevas el bambú?”*. Gracias a todos.

A Marcos, mi pareja, quiero darle las gracias por soportarme. Sólo él me ha visto en mis malos momentos y en mis peores, ¡y ha tenido que aguantarme! De no ser por sus constantes ánimos y por su paciencia (y por las chuches que me traía cuando me pasaba horas y horas delante del ordenador) esta Tesis no habría salido adelante. Gracias por ser el pilar que me sostiene.

Y por último quiero darles las gracias a mis amigos. A Paula, que cada vez que me veía estresada me decía *“Me voy a tu casa y jugamos a algo”*; a mis narradores y jugadores de rol y rol en vivo, por participar conmigo en esas maravillosas aventuras que me permitían evadirme por unas horas; y a todos los demás, por ayudarme a recargar las pilas con su compañía, por apoyarme y por hacer de mi vida una experiencia mucho más divertida de lo que sería sin ellos. Por todo ello, gracias a todos.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. MOTIVACIÓN Y ESTADO DEL ARTE.....	1
1.2. OBJETIVOS.....	19
1.3. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN.....	20
1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL.....	21
2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA	23
2.1. CONOCER EL BAMBÚ	23
2.1.1. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES.....	23
2.1.1.1. Partes del bambú	23
2.1.1.2. Sistema de raíces.....	25
2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS	26
2.1.2.1. Anatomía interna	26
2.1.2.2. Dimensiones.....	26
2.1.2.3. Peso específico	27
2.1.2.4. Conductividad térmica	27
2.1.2.5. Resistencia a compresión.....	28
2.1.2.6. Resistencia a tracción.....	29
2.1.2.7. Resistencia a cortante	29
2.1.2.8. Resistencia a flexión	31
2.1.2.9. Módulo de elasticidad.....	31
2.1.2.10. Resistencia al fuego.....	33
2.1.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES.....	35
2.1.3.1. Ventajas.....	35
2.1.3.2. Inconvenientes	36
2.1.4. USOS DEL BAMBÚ	40
2.1.5. PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE BAMBÚ.....	43
2.2. EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN	45
2.2.1. PRODUCTOS DERIVADOS DEL BAMBÚ.....	46
2.2.1.1. Culmo de bambú (<i>Bamboo stem</i>)	47
2.2.1.2. Tira o listón de bambú (<i>Bamboo strip</i>).....	49
2.2.1.3. Latilla de bambú (<i>Bamboo Sliver</i>).....	52
2.2.1.4. Viruta de bambú (<i>Bamboo Chip</i>).....	54

2.2.2.	APLICACIONES DEL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN	57
2.2.2.1.	Con carácter estructural.....	57
2.2.2.2.	En cerramientos y revestimientos exteriores	59
2.2.2.3.	Como revestimiento interior y en acabados.....	60
2.2.2.4.	Construcciones efímeras o urgentes.....	61
2.2.3.	CONSTRUCCIONES CON BAMBÚ	63
2.2.3.1.	Andamios de bambú en la construcción de rascacielos en Hong Kong	63
2.2.3.2.	Viviendas tradicionales de bambú	63
2.2.3.3.	Viviendas sociales de bambú.....	64
2.2.3.4.	Puentes de bambú	66
2.2.3.5.	Construcciones efímeras de bambú.....	70
2.2.3.6.	Acabados con bambú	75
2.2.3.7.	Grandes construcciones con bambú.....	77
2.2.4.	NORMATIVA	87
2.2.4.1.	Organización Internacional para la Estandarización (ISO)	87
2.2.4.2.	China.....	90
2.2.4.3.	Colombia	91
2.2.4.4.	Ecuador.....	93
2.2.4.5.	India.....	94
2.2.4.6.	Perú	95
2.2.4.7.	Estados Unidos de América.....	96
2.2.4.8.	INBAR.....	96
2.2.4.9.	Análisis y conclusiones sobre la normalización del bambú.....	97
2.3.	EL BAMBÚ EN ESPAÑA	99
2.3.1.	CULTIVOS DE BAMBÚ EN ESPAÑA.....	99
2.3.2.	CONSTRUCCIONES CON BAMBÚ EN ESPAÑA.....	101
2.3.2.1.	Viviendas de protección oficial de Alejandro Zaera en Carabanchel	101
2.3.2.2.	Terminal 4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas	102
2.3.2.3.	Vivienda ecológica de Econhouse en las afueras de Madrid	103
2.3.3.	EVENTOS SOBRE EL BAMBÚ EN ESPAÑA.....	104
2.3.4.	ESPECIES DE BAMBÚ EN ESTUDIO EN ESPAÑA	110
2.3.4.1.	<i>Guadua</i>	110
2.3.4.2.	<i>Bambusa</i>	116
2.3.4.3.	<i>Phyllostachys</i>	123
2.3.4.4.	<i>Dendrocalamus</i>	133
2.3.4.5.	<i>Pseudosasa</i>	138

2.3.4.6.	Tabla-resumen de los géneros de bambú en estudio en España.....	141
2.3.4.7.	Tabla-resumen de las especies de bambú en estudio en España	143
3.	MATERIALES Y MÉTODOS	146
3.1.	PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO	146
3.2.	MATERIALES	147
3.2.1.	<i>BAMBUSA VULGARIS VULGARIS</i>	149
3.2.1.1.	Descripción general de la <i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	149
3.2.1.2.	Criterios de inclusión y exclusión en la selección de muestras.....	157
3.2.1.3.	Características de la muestra	158
3.2.2.	<i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	161
3.2.2.1.	Descripción general de la <i>Guadua angustifolia Kunth</i>	161
3.2.2.2.	Criterios de inclusión y exclusión en la selección de muestras.....	169
3.2.2.3.	Características de la muestra	169
3.3.	MÉTODOS.....	176
3.3.1.	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE <i>BAMBUSA VULGARIS VULGARIS</i>	179
3.3.1.1.	Procedimiento	179
3.3.1.2.	Equipos e instrumentación.....	181
3.3.2.	ENSAYOS DE TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS + EMISIÓN ACÚSTICA DE <i>BAMBUSA VULGARIS VULGARIS</i>	182
3.3.2.1.	Procedimiento	182
3.3.2.2.	Equipos e instrumentación.....	185
3.3.3.	ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	190
3.3.3.1.	Procedimiento	190
3.3.3.2.	Equipos e instrumentación.....	201
3.3.4.	ENSAYOS DE COMPRESIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	204
3.3.4.1.	Procedimiento	204
3.3.4.2.	Equipos e instrumentación.....	205
3.3.5.	ENSAYOS DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	206
3.3.5.1.	Procedimiento	206
3.3.5.2.	Equipos e instrumentación.....	207
3.3.6.	ENSAYOS DE FLEXIÓN DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	210
3.3.6.1.	Procedimiento	210
3.3.6.2.	Equipos e instrumentación.....	212

4. RESULTADOS.....	213
4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESPECIE <i>BAMBUSA VULGARIS VULGARIS</i>	213
4.1.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS .	213
4.1.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE EMISIÓN ACÚSTICA	216
4.1.2.1. Filtrado de las señales erróneamente registradas	216
4.1.2.2. Análisis de las señales correctamente registradas.....	218
4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESPECIE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	224
4.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS.....	224
4.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS .	229
4.2.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS.....	234
5. CONCLUSIONES	240
5.1. ESTUDIO DOCUMENTAL DEL BAMBÚ	240
5.2. ENSAYOS DE <i>BAMBUSA VULGARIS VULGARIS</i>	242
5.3. ENSAYOS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH</i>	243
6. BIBLIOGRAFÍA	245
7. ANEXOS	279
7.1. ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	279
7.2. ANEXO 2: SIGLARIO	282
7.3. ANEXO 3: SIMBOLOGÍA	284

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible. Fuente: Educo.	1
Figura 2. Warka Tower. Fuente: Architecture and Vision.	3
Figura 3. Guadua chacoensis del estudio de FAUBA. Fuente: Sebastián Tamashiro.	4
Figura 4. Horno para producir biocarbón de bambú. Fuente: Salvador Gallaga.....	5
Figura 5. Torre de Bambú de Carlos R. Gómez Fuente: CGR Architects.....	5
Figura 6. Detalles de la Torre de Bambú del arquitecto Carlos R. Gómez Fuente: CGR Architects	6
Figura 7. Ciudad de bambú de Penda China Architects Fuente: Penda China Architects	7
Figura 8. Torre de refrigeración adiabática de AREP Fuente: AREP	8
Figura 9. Vivienda de bambú capaz de absorber CO ₂ diseñada por Francisco Gallo. Fuente: BambHaus. 10	
Figura 10. Sistema de raíces del bambú. Fuente: Jardinería On.	11
Figura 11. Hojarasca del bambú. Fuente: Dreamstime.....	12
Figura 12. Casa modelo del proyecto de INBAR y la Corporación Hogar de Cristo en Guayaquil (Ecuador). Fuente: INBAR.	13
Figura 13. CUBO, casa de bambú diseñada por Earl Forlales. Fuente: Rina Diane Caballar.	13
Figura 14. Productos derivados del bambú. Izquierda: Pellets. Centro: Carbón. Derecha: Papel higiénico. Fuente: Ynidy Enterprise CO., LTD. (Izquierda) / Bambú Gigante (Centro) / Caboo (Derecha).....	15
Figura 15. Mujer tejiendo una cesta de bambú en China. Fuente: iStockphoto.....	16
Figura 16. “Ghana Bamboo Bikes Initiative”. Izquierda: Bernice Dapaah con una bicicleta de bambú. Centro: Mujeres fabricando una bicicleta de bambú. Derecha: Almacén de materiales con los que se fabrican las bicicletas de bambú. Fuente: El Ágora (Izquierda) / EcoInventos (Centro y Derecha).	16
Figura 17. Ensayos de laboratorio realizados en esta Tesis Doctoral. Izquierda: Ensayo de tracción paralela a la fibra de la Bambusa vulgaris Vulgaris. Centro: Ensayo de compresión paralela a la fibra de la Guadua angustifolia Kunth. Derecha: Ensayo de flexión de la Guadua angustifolia Kunth.	19
Figura 18. Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral.....	22
Figura 19. Partes del bambú. Fuente: Greco y Cromberg, 2011.	23
Figura 20. Partes internas (izquierda) y externas (derecha) del culmo de bambú. Fuente: Janssen, 2000 (Izquierda) / Estrada Mejía, 2010 (Derecha).	24
Figura 21. Sistemas de raíces del bambú. Izquierda: Bambú cespitoso. Derecha: Bambú estolonífero. Fuente: Jardinería On.	25
Figura 22. Sección longitudinal de un culmo. Fuente: De Bambú.....	26
Figura 23. Bambú a granel del estudio de Viteri López (2017). Fuente: Viteri López, 2017.	28
Figura 24. Esfuerzo cortante. Fuente: David López Morte.....	30
Figura 25. Comida cocinándose en el interior de una caña de bambú puesta al fuego. Fuente: Lobo Nómada.	34
Figura 26. Panda gigante comiendo bambú. Fuente: Muy Interesante.....	35
Figura 27. El principal enemigo del bambú: los insectos xilófagos. Izquierda: Escarabajo del bambú seco (Dinoderus minutus). Derecha: Bambú afectado por el Escarabajo del bambú seco. Fuente: Alchetron. 36	

Figura 28. Bambú inmerso en cemento. Fuente: A2K Technologies.	37
Figura 29. Arroz cocinándose en el interior de una caña de bambú puesta al fuego. Fuente: Lobo Nómada.	38
Figura 30. Barrera anti rizomas de plástico de polipropileno. Fuente: DailyBreak.	38
Figura 31. Diferentes especies de bambú. Fuente: TodoBambú.	39
Figura 32. Utensilios cotidianos fabricados con bambú. Fuente: Balones de Madera.	40
Figura 33. Proceso de fabricación de textiles a partir de bambú. Fuente: Mil Dedales.	41
Figura 34. Bambú en conserva. Fuente: Zhangzhou Hang Fat Import & Export Co., Ltd.	41
Figura 35. Andamio de bambú en un rascacielos. Fuente: Alejandro Csome.	42
Figura 36. Muebles de IKEA fabricados con bambú, ratán y mimbre. Fuente: Zhangzhou Hang Fat Import & Export Co., Ltd.	42
Figura 37. Bamboueraie de Prafance. Izquierda: Laberinto de bambú. Centro: Bosque de bambú. Derecha: Paseo entre los bosques de bambú. Fuente: Association des Parcs & Jardins du Languedoc-Roussillon – Praedium Rusticum.	44
Figura 38. Cultivo de bambú en la finca experimental "La Nacla", ubicada en Motril (Granada, España). Izquierda: Julio de 2018. Centro: Octubre de 2018. Derecha: Septiembre de 2019.	44
Figura 39. Vivienda social de bambú en Las Lisas (Santa Rosa, Guatemala). Fuente: Planos y casas.	45
Figura 40. Casa Atrevida, diseñada por el estudio Luz de Piedra Arquitectos. Fuente: Sergio Pucci.	45
Figura 41. Esquema resumen de productos derivados del bambú. Fuente: Booming Bamboo (Pablo van der Lugt, 2017).	46
Figura 42. Culmos de bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth. Fuente: Bambú Export.	47
Figura 43. Conexiones metálicas desarrolladas por Markus Heinsdorff. Fuente: Markus Heinsdorff.	48
Figura 44. Proceso de doblado de un culmo de bambú mediante soplete. Fuente: Guadua Bamboo.	48
Figura 45. Muebles fabricados con bambú cortado. Fuente: Aga Khan Foundation.	48
Figura 46. Esterilla de bambú <i>Guadua angustifolia</i> Kunth. Fuente: Guadua Bamboo.	49
Figura 47. Tiras de bambú <i>Guadua</i> . Fuente: Bambukindus S.A.S.	49
Figura 48. Tableros de bambú laminado hechos con <i>Guadua</i> . Fuente: Hangzhou Zen Bamboo and Hardwood Products Co., Ltd.	50
Figura 49. Parquet realizado con fibras de bambú tejidas. Fuente: Bothbest Bamboo Flooring.	51
Figura 50. Suelo de bambú de alta densidad diseñado para exteriores. Fuente: BWG Bamboo Vietnam.	51
Figura 51. Composite de bambú. Fuente: Chaowana y Barbu, 2017.	52
Figura 52. Mujer entrecruzando latillas de bambú. Fuente: D'source.	52
Figura 53. Bambú tejido. Izquierda: Estera de bambú tejido. Derecha: Panel ondulado de bambú tejido. Fuente: Huellas de Arquitectura (izquierda) / Guadua Bamboo (derecha).	53
Figura 54. Cuencos de bambú enroscado. Fuente: Mignon Shop.	53
Figura 55. Tapetes fabricados con bambú conectado de diferentes especies. Fuente: Brightfields.	54
Figura 56. La fibra de bambú se emplea en la fabricación de tableros MDF de bambú. Fuente: Mohammad Jawaid.	54
Figura 57. Filamento de PLA/PHA de bambú para impresora 3D. Fuente: Adafruit Industries.	55

Figura 58. Vajilla biodegradable de bambú. Fuente: El Rincón Sostenible.	55
Figura 59. Fibras de diferentes materiales naturales. Fuente: Tapicería Carrasco.	55
Figura 60. Toalla fabricada con fibras de bambú. Fuente: DH Gate.	56
Figura 61. Cubierta realizada con Guadua. Fuente: Bambusa Estudio.	57
Figura 62. Géneros de bambú más utilizados en la Construcción. Izquierda: Dendrocalamus. Derecha: Guadua. Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de Plagas (Izquierda) / Guadua Bambú (Derecha).	57
Figura 63. Armado de bambú de la solera de hormigón bastardo de cal y cemento de una vivienda ecológica situada en las afueras de Madrid (España) realizada por la empresa de bioconstrucción Econhouse. Fuente: Bambusa Estudio.	58
Figura 64. Blooming Bamboo House en Hanoi (Vietnam), diseñada y construida en 2013 por H&P Architects. Fuente: Doan Thanh Ha.	59
Figura 65. Cubierta inclinada tradicional con cobertura de medias cañas de bambú Guadua. Fuente: Bamboo Grassroots Atelier.	59
Figura 66. Cerramiento construido con bahareque encementado. Fuente: Plataforma Arquitectura.	59
Figura 67. Bambú como revestimiento en interiores. Izquierda: Bambú rollizo. Derecha: Bambú laminado. Fuente: Mundo Constructor (Izquierda) / Beatriz Argüeso (Derecha).	60
Figura 68. Pabellón de Vietnam en la Exposición Universal de Shanghái de 2010. Fuente: Larry Speck.	61
Figura 69. Andamio de bambú en la construcción de un edificio de Hong Kong. Fuente: Plataforma Arquitectura.	63
Figura 70. Vivienda tradicional de bambú en la región de Esmeraldas (Ecuador). Fuente: Semana Sostenible.	63
Figura 71. Vivienda social construida tras el terremoto de Ecuador de 2016. Fuente: Semana Sostenible.	64
Figura 72. Viviendas modelo construidas por Hogar de Cristo en Ecuador. Fuente: Hogar de Cristo.	64
Figura 73. Módulo de vivienda de 22 m ² construido por el IVUC en Pisco (Perú). Fuente: IVUC.	65
Figura 74. Módulo de vivienda sostenible y progresiva del arquitecto Carlos Pastor Santa María. Fuente: Plataforma Arquitectura.	65
Figura 75. Casa modelo diseñada por Bambú Social y la BICU en El Ramal (Nicaragua). Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.	66
Figura 76. Blooming Bamboo House. Fuente: Urban Contest.	66
Figura 77. Acuarelas de Manuel María Paz. Izquierda: Puente sobre el río Ingará construido en 1853. Derecha: Puente sobre el río La Plata construido en el año 1857. Fuente: Biblioteca Digital Mundial.	67
Figura 78. Puente diseñado por Jörg Stamm y construido en la UTP (Colombia). Fuente: CONBAM.	67
Figura 79. Puente Jenny Garzón, de Simón Vélez y Marcelo Villegas, ubicado en Bogotá (Colombia). Fuente: Historia Bogotá.	68
Figura 80. Puente de Simón Vélez para un hotel ecológico en la localidad de Guanezhou (China). Fuente: Arkilínea. Ideas Arquitectónicas.	68
Figura 81. Puente de Santo Domingo Savio (Medellín, Colombia). Fuente: SENA.	68
Figura 82. Puente de Santo Domingo Savio (Medellín, Colombia) colapsado. Fuente: Semana S.A.	69

Figura 83. Puente sobre la Avenida Libertadores (Cúcuta, Colombia) diseñado por Jörg Stamm. Fuente: Megaconstrucciones.net	69
Figura 84. Puente construido con Dendrocalamus asper en Davao (Filipinas). Fuente: Andrea Fitrianto.	69
Figura 85. House of Shōdoshima, obra de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2010. Fuente: Chinesenewart.....	70
Figura 86. Light of Shōdoshima, obra de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2013. Fuente: The Little Dröm Store.	70
Figura 87. Dream of Olive (a la izquierda) y Love in Shōdoshima (a la derecha), obras de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2016 y en el Setouchi Triennale 2019 respectivamente. Fuente: David Billa.....	71
Figura 88. Woven Sky, obra de Wang Wen-Chih como entrada al Woodford Folk Festival (Australia). Fuente: Cave Urban.....	71
Figura 89. Bamboo Cupola, obra de Wang Wen-Chih para el Höhenrausch.3 (Linz, Austria). Fuente: Otto Saxinger y Andreas Kepplinger.	71
Figura 90. Pabellón ZERI en Manizales (Colombia), obra de Simón Vélez para el V Congreso Mundial ZERI. Fuente: KALTIA.	72
Figura 91. Reproducción del Pabellón ZERI en la Exposición Universal de Hannover 2000. Fuente: EcoHabitar.	72
Figura 92. Interior de la catedral provisional construida en Pereira, obra de Simón Vélez. Fuente: BBC Worldservice.	72
Figura 93. Catedral permanente de bambú construida por Simón Vélez en Cartagena (Colombia). Izquierda: Vista exterior. Derecha: Vista desde el interior. Fuente: BBC Worldservice.	73
Figura 94. Museo Nómada del Zócalo (Ciudad de México) construido por Simón Vélez. Izquierda: Vista exterior. Derecha: Vista del interior de una de las naves laterales de la exposición. Fuente: Randy Maldonado (imagen del exterior) y Mark Sobczak (imagen del interior).....	73
Figura 95. Casa de Bambú, parte del Pabellón de Madrid en la Exposición Universal de Shanghái 2010. Fuente: Carlos J. Vial.....	74
Figura 96. Casa Germano-China en la Exposición Universal de Shanghái 2010. Fuente: Sebastian Jordana.	74
Figura 97. Cúpula del Pabellón de India en la Exposición Universal de Shanghái 2010. Fuente: Sanjay Prakash.....	75
Figura 98. Fachada del aparcamiento del zoológico de Leipzig (Alemania). Fuente: Architectuul.....	76
Figura 99. Fachada de la extensión del aparcamiento del zoológico de Leipzig (Alemania). Fuente: Archello.	76
Figura 100. Passive House en Bessancourt (Francia), obra de Karawitz Architecture. Fuente: Hervé Abbadie y Karawitz.	77
Figura 101. Propuesta del arquitecto Simón Vélez para la Terminal de Cabecera de Aguablanca (Cali, Colombia) del Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente. Fuente: Salas Delgado, 2012.....	77
Figura 102. Vista exterior de las zonas comunes del Crosswaters Ecolodge & Spa. Fuente: Architizer. ...	77
Figura 103. Sala común del Crosswaters Ecolodge & Spa. Fuente: Architizer.	78
Figura 104. Túnel de entrada al Crosswaters Ecolodge & Spa. Fuente: Architizer.	78
Figura 105. Jorge Morán Ubidia ante el Centro de Documentación del Bambú. Fuente: Jorge Martillo M.	78

Figura 106. Vista exterior del Centro de Documentación del Bambú. Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.....	79
Figura 107. Vista interior del Centro de Documentación del Bambú. Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.....	79
Figura 108. Vista exterior de la Green School. Fuente: Iwan Baan.....	80
Figura 109. Sharma Springs vista desde el sur. Fuente: Río Helmi.....	80
Figura 110. Sharma Springs vista desde el noreste. Fuente: Río Helmi.....	80
Figura 111. Ananda House. Fuente: Stephen Johnson.....	81
Figura 112. Vista exterior de la Aldo's Kitchen. Fuente: IBUKU.....	81
Figura 113. Interior de la Aldo's Kitchen. Fuente: IBUKU.....	81
Figura 114. Interior de la Kura Kura Badminton Court. Fuente: Tommaso Riva.....	82
Figura 115. Exterior de la Kura Kura Badminton Court. Fuente: Tommaso Riva.....	82
Figura 116. Exterior del edificio Great (Bamboo) Wall. Fuente: Arquitectura Viva.....	82
Figura 117. Patio del edificio Great (Bamboo) Wall. Fuente: Arquitectura Viva.....	83
Figura 118. Interior del Bamboo Wing. Fuente: Hiroyuki Oki.....	83
Figura 119. Detalle del Bamboo Wing. Fuente: Hiroyuki Oki.....	84
Figura 120. Interior del Dai Lai Conference Hall. Fuente: Hiroyuki Oki.....	84
Figura 121. Detalle del techo de bambú del Dai Lai Conference Hall. Fuente: Hiroyuki Oki.....	84
Figura 122. Cúpula grande y cúpula pequeña del Diamond Island Community Center. Fuente: Hiroyuki Oki.....	85
Figura 123. Cúpula grande del Diamond Island Community Center. Izquierda: Vista interior. Derecha: Vista exterior. Fuente: Hiroyuki Oki.....	86
Figura 124. José Baña con una planta de bambú. Fuente: José Pardo.....	99
Figura 125. Plantación de Volterra en Ceclavín (Cáceres, España). Fuente: Volterra.....	100
Figura 126. Planta de Bambusa vulgaris Vulgaris en la finca "La Nacla". Octubre de 2018.....	100
Figura 127. Viviendas de protección oficial en Carabanchel (Madrid) del arquitecto Alejandro Zaera. Fuente: Foreign Office Architects.....	101
Figura 128. Pabellón de Madrid en la Exposición Universal de Shanghái 2010. Fuente: Plataforma Arquitectura.....	102
Figura 129. Techo de bambú de la T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Fuente: MOSO.....	102
Figura 130. "Bosque" de bambú simulado por el techo la T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Fuente: Estudio Lamela & Rogers Stirk Harbour.....	103
Figura 131. Vivienda ecológica construida por Econhouse en las afueras de Madrid (España). Fuente: Bambusa Estudio.....	103
Figura 132. Taller de aprendizaje de uniones de bambú.....	104
Figura 133. Elaboración y montaje de la estructura del modelo experimental.....	105
Figura 134. Fabricación de las paredes y del suelo del modelo experimental.....	105
Figura 135. Montaje y finalización del modelo experimental.....	106

Figura 136. Qin Daochun, Director de Ciencia y Tecnología del Centro Internacional para el Bambú y el Ratán (ICBR), realizando su intervención durante el Primer Simposio Ibérico del Bambú. Fuente: Bambusa Estudio.	106
Figura 137. Jefes de Estado o de Gobierno y representantes de los principales organismos internacionales en la ceremonia de apertura de la COP25 celebrada en 2019 en Madrid (España). Fuente: El País.	107
Figura 138. Cartel del webinar de INBAR del 9 de marzo de 2021 Fuente: INBAR	108
Figura 139. Cartel del webinar de INBAR del 20 de diciembre de 2021 Fuente: INBAR	109
Figura 140. Guadua verde. Fuente: Wikipedia.	110
Figura 141. Composición interna de la Guadua. Fuente: Palakas.	111
Figura 142. Rizoma de Guadua. Fuente: Guadua Bamboo.	111
Figura 143. Reproducción asexual mediante chusquines de la Guadua. Fuente: Guadua Bamboo.	111
Figura 144. Guadua angustifolia Kunth seca. Izquierda: Culmos cortados y curados. Derecha: Culmo seccionado. Fuente: Bambusa Estudio (Izquierda) / Palakas (Derecha).	115
Figura 145. Espina de un culmo de Guadua angustifolia Kunth forma Macana. Fuente: Guadua y Bambú Colombia.	115
Figura 146. Formas de Guadua angustifolia Kunth. Fuente: INBAR.	116
Figura 147. Bambusa ventricosa. Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de Plagas.	116
Figura 148. Bambusa oldhamii. Fuente: Bambú Piante Ornamentali Italia	119
Figura 149. Bambusa oldhamii cultivada en invernadero. Fuente: Red Cloud Bamboo.	119
Figura 150. Hombre cocinando Bambusa oldhamii. Fuente: Canal 2.	120
Figura 151. Bambusa vulgaris Vittata y nuevo brote. Fuente: Caldwell Nursery and Botanic Gardens... 120	120
Figura 152. Explantes de Bambusa vulgaris Vittata a los 10 días de cultivo durante su reproducción in vitro. Fuente: García-Ramírez, et al. (2007).	121
Figura 153. Bambusa vulgaris Vulgaris. Izquierda: Culmos. Centro: Brote. Derecha: Hojas. Fuente: Guadua Bamboo (Izquierda) / Exotic Plants (Centro) / Herbarium (Derecha).	121
Figura 154. Bambusa vulgaris Vulgaris en macetero. Fuente: Flores y Plantas Jocama.	122
Figura 155. Extracto de Bambusa vulgaris Vulgaris alto en sílice, procedente de India. Fuente: Ambe NS Agro Products Pvt. Ltd.	122
Figura 156. Phyllostachys bambusoides. Fuente: Naturalista.	123
Figura 157. Par de ramas en un nudo de un culmo de Phyllostachys aurea. Fuente: Naturalista.	124
Figura 158. Flauta fabricada con bambú Phyllostachys. Fuente: Un Mundo de Bambú.	124
Figura 159. Phyllostachys atrovaginata. Fuente: Daniel Sambraus.	125
Figura 160. Brotes de Phyllostachys atrovaginata con sus vainas oscuras. Fuente: I Love Bamboo.	125
Figura 161. Corte transversal de un rizoma de Phyllostachys atrovaginata que muestra los canales huecos por los que circula el aire. Fuente: Noah Bell.	125
Figura 162. Phyllostachys atrovaginata con uso decorativo. Fuente: Randijk Bamboe & Hoveniers.	126
Figura 163. Vellosidades de un culmo joven de Phyllostachys pubescens. Fuente: Exotic Plants.	126
Figura 164. Culmos jóvenes de Phyllostachys pubescens. Fuente: Exotic Plants.	127

Figura 165. <i>Phyllostachys pubescens</i> jóvenes. Izquierda: Brote nuevo. Derecha: Hoja caulinar desprendiéndose del culmo. Fuente: Exotic Plants.....	127
Figura 166. Culmos adultos y semillas de <i>Phyllostachys pubescens</i> . Fuente: The UK Factory.	127
Figura 167. Semillas germinadas de <i>Phyllostachys pubescens</i> plantadas en un semillero. Fuente: Banggood.....	128
Figura 168. <i>Phyllostachys pubescens</i> Bicolor. Fuente: La Bamboueraie.	128
Figura 169. Posavelas fabricados con <i>Phyllostachys pubescens</i> . Fuente: Happyseed.....	128
Figura 170. Brotes de <i>Phyllostachys pubescens</i> listos para su ingesta. Fuente: Happyseed.	129
Figura 171. Culmos adultos de <i>Phyllostachys nigra</i> . Fuente: SVI.	129
Figura 172. Cambio de color de la <i>Phyllostachys nigra</i> . Izquierda: Culmos de 1 año de edad. Centro: Culmos de 2 años de edad. Derecha: Culmos de 3 años de edad. Fuente: Noah Bell.	130
Figura 173. <i>Phyllostachys nigra</i> rompe el macetero tratando de expandirse. Fuente: Noah Bell.	130
Figura 174. Semillas germinadas de <i>Phyllostachys nigra</i> . Fuente: Boonthammee Bamboo Garden (BBG).	130
Figura 175. Usos decorativos de la especie <i>Phyllostachys nigra</i> . Izquierda: Como maceta. Centro: Como panel de acabado para paredes y otras superficies. Derecha: Como cañizo. Fuente: Ned Jaquith (Izquierda) / Noah Bell (Centro) / Caneplex Design.	131
Figura 176. Polvo de extracto de hojas de la <i>Phyllostachys nigra</i> . Fuente: Tea Net.	132
Figura 177. <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Fuente: Bambo Seeds Shop.	133
Figura 178. Brotes nuevos de <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Fuente: Mathieu Gilard.....	133
Figura 179. Semillas de <i>Dendrocalamus giganteus</i> . Fuente: Bambú Gigante.	134
Figura 180. Platos biodegradables fabricados con hojas caulinares de <i>Dendrocalamus</i> . Fuente: Argentina Forestal.....	134
Figura 181. Bosque de bambú de la especie <i>Dendrocalamus asper</i> . Fuente: Kana Oka.....	135
Figura 182. Hoja caulinar de <i>Dendrocalamus asper</i>	136
Figura 183. Floración de la especie <i>Dendrocalamus asper</i> . Fuente: Villa Bamboo Perú.	136
Figura 184. Culmo adulto de <i>Dendrocalamus asper</i> . Fuente: Bamboo Land Nursery and Parklands.....	137
Figura 185. Brote joven de <i>Dendrocalamus asper</i> . Fuente: Steven Starnes.	137
Figura 186. Reproducción de la especie <i>Dendrocalamus asper</i> mediante la siembra de una sección del culmo. Fuente: Fundación AVSI.....	138
Figura 187. Estructura fabricada con <i>Dendrocalamus asper</i> . Fuente: Forestal Maderero.	138
Figura 188. Pseudosasa japónica. Fuente: Wikipedia.	139
Figura 189. Detalle de los culmos. Fuente: Bambú Parque.....	139
Figura 190. Detalle de las hojas. Fuente: Wikipedia.	139
Figura 191. Usos de la Pseudosasa japónica. Izquierda: Como maceta decorativa. Centro: Para luchar contra la erosión de las riberas de los ríos. Derecha: Como pantalla vegetal. Fuente: Vivai Decandia Giovanni (Izquierda) / Wikipedia (Centro) / Bambú Parque (Derecha).....	140
Figura 192. Semillas de Pseudosasa japónica. Fuente: Azura Plants, Flower & Tree Seeds.	140
Figura 193. Partes principales del bambú a nivel macroscópico y microscópico. Fuente: Tarun Gangwar (Culmo y secciones) / Big Plants (Detalle del nudo).	148

Figura 194. Distribución de la <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> en el mundo. Fuente: Global Biodiversity Information Facility.	149
Figura 195. Culmos de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Fuente: Karl Gercens.....	150
Figura 196. Culmo joven aún protegido por las hojas caulinares urticantes que lo envuelven. Fuente: João Paglione.....	150
Figura 197. Flores de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Fuente: Wendy A. Mustaqim.	151
Figura 198. <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> en una jardinera en China. Fuente: Fuyang Bestop Impex.	151
Figura 199. Artesanías realizadas con <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . De izquierda a derecha: Bolso. Cestos y canastos. Porta velas y bandeja. Jarra con tapadera. Fuente: APK Pure.....	151
Figura 200. Brote recién nacido de <i>B. Vulgaris</i> . Fuente: Apuama.....	152
Figura 201. Diferentes preparaciones culinarias de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Fuente: Herbarium.	152
Figura 202. Suplemento dietético alto en sílice a base de extracto de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Fuente: Farmacia Serra.....	153
Figura 203. Sección de una caña de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> salvaje donde se aprecia el grosor de sus paredes y la excentricidad de su oquedad	154
Figura 204. Cercado para el ganado caprino fabricado con <i>Bambusa vulgaris</i> . Fuente: Depositphotos.	154
Figura 205. Nave agropecuaria para ganado vacuno diseñada en Cuba (empleando <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> como material estructural y principal) como parte del Proyecto Internacional Bambú-Biomasa. Fuente: Pascual Menéndez (2011).	155
Figura 206. Nacimiento de un brote a partir de un trozo de culmo enterrado. Fuente: Fleitas Díaz et al. (2018).	156
Figura 207. Culmos de la mancha de Viveros Algaidas válidos para el muestreo. Fuente: Torreón Arquitectura.	157
Figura 208. Culmos elegidos para la realización de los ensayos	158
Figura 209. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada caña.....	159
Figura 210. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada latilla	160
Figura 211. Distribución de la <i>Guadua angustifolia</i> <i>Kunth</i> en el mundo. Fuente: Global Biodiversity Information Facility.	161
Figura 212. Guadual. Fuente: Bambúes de Xalapa.....	162
Figura 213. Culmos de <i>Guadua angustifolia</i> <i>Kunth</i> . Fuente: Guadua Bambú.	162
Figura 214. Bosque de <i>Guadua angustifolia</i> <i>Kunth</i> empleado como sumidero de CO ₂ . Fuente: Bambusa Estudio.....	163
Figura 215. Lapicero de bambú. Fuente: Di Masi Artesanato em Bambus.	163
Figura 216. Campana de viento fabricada con bambú situada en un jardín Zen. Fuente: Mundo Bambú.	164
Figura 217. Líquenes en la superficie de varios culmos de <i>Guadua angustifolia</i> <i>Kunth</i> . Fuente: Guadua y Bambú Colombia.	164
Figura 218. Corte de los culmos. Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos, s.f.	164
Figura 219. Tratamiento preventivo de las cañas contra el ataque de xilófago mediante una solución de pentaborato. Fuente: Bambusa Estudio.....	165

Figura 220. Microscopía de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth variedad Bicolor. Fuente: Montiel, et al. (2006).	166
Figura 221. Técnica de curvado mediante cortes. Fuente: Jaramillo Koupermann (2018).	166
Figura 222. Detalle del elemento metálico que separa las columnas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth del suelo. Fuente: Carolina Zuluaga.	168
Figura 223. Culmos representativos de las cañas seleccionadas para el ensayo. Fuente: Álvaro Izuzquiza.	169
Figura 224. <i>Guadua angustifolia</i> Kunth del ensayo. Izquierda: Cañas. Derecha: Latillas. Fuente: Bambusa Estudio.	170
Figura 225. Estructura de bambú en el exterior de la ETSIE de la UGR	170
Figura 226. Historial climatológico de Granada registrado por la estación 5515X durante el período de tiempo en que la estructura de bambú estuvo expuesta a la intemperie. Izquierda: Línea negra – Temperatura media / Área gris – Rango de temperaturas máximas y mínimas / Línea azul punteada – Humedad relativa. Derecha: Precipitación acumulada mensual.	171
Figura 227. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada caña de GaK.	172
Figura 228. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada latilla de GaK.	174
Figura 229. Ejemplo de probeta para ensayo de tracción paralela a las fibras según la norma ISO 22157-1:2004. Fuente: ISO 22157-1:2004.	179
Figura 230. Esquemas de las probetas de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Dimensiones en mm.	180
Figura 231. Latilla rotulada con el patrón diseñado para las probetas	181
Figura 232. Herramientas empleadas para la elaboración de las probetas de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Izquierda: Sierra de calar Bosch PST 650. Derecha: DREMEL® 3000. Fuente: Suministros Industriales Pasai (Izquierda) / Arcashop (Derecha).	181
Figura 233. Elaboración de probetas de <i>Bambusa vulgaris</i> <i>Vulgaris</i> . Izquierda: Probeta en proceso de lijado. Derecha: Comparativa entre el estado inicial y final de las probetas.	181
Figura 234. Ejemplo de probeta con y sin diafragma	182
Figura 235. Esquema de las probetas y posiciones de los sensores EA. Izquierda: Probetas sin diafragma (UN1 y UN2). Derecha: Probetas con diafragma (N1 y N2). Dimensiones en mm.	182
Figura 236. Rotura de mina de lápiz (PLB). Fuente: Nguyen Minh-Dung.	183
Figura 237. Probetas señalizadas listas para el ensayo	183
Figura 238. Señal EA registrada durante la prueba en la muestra UN1. Izquierda: Definición de la señal y de la ventana temporal (W_0). Derecha: Magnitud del espectro.	184
Figura 239. Probeta en la máquina de ensayos con los cuatro sensores VS45-H	184
Figura 240. Esquema del ensayo de EA. Fuente: Adaptada de Moreno Bazán (2015).	185
Figura 241. Sensor VS45-H de Vallen Systeme y curva de sensibilidad del mismo. Líneas azules: Frecuencias de corte de los filtros de adquisición. Fuente: Adaptada de Vallen Systeme.	186
Figura 242. Grasa de silicona Loctite LB 8104 utilizada como acoplante en los ensayos. Fuente: Xtrack.	187
Figura 243. Montaje de los sensores en los ensayos.	187
Figura 244. Transmisión de la señal desde el sensor al preamplificador. Izquierda: Cable sensor-preamplificador de 1.20 m de longitud. Derecha: Preamplificador AEP4 de Vallen Systeme. Fuente: Adaptada de Martínez Jiménez (2016).	188

Figura 245. Cable coaxial BNC. Fuente: Martínez Jiménez (2016).	188
Figura 246. Equipo Vallen Systeme AMSY-5 utilizado para registrar la EA. Fuente: Moreno Bazán (2015).	188
Figura 247. Procesamiento de la señal. Izquierda: Portátil utilizado en los ensayos de EA. Derecha: Ventana del programa utilizado para interpretar las señales de EA. Fuente: Adaptado de Martínez Jiménez (2016) y Moreno Bazán (2015).	189
Figura 248. Ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de la Bambusa vulgaris Vulgaris Izquierda: Máquina de ensayos universal electromecánica IBERTEST®, modelo TESTRONIC-100-MD2. Derecha: Pantalla del software para máquinas de ensayo: Zona Testronic-100-MD2 (100kN).	189
Figura 249. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.	191
Figura 250. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de Guadua angustifolia Kunth del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.....	191
Figura 251. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.	194
Figura 252. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de Guadua angustifolia Kunth del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.....	195
Figura 253. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de flexión en 4 puntos.....	197
Figura 254. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de Guadua angustifolia Kunth del ensayo de flexión.....	198
Figura 255. Máquinas empleadas en la elaboración de las probetas de compresión. Izquierda: Combinada multifunción ROBLAND NX 310 Pro. Derecha: Lijadora combinada de banda/disco de la marca JET, modelo JSG-96CS.....	201
Figura 256. Probetas mecanizadas de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras.....	201
Figura 257. Elementos utilizados en la fabricación de las probetas de tracción. Izquierda: Adhesivo Loctite Super Glue-3. Derecha: Esponja abrasiva de grano medio. Fuente: Deskidea (Izquierda) / Almacenes de Ferretería San Rafael S.L. (Derecha).....	202
Figura 258. Probetas mecanizadas de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras.	202
Figura 259. Probetas mecanizadas de los ensayos de flexión. Arriba: Probetas de la cámara climática con nudo. Abajo: Probetas expuestas al aire libre sin nudo.	203
Figura 260. Probetas del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras. Izquierda: Probetas con nudo expuestas al aire libre listas para ser ensayadas. Derecha: Probeta con nudo expuesta al aire libre siendo ensayada.....	204
Figura 261. Prensa hidráulica de la marca IIC grupo EP, modelo IC-200-CO con una probeta lista para ser ensayada.....	205
Figura 262. Lámina de caucho utilizada como capa intermedia. Fuente: SoloStocks (Izquierda).....	205
Figura 263. Probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras. Izquierda y centro: Probetas sin nudo expuestas al aire libre colocadas en la prensa. Derecha: Probetas con y sin nudo procedentes de la cámara climática listas para ser ensayadas.....	206
Figura 264. Ubicación de las galgas extensiométricas en las probetas del ensayo de tracción. Dimensiones en mm.....	207
Figura 265. Prensa eléctrica multiensayos modelo S-110 del Grupo EP INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL S.A.....	208
Figura 266. Amplificador de medida universal modelo QuantumX MX840B de HBM. Fuente: HBM.....	208

Figura 267. Galga extensométrica modelo K-CLY4x-10/120 de HBM. Dimensiones en mm.	209
Figura 268. Adhesivo rápido X60 de HBM. Fuente: HBM.....	209
Figura 269. Probetas del ensayo de flexión en 4 puntos. Izquierda: Probeta siendo ensayada. Derecha: Probetas listas para ser ensayadas.....	210
Figura 270. Ubicación de las probetas durante el ensayo de flexión. Izquierda: Dimensiones (en mm) de las probetas utilizadas en el ensayo de flexión. δ es el espesor de la probeta, $f_{b,la}$ es el esfuerzo de flexión en el punto de aplicación de la carga. $f_{b,ms}$ es el esfuerzo de flexión en el centro geométrico. Derecha: Probeta durante un ensayo de flexión.	211
Figura 271. Ubicación de las galgas extensiométricas en las probetas del ensayo de flexión. Dimensiones en mm.	211
Figura 272. Patrón de fractura de las probetas N2 (arriba) y UN1 (abajo).	214
Figura 273. Representación de las fracturas observadas en las probetas tras el ensayo. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.	214
Figura 274. Carga a lo largo del tiempo para las probetas analizadas. Líneas rojas: Probetas sin diafragma. Líneas azules: Probetas con diafragma.	215
Figura 275. Equipo de microscopía AURIGA (FIB-FESEM) de Carl Zeiss SMT. Fuente: Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada.....	215
Figura 276. Vistas microscópicas SEM de los tres patrones de fractura.	216
Figura 277. Ejemplo de dos señales de EA. a) Señal bien registrada, b) Señal mal registrada. Fuente: Rescalvo Fernández (2018).....	217
Figura 278. Señal EA registrada durante el ensayo de la probeta UN1. Izquierda: Definición de la señal y de la ventana temporal (W_0). Derecha: Magnitud del espectro.	217
Figura 279. Diagrama Amplitud (A) versus Duración (Dur) de las señales EA registradas durante el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de la probeta UN1. Izquierda: Antes del filtrado de los sensores guarda. Derecha: Después del filtrado de los sensores guarda.	218
Figura 280. Eventos de EA acumulados a lo largo del tiempo para las probetas analizadas. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.	219
Figura 281. Ubicación de las señales EA durante la prueba de tracción vertical paralela a las fibras. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.	220
Figura 282. Posición de las señales EA versus Energía de las señales EA. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2..	220
Figura 283. Patrón de fractura de las probetas N2 (arriba) y UN1 (abajo).	221
Figura 284. Representación de las fracturas observadas en las probetas tras el ensayo. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.	221
Figura 285. Centro de Gravedad (CoG) de los eventos EA. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.....	222
Figura 286. Eventos de EA acumulados a lo largo del tiempo. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.	223
Figura 287. Tensión máxima a compresión ($f_{c,0}$). x: Valor medio. Línea horizontal: Mediana. Área coloreada: Primer y tercer cuartil. Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.	226
Figura 288. Curvas de tensión versus tiempo para las probetas de bambú sometidas al ensayo de compresión. Cinco muestras por cada tipo. Izquierda: Muestras sin nudo. Derecha: Muestras con nudo.	227
Figura 289. Imágenes de las probetas después del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.	228

Figura 290. Resultados del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras. Izquierda: Tensión máxima de tracción ($f_{t,0}$). Derecha: Módulo de elasticidad en tracción ($E_{t,0}$). x: Valor medio. Línea horizontal: Mediana. Área coloreada: Primer y tercer cuartil. Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.	231
Figura 291. Curvas tensión-desplazamiento para las probetas sometidas al ensayo de tracción. Izquierda: Muestras sin nudo. Derecha: Muestras con nudo.	232
Figura 292. Imágenes de las probetas después del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.	233
Figura 293. Curvas tensión-desplazamiento para probetas sometidas a ensayos de flexión en 4 puntos, con la capa de sílice en las caras de compresión y tracción.	234
Figura 294. Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos. Arriba-Izquierda: Tensión máxima en flexión considerando la zona en los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$). Arriba-Derecha: Tensión máxima en flexión considerando el área central de la probeta ($f_{b,ms}$). Abajo-Izquierda: Módulo de elasticidad en flexión considerando la zona en los puntos de aplicación de la carga ($E_{b,la}$). Abajo-Derecha: Módulo de elasticidad en flexión considerando el área central de la probeta ($E_{b,ms}$). x: Valor medio. Línea horizontal: Mediana. Área coloreada: Primer y tercer cuartil. Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.	237
Figura 295. Curvas tensión-desplazamiento para las probetas sometidas al ensayo de flexión. Arriba a la izquierda: Muestras sin nudo. Arriba a la derecha: Muestras con nudo, considerando la zona entre los apoyos. Abajo: Muestras con nudo, considerando la sección del centro geométrico de la probeta.	239
Figura 296. Imágenes de las probetas después del ensayo de flexión en 4 puntos.	239

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Peso específico del bambú seco según varios autores. Fuente: Zaragoza-Hernández et al. 2015.	27
Tabla 2. Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú según varios autores.	28
Tabla 3. Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú según varios autores.	29
Tabla 4. Resistencia a cortante del bambú seco según varios autores.	30
Tabla 5. Módulo de rotura del bambú según varios autores.	31
Tabla 6. Módulo de elasticidad del bambú para distintos esfuerzos según varios autores.	32
Tabla 7. Géneros de bambú más comúnmente utilizados en la construcción. Fuente: Martínez García, 2015.	57
Tabla 8. Propiedades mecánicas de los laminados de Guadua según el estudio de López y Correal (2009). Fuente: López y Correal, 2009.	60
Tabla 9. Valores de las principales características físico-mecánicas de distintas especies de Guadua. ...	112
Tabla 10. Valores de las principales características físico-mecánicas de distintas especies de Bambusa.	117
Tabla 11. Valores de las principales características físico-mecánicas de la especie Dendrocalamus asper.	134
Tabla 12. Resumen comparativo de los géneros de bambú en estudio en España.	141
Tabla 13. Resumen comparativo de las especies de bambú en estudio en España.	143
Tabla 14. Valores de las principales características físico-mecánicas de la Bambusa vulgaris Vulgaris. .	156
Tabla 15. Dimensiones de cada caña de Bambusa vulgaris Vulgaris seleccionada para el ensayo.	159
Tabla 16. Dimensiones de cada latilla de Bambusa vulgaris Vulgaris seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo.	159
Tabla 17. Valores de las principales características físico-mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth (GaK).	167
Tabla 18. Dimensiones de cada caña de Guadua angustifolia Kunth seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo de compresión paralela a la fibra.	172
Tabla 19. Dimensiones de cada latilla de Guadua angustifolia Kunth seleccionada para elaborar los especímenes de los ensayos de tracción paralela a la fibra.	173
Tabla 20. Dimensiones de cada latilla de Guadua angustifolia Kunth seleccionada para elaborar los especímenes de los ensayos de flexión.	174
Tabla 21. Nomenclatura y dimensiones de las probetas de Bambusa vulgaris Vulgaris (en mm).	180
Tabla 22. Características del sensor VS45-H de Vallen Systeme. Fuente: Vallen Systeme.	186
Tabla 23. Números de serie de los sensores VS45-H utilizados en el ensayo.	186
Tabla 24. Ensayos realizados y nomenclatura de cada tipo de probeta. 18 muestras ensayadas para cada caso.	190
Tabla 25. Características de las probetas de Guadua angustifolia Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.	192

Tabla 26. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.....	192
Tabla 27. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.	193
Tabla 28. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo expuestas al aire libre del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.	193
Tabla 29. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.....	195
Tabla 30. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.....	196
Tabla 31. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.	196
Tabla 32. Características de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo expuestas al aire libre del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.	197
Tabla 33. Características de las probetas de GaK sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de flexión.	199
Tabla 34. Características de las probetas de GaK con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de flexión.	199
Tabla 35. Características de las probetas de GaK sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de flexión.	200
Tabla 36. Características de las probetas de GaK con nudo expuestas al aire libre del ensayo de flexión.	200
Tabla 37. Resultados del ensayo a tracción vertical paralela a las fibras de <i>Bambusa vulgaris</i> Vulgaris.	213
Tabla 38. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática.	224
Tabla 39. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.	225
Tabla 40. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo expuestas al aire libre.	225
Tabla 41. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo expuestas al aire libre.	226
Tabla 42. Tensión máxima y contenido de humedad para probetas de bambú sometidas a compresión vertical paralela a las fibras. Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico. Las letras (A, B) indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).	227
Tabla 43. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática.....	229
Tabla 44. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.	229
Tabla 45. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo expuestas al aire libre.....	230
Tabla 46. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo expuestas al aire libre.	230

Tabla 47. Tensión máxima, módulo de elasticidad y contenido de humedad para probetas sometidas a tracción vertical paralela a las fibras. Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico. Las letras (A, B) indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).	231
Tabla 48. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática.	235
Tabla 49. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.....	235
Tabla 50. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth sin nudo expuestas al aire libre.	236
Tabla 51. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth con nudo expuestas al aire libre.....	236
Tabla 52. Tensión máxima, módulo de elasticidad y contenido de humedad para probetas sometidas a flexión en 4 puntos. Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico. Las letras indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).	237

1. INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN Y ESTADO DEL ARTE

La sociedad actual, y en especial el sector de la Construcción, demandan a nivel nacional e internacional la búsqueda, desarrollo y empleo de materiales: ecológicos, renovables y medioambientalmente sostenibles.

Siguiendo esta premisa, el 25 de septiembre de 2015, los jefes de Estado y de Gobierno de los 193 países miembros de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) se comprometieron con los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de Naciones Unidas mediante la firma de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (**Figura 1**). Estos objetivos se desarrollan a su vez en 169 metas concretas y se cuantifican a través de 232 indicadores (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018).



Figura 1. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
Fuente: Educo.

La Agenda 2030 representa el compromiso internacional para hacer frente a los retos sociales, económicos y medioambientales de la globalización, poniendo en el centro a las personas, el planeta, la prosperidad y la paz, bajo el lema de “No dejar a nadie atrás”. La Agenda pretende avanzar hacia sociedades con un crecimiento económico inclusivo y mayor cohesión y justicia social, en paz y con un horizonte medioambiental sostenible (Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, 2018).

La Agenda 2030 es la sucesora de los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), firmados en el año 2000, también en el marco de la ONU, y centrados en combatir la pobreza en los países en vías de desarrollo. La nueva Agenda 2030 amplió los horizontes de su predecesora, combinando el enfoque en erradicar la pobreza con la preocupación por el medioambiente (El Orden Mundial, 2020).

No obstante, la Agenda 2030 implica un compromiso común y universal, puesto que cada país enfrenta retos específicos en su búsqueda del desarrollo sostenible, los Estados tienen soberanía plena sobre su riqueza, recursos y actividad económica, y cada uno fijará sus propias metas nacionales (Naciones Unidas, 2015).

En España, el Consejo de Ministros aprobó, el 29 de junio de 2018, el Plan de Acción para la Implementación de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y lo remitió a las Naciones Unidas como soporte del Examen Nacional Voluntario al que España se sometió, el 18 de julio de 2018, en Nueva York.

El Plan pretende impulsar la implementación de la Agenda 2030 en España, para lo que recoge un primer conjunto de áreas prioritarias de política denominadas palanca, con capacidad de acelerar el proceso transversalmente y a mayor escala en el conjunto de los 17 ODS. Entre ellas se encuentra la Ley de Cambio Climático y Transición Energética (Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, 2018).

En relación con la Agenda 2030 y los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible, el bambú puede contribuir de forma directa en cuatro de ellos: ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento, ODS 11 Ciudades y Comunidades Sostenibles, ODS 13 Acción por el Clima y ODS 15 Vida de Ecosistemas Terrestres.

El ODS 6, Agua Limpia y Saneamiento, pretende garantizar la disponibilidad y la gestión sostenible del agua y el saneamiento para todas las personas, objetivo fundamental para el desarrollo sostenible de la sociedad a nivel económico, social y ambiental y para la lucha contra la pobreza y las enfermedades. El agua es, por tanto, una realidad económica y un recurso imprescindible en el mantenimiento de los ecosistemas, pero sobre todo es un derecho esencial para la vida y la dignidad de los seres humanos.

El reconocimiento en julio de 2010 por parte de la Asamblea General de Naciones Unidas del acceso básico al agua y saneamiento como un derecho humano tiene relación directa con la condición del agua como bien público, base de la vida y de la economía y garante del bien común. Sin embargo, 3 de cada 10 personas en el mundo carecen de acceso a servicios de agua potable seguros y 6 de cada 10 carecen de acceso a instalaciones de saneamiento gestionadas de forma segura.

Dada la naturaleza semiárida o árida de gran parte del territorio español y el creciente problema de desertificación, como demuestra el descenso de precipitaciones del 18% que tuvo lugar entre los años 1980 y 2010, el ODS 6 está especialmente relacionado con el ODS 13 de lucha contra el cambio climático (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018).

En España, el indicador 6.4.2 de los ODS, el nivel de estrés hídrico¹, se situó en el 42.5% en el año 2017, último año en que se midió, lo que supone más del doble de la media mundial (16.5%) y cinco veces la media europea (8.5%). A este dato se suma también que más del 80% de las aguas residuales resultantes de actividades humanas se vierten en los ríos o el mar sin ningún tratamiento, lo que provoca su contaminación (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

El bambú puede ayudar al cumplimiento de la meta 6.1 del ODS, que pretende lograr el acceso universal y equitativo al agua potable a un precio asequible para todas las personas.

El arquitecto italiano Arturo Vittori, director de la compañía Architecture and Vision y de la organización sin ánimo de lucro Warka Water, desarrolló en Etiopía, en el año 2014, el proyecto Warka Tower (**Figura 2**), *“diseñado para ofrecer agua limpia, además de para ser social, medioambiental y económicamente sostenible”*, en palabras del propio Vittori. La idea es utilizar materiales locales y baratos, y enseñar a los pueblos que lo necesiten cómo montar estas torres, de forma que puedan multiplicarlas según sus necesidades.

El agua se obtiene de condensar el vapor de agua que se encuentra en suspensión en el aire, por lo que está pensado para lugares donde la humedad del aire es notable, como las regiones montañosas o cercanas al mar. Su coste, según ha calculado Vittori, es de, aproximadamente,

¹ El nivel de estrés hídrico se define como la extracción de agua dulce en proporción a los recursos de agua dulce disponibles, es decir, es la razón entre el total de agua dulce extraída por los principales sectores económicos y el total de recursos hídricos renovables, teniendo en cuenta las necesidades ambientales de agua. Este indicador también se conoce como intensidad de extracción de agua y medirá los progresos hacia la meta 6.4 de los ODS (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019).

550 dólares (unos 460 euros). La torre también crea un lugar social para la comunidad, donde las personas pueden reunirse bajo la sombra para la educación y las reuniones públicas (Benavente, 2014).

El sistema se basa sólo en fenómenos naturales como la gravedad, la condensación y la evaporación, y no requiere energía eléctrica. Es una estructura vertical diseñada para recoger agua potable de la atmósfera (recoge lluvia, de niebla y rocío) y dirigirla a un tanque de retención higiénica. Además, su mantenimiento es mínimo y simple, por lo que cualquiera puede hacerlo (EcoInventos, 2020).



Figura 2. Warka Tower.

Fuente: Architecture and Vision.

La torre se compone de un exoesqueleto semirrígido de bambú en la zona exterior, de entre 9 y 10 metros de altura y un diámetro de 8 metros. En el interior se encuentra un tubo enorme fabricado con tela plástica, el cual cuelga y se extiende en tensión para recoger el agua potable desde el aire por condensación. En el suelo, bajo el tubo, se sitúa una gran vasija de barro. Durante el día, las fibras de nailon y polipropileno del plástico sirven como superficie para la condensación del vapor de agua que hay en el aire, y las gotas van resbalando por la lona hasta caer en la vasija. En total pueden llegar a recogerse unos 100 litros al día, aunque la cantidad dependerá de los niveles de humedad de cada lugar (Benavente, 2014).

La estructura se puede construir con herramientas simples por personas no calificadas (los habitantes del pueblo) y sin la ayuda de maquinaria especial. Además, puede ser levantada y fijada al suelo por 4 personas, sin la necesidad de andamiaje. El material utilizado incluye juncos, alambre de hierro, cuerdas de poliéster y tejido de polietileno. La estructura debe fijarse con cables de tensión para estabilizarse en el suelo y resistir los fuertes vientos (Franco, 2014).

El bambú permite colaborar también con la meta 6.3 de los ODS, que pretende mejorar la calidad del agua reduciendo la contaminación y la presencia de productos químicos y materiales peligrosos en ella, reduciendo a la mitad el porcentaje de aguas residuales sin tratar y aumentando considerablemente el reciclado y la reutilización sin riesgos a nivel mundial.

Prueba de ello es el proyecto financiado con fondos europeos BRITER-WATER (*“Market replication of bamboo remediation of food industry effluent grey wáter for re-use”*), en el que se creó con bambú un sistema de tratamiento de aguas grises, es decir, aguas residuales que no contienen sustancias químicas tóxicas o procedentes del alcantarillado.

La industria alimentaria genera un importante volumen de aguas grises cuyo principal contaminante es la materia orgánica que, en un entorno acuático, puede provocar un consumo excesivo de oxígeno que impulsa el crecimiento de microorganismos anóxicos y, en consecuencia, producir malos olores y, en casos extremos, la muerte de los peces. Por ello, el sistema se probó en la fábrica de refrescos *Délicfruits*, en *Valence* (Francia), donde se instaló una

planta de 1500 m², empleando el bambú para depurar los residuos procedentes de la industria alimentaria (CORDIS, 2013).

Frédéric Panfili, director científico del proyecto, explicó que *“El sistema funciona como un filtro vegetal en el que se hace pasar el agua residual a través del suelo de una plantación. En nuestro caso optamos por materiales de filtración arenosos en lugar de tierra corriente, pero el principio es el mismo: el agua residual atraviesa el suelo o el medio de filtración donde microorganismos naturales degradan la materia orgánica”*. Además, el sistema de fitorremediación² es muy similar en apariencia a una plantación de bambú, por lo que no desentona con el paisaje (Residuos Profesional, 2013).

Frédéric Panfili también añadió que *“Se escogió el bambú por su denso sistema de raíces. Es una planta de crecimiento rápido y de las más productivas que existe sobre la superficie terrestre del planeta. Además, es muy resistente y capaz de soportar múltiples factores estresantes medioambientales como falta o exceso de agua e incluso temperaturas extremadamente bajas. La biomasa del bambú posee asimismo múltiples propiedades de interés si se compara con otros tipos de biomasa vegetal, una de ellas su elevado valor térmico. Por tanto, la biomasa producida durante el tratamiento de aguas residuales puede aprovecharse en la misma zona de la plantación como combustible para la calefacción de edificios administrativos o escuelas, por ejemplo”*.

Desde que finalizara el proyecto, se han construido 4 nuevas plantas de tratamiento basadas en el bambú y se está trabajando en la aplicación comercial del filtro Bambou-Assainissement, desarrollado a raíz del éxito del proyecto (RedacciónT21, 2013).

Otro ejemplo es el estudio desarrollado por los científicos de la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA), en conjunto con el Instituto de Botánica Darwinion perteneciente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), en el que se demostró que el biocarbón de bambú *Guadua chacoensis* posee una gran capacidad de absorción de contaminantes en el agua, muy superior a los de los carbones activados que se utilizan en la industria para el mismo fin, especialmente en lo que a la purificación de aguas contaminadas con arsénico se refiere.

El arsénico es un metaloide tóxico que se encuentra naturalmente en algunas aguas subterráneas. El consumo de agua con este contaminante y de alimentos cuyo riego se realiza con estas aguas, puede producir enfermedades, entre ellas, el cáncer. En el estudio se emplearon aguas contaminadas con azul de metileno y arsénico, consiguiendo resultados del 100% de absorción de los dos contaminantes. Las aguas contaminadas con arsénico del estudio contaban con 10 mg/L, es decir, mil veces más de lo que recomienda la Organización Mundial de la Salud (OMS) y, por tanto, más de lo que se encuentra en las aguas en su estado natural (Clarín, 2017).



Figura 3. *Guadua chacoensis* del estudio de FAUBA.
Fuente: Sebastián Tamashiro.

En el estudio se analizó la efectividad de la especie *Guadua chacoensis* en tres estadios (etapa joven, madura y senescente) y la del material de descarte obtenido al cortarla para propiciar el crecimiento de plantas nuevas (**Figura 3**), siendo este último el que mejores propiedades

² El empleo de plantas para eliminar, contener o degradar contaminantes medioambientales en medios hídricos, edáficos o atmosféricos se conoce como fitorremediación (Ambientum, 2018).

demostró tener para la descontaminación de aguas. La *Guadua chacoensis* tiene un bajo coste y un muy rápido crecimiento, por lo que resulta una muy económica opción para la descontaminación de aguas con arsénico.

Los estudios realizados demostraron ser muy eficaces utilizando el biocarbón de bambú, que se obtiene en hornos sin oxígeno, por pirólisis y no requiere de una activación posterior a su obtención (**Figura 4**). Por tanto, es de fácil obtención para las comunidades rurales, ya que sólo es necesario producirlo en hornos de barro, en ausencia de oxígeno, lo que supone un bajo coste (El Horticultor, 2019).



Figura 4. Horno para producir biocarbón de bambú.

Fuente: Salvador Gallaga.

Estos ejemplos demuestran que, además de contribuir con la meta 6.3 (Calidad de agua. Contaminación y Aguas Residuales) de los ODS, el bambú puede integrarse dentro de la meta 6.A (Creación de Capacidades de Gestión), formando parte de los programas relativos a la captación de agua y el tratamiento de aguas residuales.

El ODS 11, Ciudades y Comunidades Sostenibles, pretende asegurar el acceso de todas las personas a viviendas y servicios básicos adecuados, seguros y asequibles y mejorar los barrios marginales, aumentando la urbanización inclusiva y sostenible y la capacidad para la planificación y la gestión participativas, integradas y sostenibles de los asentamientos humanos en todos los países (Naciones Unidas, s.f.).

El mundo cada vez está más urbanizado. Desde 2007, más de la mitad de la población mundial ha estado viviendo en ciudades, y se espera que la cantidad aumente hasta el 60 % para 2030. Las ciudades y las áreas metropolitanas son centros neurálgicos del crecimiento económico, ya que contribuyen al 60 % aproximadamente del PIB mundial. Sin embargo, también representan alrededor del 70 % de las emisiones de carbono mundiales y más del 60 % del uso de recursos. La rápida urbanización está dando como resultado un número creciente de habitantes en barrios pobres, infraestructuras y servicios inadecuados y sobrecargados (como la recogida de residuos y los sistemas de agua y saneamiento, carreteras y transporte), lo que está empeorando la contaminación del aire y el crecimiento urbano incontrolado (Naciones Unidas, s.f.).

En respuesta a este problema, el bambú se presenta como un material de construcción alternativo y sostenible que permite la construcción de todo tipo de viviendas, respetuosas con el medio ambiente y con prestaciones que garantizan la seguridad y comodidad de los usuarios.

Un ejemplo perfecto es la “Torre de Bambú” (**Figura 5**) diseñada por el arquitecto Carlos R. Gómez, director del despacho barcelonés CGR Architects, y construida en Singapur. Se trata de un conjunto de edificios que se agrupan y se elevan hacia el cielo como si de un bosque de bambú se tratase, y que crece como una entidad natural a gran escala definiéndose como un pueblo sostenible de gran altura respetuoso con el medio ambiente. La propuesta, terminada en 2014 y seleccionada recientemente entre los finalistas del *World Architecture Festival Awards* (WAF) en la



Figura 5. Torre de Bambú de Carlos R. Gómez

Fuente: CGR Architects

categoría “Proyectos de Futuro”, engloba un programa mixto de 247,806.50 m² que se eleva hasta los 200 metros de altura y que está compuesto por oficinas, viviendas, hoteles y zonas recreativas envueltas por un espacio público (Vendrell Felici, 2015).

El proyecto está marcado por una gran apuesta por los materiales de construcción alternativos y sostenibles, combinados con los elementos estructurales propios de nuestra época (**Figura 6**). De este modo, trabaja un sistema constructivo basado en el bambú y articulado mediante un sistema de nudos de acero inoxidable. Este sistema combina la naturalidad del bambú con la precisión y la potencia estructural del acero inoxidable, creando una estética única de pureza y belleza que se une al ETFE (etileno tetrafluoroetileno) como elemento de cerramiento de fachadas, un material de grandes prestaciones en cuando a resistencia a la corrosión y a las altas temperaturas (Vendrell Felici, 2015).

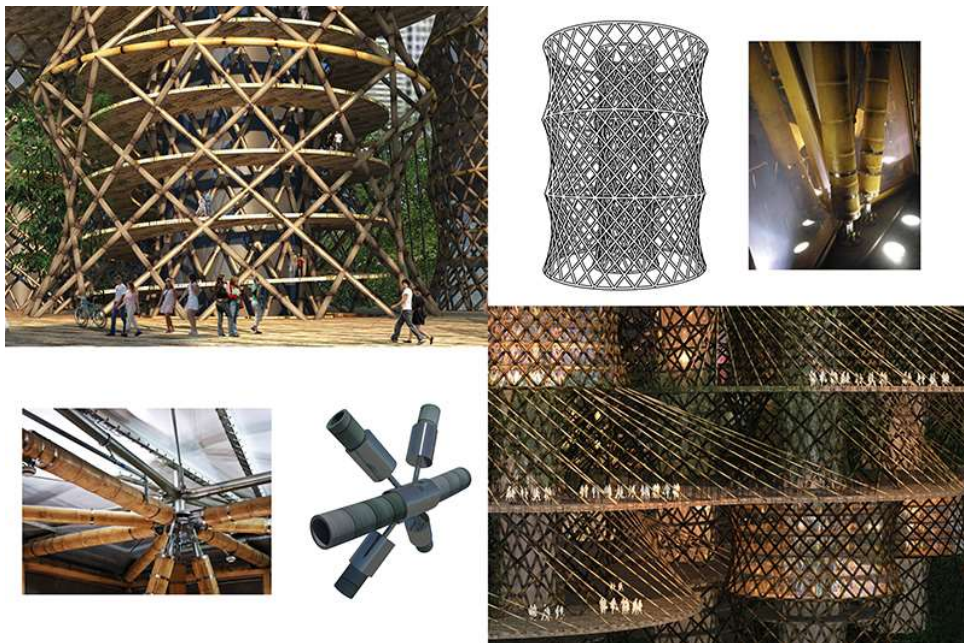


Figura 6. Detalles de la Torre de Bambú del arquitecto Carlos R. Gómez
Fuente: CGR Architects

Otro proyecto similar, pero que aún no se ha llevado a cabo, es el propuesto por el estudio *Penda China Architects*, que pretende crear una ciudad sostenible capaz de albergar hasta 20000 personas (**Figura 7**). Para ello, el estudio ha desarrollado un innovador diseño denominado “*Rising Canes*”, un sistema estructural diseñado a partir de bambú y cuerdas. Si bien este sistema aún no está reconocido por las normas vigentes de construcción, el estudio está tratando de conseguir su inclusión en la normativa, lo que lo convertiría en una alternativa viable de construcción (EcolInventos, 2015).

En una entrevista, Sun Dayong, fundador y arquitecto jefe de *Penda China Architects*, dijo: “*El estado actual de irresponsabilidad en la planificación de las ciudades hace que nuestra profesión deba replantearse los procesos constructivos. Es necesario el uso de materiales naturales como el bambú, vinculado a un sistema modular inteligente, para construir de manera sabia y tener la libertad de crecer en cualquier dirección*”.

Pero el bambú no sólo sirve para construir edificios sostenibles, sino que también contribuye a hacer de las ciudades un lugar más limpio de una forma totalmente natural.



Figura 7. Ciudad de bambú de Penda China Architects
Fuente: Penda China Architects

Ejemplo de ello es la torre de refrigeración adiabática de bambú (**Figura 8**) diseñada y fabricada por la firma francesa multidisciplinaria *Afrancamente Research Poles of Exchange* (AREP). El estudio desarrolló un prototipo de bambú de baja tecnología para lograr un sistema de enfriamiento urbano alternativo. Utilizando lo que se conoce como el principio de enfriamiento adiabático³, el proyecto propone una solución eficaz y asequible para enfriar las ciudades de manera sostenible. El sistema es simple, pero funcional: entre los polos principales se instala un medio en el que el agua fluye por gravedad. En su centro está instalado un soplador que toma aire caliente desde arriba y lo empuja hacia abajo hasta la altura de un hombre. Al cruzar el agua dos veces, el aire se enfría naturalmente mediante el principio adiabático (EcoHabitar, s.f.b).

El proyecto se probó por primera vez en Vietnam, donde hace calor y hay agua. El trabajo involucró a familias locales, vinculadas a las artes y la artesanía, para construir una torre de bambú a gran escala en la ciudad. Los propios artesanos fueron los responsables de construir la estructura de bambú hiperboloide, que permite crear estructuras más fuertes utilizando menos materiales. *“Pudimos crear un dispositivo funcional, demostrando la viabilidad de un dispositivo conceptual sostenible, low-tech y de bajo costo para enfriar los espacios exteriores de la ciudad de Hanoi. El día de la prueba, logramos bajar la temperatura en 6°C (de 30°C a 24°C), lo que demostró la viabilidad del diseño y marcó una gran diferencia en la comodidad al aire libre, ya que realmente se podía sentir un aire más fresco alrededor del dispositivo”* cuentan los miembros del equipo (Jankac, 2021).

El proyecto fue galardonado en la Bienal de Arquitectura y Urbanismo de Seúl 2021 (SBAU2021), lo que motivó aún más a AREP, cuya ambición ahora es implementar esta solución sostenible, de baja tecnología y bajo costo en climas más secos (por ejemplo, alrededor de la cuenca mediterránea), donde el enfriamiento podría ser aún más eficiente. Durante los veranos secos y calurosos, el concepto propuesto podría ser ideal para enfriar espacios al aire libre como plazas públicas, calles peatonales soleadas y grandes edificios y estructuras como estaciones de tren (EcoInventos, 2021).

³ En palabras del equipo de AREP: *“El enfriamiento adiabático es una técnica sostenible que no requiere ningún gas refrigerante. Se basa en un principio simple y natural: para evaporarse, el agua necesita energía, que será absorbida del calor del aire ambiente, generando un efecto de enfriamiento. Los únicos elementos necesarios son aire caliente y agua”*.



Figura 8. Torre de refrigeración adiabática de AREP
Fuente: AREP

Como demuestran los proyectos expuestos, el bambú puede contribuir a la consecución del ODS 11 si se aprovechan de forma inteligente sus propiedades, características y beneficios. Es por este motivo que es fundamental incrementar la investigación sobre este material ecológico, natural y sostenible que tanto bien puede hacer a las ciudades y comunidades.

A través del ODS 13, Acción por el Clima, se insta a adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos mediante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, la adaptación a los impactos del cambio climático y la creación de las bases de una economía neutra en emisiones, siendo la agricultura, el turismo, el agua y la energía los sectores más vulnerables a los impactos del cambio climático.

Gracias al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático se tiene constancia de que, entre 1880 y 2012, la temperatura media mundial aumentó 0.85°C. Dada la actual concentración y las continuas emisiones de gases de efecto invernadero, es probable que a finales de siglo el incremento de la temperatura mundial supere los 1.5°C en comparación con el período comprendido entre 1850 y 1900. No obstante, si se adopta una amplia gama de medidas tecnológicas y cambios en el comportamiento, aún es posible limitar el aumento de la temperatura media mundial a 2°C por encima de los niveles preindustriales

Los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y de hielo ha disminuido, y ha subido el nivel del mar. Entre 1901 y 2010, el nivel medio del mar aumentó 19 cm. Además, la extensión del hielo marino del Ártico se ha reducido desde 1979, con una pérdida de hielo de 1.07 millones de km² cada decenio. Los océanos del mundo seguirán calentándose y continuará el deshielo, por lo que se prevé una elevación media del nivel del mar de entre 24 y 30 cm para 2065 y entre 40 y 63 cm para 2100.

Las emisiones mundiales de dióxido de carbono (CO₂) han aumentado casi un 50% desde 1990. Entre los años 2000 y 2010 se produjo un incremento de las emisiones mayor que en las tres décadas anteriores (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018).

El bambú puede contribuir a la consecución del ODS 13, Acción por el Clima, según el documento titulado «Bambú y Mitigación del Cambio Climático», presentado por la Organización

Internacional del Bambú y Ratán (INBAR) durante la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP16), en Cancún (México). Este documento fue elaborado después de un estudio que duró un año y que se basa en investigaciones sobre la retención de carbono que se produce mientras crecen los bosques de bambú y la comparación con otras especies de árboles.

El estudio demostró que los bosques de bambú, en los primeros diez años después de la siembra, tienen tanta capacidad de absorber y retener carbono como otras especies de árboles de crecimiento rápido, como el eucalipto y el pino chino. Además, los bosques de bambú se pueden cosechar selectivamente todos los años (Sanz, 2010). Esto se debe a que no sólo el tamaño de la planta repercute en su capacidad de absorción del CO₂, sino que la rapidez de crecimiento también determina cuánto podrá absorber en un periodo de tiempo determinado. En este sentido, el bambú gana a todas las demás: crece más rápidamente que los árboles, hasta 1.20 metros al día. De hecho, el bambú tiene el récord mundial como la planta que crece más rápidamente (Li, 2013).

Numerosos estudios realizados en distintos países del mundo han analizado cuantitativamente la efectividad de determinadas especies de bambú como secuestradoras de CO₂. En Bolivia, por ejemplo, miembros de la Universidad Nuestra Señora de la Paz estudiaron la *Guadua angustifolia*, una especie que crece en el Parque Nacional Carrasco. Midieron la densidad y masa de las plantas de bambú en el bosque para estimar la cantidad almacenada en cada hectárea, concluyendo que, además de formar parte de uno de los ecosistemas más diversos del mundo, cada hectárea del bosque de bambú en el Parque Nacional Carrasco almacena una cantidad de carbono semejante a una especie de árboles grandes, como el abeto chino o el roble (Rojas Quiroga, *et al.*, 2013).

Otro estudio que lo corrobora es el desarrollado en China con la especie *Bambú Moso*. La investigación demostró que una hectárea (más o menos el tamaño de una pista de atletismo) de esta especie puede guardar hasta 250 toneladas de CO₂ (Qi, *et al.*, 2009). Por lo tanto, cada año, una hectárea de esta especie absorbe 5.1 toneladas de carbono, lo que puede compensar las emisiones de CO₂ de tres habitantes de China, o de un habitante de los Estados Unidos. Cabe señalar que, según la Administración Estatal de Bosques de China, el país cuenta con 3.37 millones de hectáreas de esta especie, lo que sobrepasa el 3% del área total de bosques de China (Li, 2013).

Contando con el resto de especies de bambú existentes en China, se puede concluir que grandes cantidades de carbono se almacenan en los bosques de bambú de China, los más grandes del mundo, y el total aumentará a medida que se expandan los programas de reforestación planificados. Se prevé que el carbono almacenado en los bosques de bambú chinos aumente de 727 millones de toneladas en 2010 a 1018 millones de toneladas en 2050. A nivel global, con un estimado de 30 millones de hectáreas en los trópicos de África, Asia y América, se calcula que el bambú puede proporcionar una contribución significativa para combatir el cambio climático en el mundo en desarrollo, particularmente en las comunidades rurales (INBAR, 2020a).

Los muchos productos duraderos hechos de bambú, también pueden ser potencialmente positivos en la lucha contra el carbono, ya que actúan como sumideros de carbono encerrados en sí mismos y fomentan la expansión y la mejor gestión de los bosques de bambú. A esto se suma que, en un informe de 2015 de la Universidad Técnica de Delft, INBAR y la empresa Moso International B.V., se afirma que el bambú también podría ser un sustituto favorable de las maderas duras, incluso de las certificadas por el *Forest Stewardship Council* (FSC), dada su menor huella de carbono y menores costos ecológicos (INBAR, 2020a).



Figura 9. Vivienda de bambú capaz de absorber CO₂ diseñada por Francisco Gallo. Fuente: BambHaus.

Por ello, desde INBAR se quiere invertir en la producción de alta calidad de productos de bambú para optimizar y prolongar el almacenamiento de carbono, que sólo se produce cuando los materiales como el bambú se usan en productos con largos ciclos de vida, como materiales de construcción o muebles (Sanz, 2010).

Como ejemplo de ello encontramos el proyecto ganador del premio 2008 de la Fundación Altran para la Innovación: la vivienda de bambú capaz de absorber CO₂ diseñada por Francisco Gallo (**Figura 9**). Este proyecto pretende edificar viviendas sostenibles rápidamente y crear una nueva fuente de negocio para los países productores subdesarrollados (Efe, 2009). El sistema supone la transformación de la caña de bambú en un material moldeable con el que construir elementos prefabricados modulares que permitan el levantamiento de edificios con gran rapidez (Efe, 2009).

El ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres, pretende gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad. Los problemas ambientales globales, especialmente el cambio climático y la desertificación, así como los riesgos asociados a ellos, ejercen una presión adicional sobre los recursos naturales y en concreto sobre la biodiversidad terrestre.

Los bosques y montes constituyen un elemento fundamental para el desarrollo económico y social, la protección del medio ambiente y el mantenimiento de servicios ecosistémicos, con especial incidencia en las zonas rurales. Alrededor de 1600 millones de personas dependen de los bosques para su sustento, incluidos 70 millones de personas indígenas. Además, los bosques albergan a más del 80% de todas las especies terrestres de animales, plantas e insectos. Entre 2010 y 2015, el mundo perdió 3.3 millones de hectáreas de áreas forestales.

En el mundo, 2600 millones de personas dependen directamente de la agricultura, pero el 52% de la tierra utilizada para la agricultura se ve moderada o severamente afectada por la degradación del suelo. La pérdida de tierras cultivables se estima en 30 a 35 veces la tasa histórica debido a la sequía y la desertificación, lo que significa que se pierden 12 millones de hectáreas cada año (23 hectáreas por minuto).

Es un área prioritaria la investigación destinada a mejorar la comprensión y el funcionamiento de los ecosistemas, su interacción con los sistemas socio-económicos, así como la destinada al análisis de problemas emergentes, incluyendo la adaptación de especies y ecosistemas al cambio climático. En este sentido, de las más de 80000 especies de árboles existentes, se han estudiado menos del 1% para su posible uso en relación a la consecución de este objetivo (Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018).

En relación al ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres, cabe señalar que la degradación de los ecosistemas implica la pérdida a largo plazo de funciones y productividad, por causa de disturbios de los que no se pueden recuperar sin asistencia humana (Bai, *et al.*, 2008). En este sentido, el bambú se presenta como una herramienta fundamental para luchar contra la desertificación y la degradación de las tierras.

Como bien señaló Hans Friederich, director general de la Organización Internacional del Bambú y Ratán (INBAR) en el año 2018, *“Las 1640 especies de bambú tienen un sólido sistema de raíces que las agarran al suelo; son las plantas de crecimiento más rápido, lo que las convierte en las mejores para recuperar tierras cultivables no productivas, controlar la erosión y mantener la estabilidad del suelo”*. Por ello, el llamado “acero vegetal” es un recurso estratégico que muchos países utilizan para recuperar el suelo y revertir los peligros de la desertificación (Jena, 2018).

La restauración ecológica se define como una actividad deliberada que inicia o acelera la recuperación de un ecosistema respecto a su salud, integridad y funcionalidad (Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004), pero es necesario incluir el componente social para que los procesos de restauración permanezcan a largo plazo y favorezcan a las poblaciones que dependen de ellos. Estos servicios ambientales hacen referencia a todos los beneficios que las poblaciones humanas reciben de los ecosistemas y que tienen un impacto en su bienestar y calidad de vida (Whelan, *et al.*, 2008).

El bambú es parte integral de muchos ecosistemas naturales y agrícolas en y cerca de los trópicos. Es útil para restaurar tierras degradadas por varias razones: prospera en suelos problemáticos y pendientes empinadas que no son adecuadas para otros cultivos, es un cortaviento efectivo y sus robustos rizomas y raíces regulan los flujos de agua y evitan la erosión (INBAR, 2020a). Asimismo, puede desarrollarse en ecosistemas pobres, erosionados y suelos contaminados. Además, sobrevive a altas temperaturas y, tras su adaptación al terreno, después de dos años de ser plantado, crece sin necesidad de riego (Volterra, 2020).

Su rápido crecimiento es una ventaja en proyectos de restauración, especialmente en áreas degradadas donde se necesite generar cobertura vegetal y recuperar productividad rápidamente (Rebelo & Buckingham, 2015). El bambú puede mejorar rápidamente las condiciones abióticas de los terrenos degradados, lo que favorece la restauración de los ecosistemas a corto plazo (Mishra, *et al.*, 2014). Además, su elevada altura hace que sirva de protección contra el viento, disminuyendo el impacto que éste causa en el territorio, protegiendo los cultivos que crecen a su alrededor y disminuyendo la evapotranspiración del agua del suelo (Volterra, 2020). El bambú también puede ser empleado como alternativa a la explotación tradicional de maderas, ya que provee de un recurso leñoso rápidamente, lo que permite reducir la presión sobre otros ecosistemas forestales (Laestadius, *et al.*, 2011).

Otra de las características más valiosas del bambú en lo que a la lucha contra la erosión del suelo se refiere es su extenso y complejo sistema de raíces (**Figura 10**). Éstas son fibrosas y están conectadas entre sí por un sistema de rizomas que retiene el suelo y previene que sea arrastrado por corrientes de agua (Ben-Zhi, *et al.*, 2005). Por tanto, el bambú podría ser una opción efectiva para evitar deslizamientos en zonas susceptibles, como laderas, y reducir el impacto de las inundaciones en las márgenes de ríos o cuerpos de agua (FAO & INBAR, 2018), al actuar como una barrera natural y contar con una elevada capacidad de retención del agua (Volterra, 2020).



Figura 10. Sistema de raíces del bambú.



Figura 11. Hojarasca del bambú.
Fuente: Dreamstime.

También es reseñable el gran aporte de biomasa que realiza el bambú, pues ésta contribuye significativamente a la restauración de la productividad del suelo, ya que aumenta la materia orgánica, que es esencial para la disponibilidad de nutrientes (Toledo-Bruno, *et al.*, 2017). Debido a su alto contenido de silicio, la tasa de descomposición de la hojarasca del bambú (**Figura 11**) es relativamente lenta (Liu, *et al.*, 2000), lo que, además de aportar nutrientes, permite su acumulación y la formación de un mantillo acolchado que ayuda a conservar la humedad del suelo, aumenta su permeabilidad y minimiza el escurrimiento superficial y la erosión (Christanty, *et al.*, 1996).

Estas características demuestran que el bambú es una alternativa viable para recuperar los ecosistemas degradados (Rebelo & Buckingham, 2015), especialmente a través de la restauración productiva que utiliza técnicas agroforestales y agroecológicas (Ceccon, 2013). La agroforestería con bambú puede ser relevante y suponer un aumento de la productividad, sustentabilidad y conservación de los recursos (Tewari, *et al.*, 2016). Algunas especies de bambú pueden integrarse en un sistema agrícola con un modelo de franjas intercaladas con cultivos, lo que favorecería especialmente los terrenos inclinados (Behari, *et al.*, 2000). Establecer sistemas agroforestales con bambú podría incrementar los servicios ambientales de polinización y control de plagas, lo que aumentaría la sustentabilidad económica del sistema. Además, la presencia de bambú también puede mejorar las condiciones microclimáticas y favorecer los cultivos que son más susceptibles de ser afectados por eventos climáticos adversos (Fu, *et al.*, 2000).

El bambú puede mejorar las condiciones microclimáticas por medio de la estabilización de la humedad y temperatura, lo que proporciona un ambiente beneficioso para numerosos insectos, aves y mamíferos (Abhilash, 2016). A nivel paisajístico, los cultivos de bambú pueden servir como puntos de conexión y corredores biológicos entre fragmentos de remanentes de bosques, sirviendo como posaderos naturales para pájaros y escondites para pequeños vertebrados (Falcý & Estados, 2007). Además, los culmos secos pueden emplearse para favorecer la dispersión de semillas, acelerando la repoblación e incrementando la diversidad vegetal en el área de restauración (Athiê & Dias, 2016).

Las características descritas permiten concluir que el bambú posee un gran potencial para ser empleado en proyectos de restauración productiva y para la recuperación de servicios ambientales y ecosistemas en áreas degradadas, tal y como pretende el ODS 15, Vida de Ecosistemas Terrestres.

Existen numerosos ejemplos de proyectos en los que ya se está empleando y que demuestran que el bambú desempeña un papel decisivo en el restablecimiento de las funciones y dinámicas de los ecosistemas degradados. En China, los sistemas agroforestales combinan el bambú con té, coníferas, árboles maderables, cultivos agrícolas y plantas medicinales (Fu, *et al.*, 2000). En México se ha implementado el uso de la especie *Bambusa oldhamii* para proveer sombra a los cafetales, empleando una distancia entre plantas de 10 metros (Pérez García, *et al.*, 2009). En Allahabad, India, se empleó el bambú para recuperar 4000 hectáreas de tierra degradada, recuperando el contenido de carbono del terreno, neutralizando la alcalinidad excesiva y aumentando el contenido de micronutrientes como el boro y el cinc (INBAR, 2014). En el año 2018, INBAR publicó un informe sobre los beneficios del bambú para la restauración de tierras en ocho países: China, Colombia, Ghana, India, Nepal, Sudáfrica, Tanzania y Tailandia (INBAR, 2019b).

Además de con el ODS 6, el ODS 11, el ODS 13 y el ODS 15, el bambú contribuye también con otros ODS.

INBAR defiende que el bambú puede desempeñar un papel muy importante en la reducción de la vulnerabilidad de los países en desarrollo a los efectos del cambio climático, al tiempo que les proporciona una fuente fiable y sostenible de ingresos (Sanz, 2010).

Numerosos proyectos se centran en proporcionar a las poblaciones más desfavorecidas viviendas y edificaciones de bajo coste realizadas principalmente con bambú. Ejemplo de ello es el proyecto “Casas elevadas de bambú para proteger a las comunidades de las zonas de inundación”, desarrollado por INBAR y la Corporación Hogar de Cristo en Guayaquil (Ecuador), que ha mejorado las condiciones de vida de varias familias del sector marginal de Monte Sinaí gracias a la construcción de dos refugios, tres aulas escolares y cinco casas, empleando para ello *Guadua angustifolia*, una especie de bambú nativa de Ecuador (**Figura 12**).



Figura 12. Casa modelo del proyecto de INBAR y la Corporación Hogar de Cristo en Guayaquil (Ecuador).
Fuente: INBAR.

Estas edificaciones representan una nueva forma de vida para los beneficiarios y pretenden proveer a los habitantes de una vivienda digna y segura en la que no se vean afectados por las torrenciales precipitaciones características de la temporada de lluvia y en las que puedan contar con temperaturas y niveles de humedad estables (Banco Mundial, 2013).

Igualmente, el ingeniero filipino Earl Forlales ideó y diseñó una sencilla casa de bambú, barata y que se construye en sólo unas horas (**Figura 13**). Su idea fue bautizada como CUBO y en 2018 ganó el premio internacional Ciudades del Futuro que entrega la *Royal Institution of Chartered Surveyors* (RICS) de Londres. CUBO fue creado con la intención de ofrecer una vivienda digna, asequible y sostenible a los millones de habitantes de Manila que habitan en suburbios o asentamientos ilegales (Caballar, 2020).

"CUBO es una solución simple a un problema urgente. No sólo para Manila, sino que se puede extrapolar a otras ciudades que también padecen superpoblación y pobreza en Asia, América Latina o África, donde se cultiva bambú", explicó Forlales. La ventaja de CUBO es que una unidad de 14 m² se puede levantar en 4 horas y una comunidad completa para dar cobijo a decenas de



Figura 13. CUBO, casa de bambú diseñada por Earl Forlales.
Fuente: Rina Diane Caballar.

familias de bajos ingresos estaría lista en unos días. El secreto del bajo coste reside en el bambú, que crece fácil y rápidamente y que cuenta con una gran resistencia, ya que el bambú laminado que se usa en CUBO incrementa su vida útil hasta 10 años y puede resistir con un mínimo mantenimiento más de medio siglo, según Forlales. El coste de CUBO por metro cuadrado es de unos 300 dólares estadounidenses, lo que permite que los alquileres sean accesibles a las familias de bajos ingresos (Obras por Expansión, 2018), ya que la renta per cápita (PIB) de Filipinas en 2018, año en que se desarrolló CUBO, era de 3.252,11 dólares estadounidenses, cifra que ha aumentado en los años posteriores.

Estos proyectos reflejan cómo el bambú puede contribuir a mejorar la salud y bienestar (ODS 3), pues no sólo absorbe una gran cantidad de CO₂ del ambiente, sino que proporciona a las familias

más desfavorecidas una vivienda digna a un precio muy asequible. Del mismo modo, aunque de una forma mucho más indirecta, el bambú también contribuye a proporcionar una educación de calidad (ODS 4) pues, aunque no repercute directamente en la educación, sí que permite que los niños y niñas disponga de edificios seguros y saludables fabricados con bambú en los que desarrollar sus estudios adecuadamente.

Por otra parte, el cultivo y la explotación del bambú puede servir como herramienta para otorgar trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8) a los habitantes y zonas geográficas en que se desarrolla, favoreciendo con ello el desarrollo de la industria, la innovación y las infraestructuras (ODS 9).

La Fundación Comercio para el Desarrollo (COPADE)⁴ defiende la necesidad de un modelo económico sostenible tanto para la sociedad como para el medioambiente y basado en el Comercio Justo. Para ello, trabaja con comunidades de productores tanto de países con economías primarias como desarrollados, para promover estructuras socioeconómicas sostenibles y respetuosas con el medioambiente, que hagan a estos grupos protagonistas de su propio desarrollo (Diario Siglo XXI, 2020).

Muestra de ello es el proyecto "Fomentar la sostenibilidad de emprendimientos forestales con balsa y bambú de pequeños productores de Manabí y Esmeraldas para mejorar sus ingresos familiares" que están desarrollando actualmente. Esta iniciativa tiene como objetivo impulsar la sostenibilidad y productividad de emprendimientos agroforestales de Ecuador, promoviendo buenas prácticas en todos los eslabones de la cadena forestal del bambú para aumentar los ingresos de las familias productoras y lograr que estos productos cumplan con estándares de calidad y tengan potencial demanda en el mercado internacional, especialmente en España (RoiPress, 2020).

El proyecto cuenta con unos 400 beneficiarios directos e incluye un plan de mejora de sus prácticas agrícolas con miras a la certificación, un fortalecimiento de sus capacidades de negociación con empresas y proveedores y un programa de formación de capacidades de dirección, administración y gestión de las organizaciones. El proyecto, con una duración de 24 meses y subvencionado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), busca además aportar con pequeño equipamiento a las organizaciones para mejorar su proceso de transformación mediante diferentes iniciativas empresariales. Finalmente, se persigue posicionar el catálogo de productos en el mercado internacional y, en especial español, a través de una estrategia de *marketing online* y la participación en ferias por parte de los productores ecuatorianos (Comunicae, 2020).

Otro proyecto que COPADE ha desarrollado en Ecuador es "Generando alternativas económicas sostenibles para la zona de amortiguamiento de la reserva Mache Chindul". Esta iniciativa nació con el objetivo de promover la producción de bambú como alternativa para generar ingresos dentro del sector de la construcción sostenible y reducir la deforestación (Europa Press, 2020).

Para ello, se desarrolló un programa de capacitación y manejo sostenible del bambú, con el objetivo de dar a conocer y promover sus ventajas como eje dinamizador de la economía y generar conocimiento, tanto teórico como práctico, a lo largo de toda la cadena de valor. Entre los principales resultados se logró un total de 937 participantes, 423 horas de entrenamiento teórico-práctico y 16 procesos de réplica posteriores en varias localidades (Diario Siglo XXI, 2020).

⁴ La Fundación Comercio para el Desarrollo (COPADE) es una ONG involucrada en el Comercio Justo y la Madera FSC, que apoya alianzas público-privadas.

Con este proyecto se logró beneficiar a 640 familias y se plantaron 16 hectáreas de bosque lineal de bambú. Además, la Universidad Laica Eloy Alfaro, lideró posteriormente un proceso de siembra de 4 hectáreas adicionales. La participación de la mujer fue del 40% a lo largo de todo el proyecto y se centró en la elaboración de cestería de bambú. El proyecto logró, además, de manera indirecta, posicionar a las asociaciones de productores que tienen oferta de bambú de calidad y conectarlas con la demanda local, así como fomentar su contratación para otros proyectos (Comunicae, 2020).

Pero la aportación del bambú va más allá, ya que esta planta ayuda a evitar el uso de combustibles fósiles y reduce la deforestación, al ofrecer una fuente alternativa de energía de biomasa altamente renovable (**Figura 14**). El bambú puede proporcionar una fuente sostenible de bioenergía para las muchas personas que dependen de la biomasa sólida para cocinar y también se puede convertir en gas o gránulos (*pellets*), para proporcionar una fuente de electricidad y calefacción. Además, dado que vuelve a crecer rápidamente y madura más rápido que la mayoría de los tipos de árboles, el bambú puede aliviar la presión de otros recursos forestales, reduciendo la deforestación, y, dado que se puede cultivar en tierras marginales, no necesita competir con áreas agrícolas productivas.

El carbón y el gas de bambú tienen un valor calorífico similar a las formas de bioenergía comúnmente utilizadas. Una comunidad de 250 hogares requiere sólo 180 kilogramos de bambú seco para generar la electricidad que consume durante 6 horas. Por otra parte, en lugares como la Unión Europea (UE), el bambú se puede convertir en *pellets* que generen electricidad o calefacción, contribuyendo a los objetivos de energía renovable (INBAR, 2020a).



Figura 14. Productos derivados del bambú. Izquierda: Pellets. Centro: Carbón. Derecha: Papel higiénico.
Fuente: Ynidyi Enterprise CO., LTD. (Izquierda) / Bambú Gigante (Centro) / Caboo (Derecha).

De hecho, con la intención de solucionar la situación de pobreza y marginalidad existente y contribuir a la producción de energía asequible no contaminante, Honduras inició un proyecto para generar 50 megavatios de electricidad y 300 toneladas diarias de pulpa de papel a partir de bambú, para lo que se sembraron 200.000 plantas en el Valle de Sula, en terrenos propiedad de numerosas cooperativas campesinas. El objetivo era emplear el bambú como fuente de biomasa con la que generar energía eléctrica y pulpa de papel con las que fabricar cajas de cartón. Además, en una fase más avanzada del proyecto, se comenzaron a fabricar productos de construcción usando bambú como materia prima. Se estima que el proyecto generó 3600 empleos directos en el cultivo y cosecha de bambú, las dos fábricas y la producción de materiales (Franquis & Infante Cruz, 2003).

El ejemplo de Honduras demuestra que el bambú puede proporcionar energía asequible y no contaminante (ODS 7), a la vez que contribuye a lograr el fin de la pobreza (ODS 1) y, como ya

se ha mencionado, otorga trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8) a los habitantes y zonas geográficas en que se cultiva y explota el bambú, favoreciendo con ello el desarrollo de la industria, la innovación y las infraestructuras (ODS 9).

Pero esto último, queda más patente al tomar en consideración que, en China, los habitantes de la provincia de Cantón, de la provincia de Jiangsu y del Condado de Longzhou, obtienen ingresos principalmente mediante el tejido de cestas con bambú (**Figura 15**). El ejemplo más claro se encuentra en la ciudad montañosa de Xinyi, en la que existen unas 700 empresas encargadas del negocio del tejido con bambú, lo que supone alrededor de 250.000 personas involucradas en el proceso.



Figura 15. Mujer tejiendo una cesta de bambú en China.

Fuente: iStockphoto.

Se ha reemplazado el viejo estilo descentralizado de producción, que era conducido por un sólo productor, por el modelo de producción llamado “Productores + Empresas”. En este modelo, las empresas organizan a los productores del campo para llevar a cabo el procesamiento de los productos base. Después de esto, las empresas compran los productos de los productores para rematar el proceso y acabado de los productos. Este modelo puede ayudar a la gente local a entrar al mercado internacional gracias a la industrialización. Por otra parte, para aumentar el desarrollo del bambú, los gobiernos locales apoyan a las empresas al reducir las tarifas de electricidad y los impuestos por el uso de la tierra y darles beneficios por emplear internet para aumentar la comercialización (Franquis & Infante Cruz, 2003).

Por todo lo visto hasta ahora, se puede concluir también que el bambú favorece la reducción de las desigualdades (ODS 10), propósito que va de la mano con el objetivo de obtener la igualdad de género (ODS 5), al que colaboran diversos proyectos relacionados con el bambú.

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), las mujeres representan el 70% de las personas pobres en el mundo.

La “*Ghana Bamboo Bikes Initiative*” (“Iniciativa de Bicicletas de bambú de Ghana”), ideada por Bernice Dapaah, pretende hacer frente a la desigualdad de género, a la pobreza, al cambio climático y al desempleo juvenil en ese país. El proyecto, que comenzó en el año 2008, cultiva plantaciones de bambú en Kumasi (una ciudad al sur de Ghana) para fabricar bicicletas rentables, robustas y respetuosas con el medio ambiente (**Figura 16**).



Figura 16. “*Ghana Bamboo Bikes Initiative*”. Izquierda: Bernice Dapaah con una bicicleta de bambú. Centro: Mujeres fabricando una bicicleta de bambú. Derecha: Almacén de materiales con los que se fabrican las bicicletas de bambú.

Fuente: El Ágora (Izquierda) / EcoInventos (Centro y Derecha).

Este proyecto ayuda a poner en valor a las jóvenes ghanesas, pues todas las trabajadoras responsables del montaje de las bicicletas son mujeres, mientras que los encargados del cultivo del bambú son jóvenes. “*Nuestra iniciativa también ayuda a unir el crecimiento inclusivo y el*

equilibrio de género al ofrecer igualdad de oportunidades de empleo a los jóvenes en Ghana”, afirma Dapaah (Faraday, 2019).

“Se trata de un proyecto social, además de empresarial, porque damos trabajo a mujeres y jóvenes tanto con formación como sin ella. De hecho, tenemos una escuela para que los jóvenes puedan formarse y desarrollar su propio negocio” (ABC, 2017). El objetivo de esta empresa social no es sólo proporcionar capacitación y empleos a nivel local, sino también mejorar las condiciones de vida de la población. De hecho, el 10% de las bicicletas fabricadas se ofrecen a los niños que viven en aldeas remotas, para permitirles recorrer más rápidamente los kilómetros que los separan de la escuela (Faraday, 2019).

Esta actividad ha supuesto la creación de puestos de trabajo en varias comunidades rurales de Ghana. Además, ha conseguido que se transfiera dicha tecnología y sus responsables dialogan en la actualidad con inversores y entidades financieras potenciales para ampliar el proyecto (ABC, 2017). Actualmente, se encuentran desarrollando prototipos de bicicletas con energía solar e investigando la posibilidad de generar electricidad por biomasa de bambú para proporcionar electricidad a las zonas rurales de Ghana (Faraday, 2019).

Del mismo modo, en Guatemala existe un programa para mujeres agrícolas en el municipio de San Andrés Itzapa, que promueve la plantación de bambú y otros árboles para capturar CO₂ y desarrollar técnicas agrícolas. La iniciativa también construye estufas de ladrillo eficientes que reducen el impacto negativo en la salud de la inhalación de humo, así como la necesidad de talar árboles para combustible (Rodríguez, 2013).

Con todo lo analizado, se puede determinar que el bambú contribuye de manera positiva a casi todos los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030 pues, como se ha descrito, contribuye favorablemente a la acción por el clima (ODS 13), lo que repercute directamente en la vida de ecosistemas terrestres (ODS 15) y en la vida submarina (ODS 14), así como en el salud y bienestar (ODS 3) y en la obtención de agua limpia y saneamiento (ODS 6), debido a su gran capacidad de absorción de CO₂ y su competencia para limpiar las aguas contaminadas y recuperar los terrenos degradados.

Además, los proyectos numerosos proyectos desarrollados en distintos países favorecen la consecución de trabajo decente y crecimiento económico (ODS 8), así como educación de calidad (ODS 4) para los miembros de las comunidades más desfavorecidas, lo que contribuye a lograr la reducción de las desigualdades (ODS 10), la igualdad de género (ODS 5), el fin de la pobreza (ODS 1) y el hambre cero (ODS 2).

Sumado a todo esto, se encuentra la implementación del bambú en proyectos de obtención de energía asequible y no contaminante (ODS 7) y el progreso de la industria, innovación e infraestructura (ODS 9) asociado al desarrollo de cada uno de las iniciativas que se están llevando a cabo. Por último, el bambú, implementado adecuadamente, puede colaborar a alcanzar la meta de que la producción y el consumo sean responsables (ODS 12).

Como conclusión, se puede determinar que el bambú es un recurso versátil y rápidamente renovable, con una amplia gama de aplicaciones que incluye más de 10.000 usos documentados, desde muebles y papel hasta telas, suelos y viviendas climáticamente inteligentes. Es muy probable que su función económica se expanda a un ritmo acelerado, tanto a nivel local como en el comercio internacional, a medida que otros recursos forestales se vuelvan cada vez más tensos debido al cambio climático, ya que el imperativo de mitigar el cambio climático impone una menor dependencia de los combustibles fósiles y los recursos forestales en peligro de extinción, y la investigación descubre nuevas aplicaciones del bambú cada día.

El bambú por sí solo no resolverá los problemas del cambio climático en el mundo, pero, si este recurso estratégico se aprovecha adecuadamente, ofrece soluciones prácticas para la mitigación y adaptación al cambio climático, y una herramienta comprobada para combatir la pobreza rural y restaurar la base de recursos naturales, que es la base de la sostenibilidad económica (INBAR, 2020a).

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de esta investigación es el conocimiento en profundidad del bambú y la evaluación de la aplicabilidad en el sector de la Construcción de dos especies diferentes de bambú leñoso: la *Bambusa vulgaris Vulgaris* y la *Guadua angustifolia Kunth (GaK)*.



Figura 17. Ensayos de laboratorio realizados en esta Tesis Doctoral. Izquierda: Ensayo de tracción paralela a la fibra de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Centro: Ensayo de compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia Kunth*. Derecha: Ensayo de flexión de la *Guadua angustifolia Kunth*.

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* analizada en esta investigación procede del municipio de Motril (Granada, España) y fue proporcionada gratuitamente por Viveros Algaidas S.L., mientras que la *Guadua angustifolia Kunth* fue extraída de dos manchas distintas del Eje Cafetero colombiano, situadas en los municipios de Palmira y Candelaria, en el área metropolitana de Cali (Valle del Cauca, Colombia) y fue proporcionada por Bambusa Estudio.

Para la consecución del objetivo principal de este estudio, es necesario el cumplimiento de una serie de objetivos específicos. Estos objetivos son:

- Realizar un estudio documental exhaustivo del bambú:
 - Conocer su naturaleza y características generales, incluidas las partes que lo componen y los diferentes sistemas de raíces que puede presentar.
 - Analizar las características físico-mecánicas del bambú con base en estudios previos realizados por otros autores, conociendo así las propiedades que presenta y qué especies son más adecuadas para su uso en el sector de la Construcción.
 - Descubrir las ventajas e inconvenientes del bambú, así como sus usos más habituales y los principales países que lo producen.
 - Aprender las condiciones necesarias para el cultivo y desarrollo óptimo de las distintas especies de bambú analizadas, comparando las diferencias existentes entre ellas.
- Analizar el papel del bambú en el sector de la Construcción: elementos constructivos que pueden fabricarse con él, usos que se le dan en la edificación, construcciones realizadas con bambú y normativa existente.
- Estudiar la situación del bambú en España: cultivos existentes, construcciones en las que se ha empleado, eventos relacionados con él que se han desarrollado y especies que se están analizando actualmente.
- Determinar, mediante la realización de ensayos de laboratorio (**Figura 17**), la resistencia a tracción paralela a las fibras de la especie *Bambusa vulgaris Vulgaris* (junto con la realización de un análisis de emisión acústica) y la resistencia a compresión paralela a las fibras, tracción paralela a las fibras y flexión en 4 puntos de la especie *Guadua angustifolia Kunth*.

1.3. MARCO DE LA INVESTIGACIÓN

El desarrollo de esta Tesis Doctoral ha sido posible gracias al apoyo económico otorgado al proyecto “El cultivo de bambú en la Costa Tropical de Granada como estímulo medioambiental y económico”, referencia PPJI.B.08, financiado por la Universidad de Granada (Plan Propio de Investigación 2017).

La aportación económica del Instituto de la Mujer y para la Igualdad de Oportunidades a través del proyecto Quiero Ser Ingeniera (2019), permitió la adquisición de *Guadua angustifolia Kunth*, la especie utilizada en el desarrollo de dicho proyecto y que fue utilizada dos años después como parte de esta investigación.

La especie *Bambusa vulgaris Vulgaris* fue proporcionada gratuitamente por la empresa Viveros Algaidas S.L., que la cultivaba de forma natural en sus instalaciones en Motril (Granada, España).

La empresa Volterra Ecosystem S.L. regaló al grupo de investigación seis nuevas especies de bambú que, a día de hoy, continúan en estudio: *Bambusa oldhamii*, *Dendrocalamus asper*, *Phyllostachys atrovaginata*, *Phyllostachys nigra Nigra*, *Phyllostachys pubescens* y *Pseudosasa japónica*.

El Instituto Andaluz de Investigación y Formación Agraria, Pesquera, Alimentaria y de la Producción Ecológica (IFAPA) y las empresas Caja Rural de Granada[®] S.Coop. y La Huerta Xpaña[®] S.L., han aportado gratuitamente las fincas experimentales en las que se están cultivando las distintas especies de bambú.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

Esta Tesis Doctoral se compone de siete capítulos, cuyo contenido es el siguiente:

El presente **Capítulo 1** de INTRODUCCIÓN explica cómo el bambú contribuye a la consecución de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), recogidos en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que pretenden hacer frente a los retos sociales, económicos y medioambientales de la globalización.

El **Capítulo 2** recoge la FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA que permite conocer en profundidad el bambú. Primero, se indica su naturaleza y se analizan sus características generales, las partes que lo componen y su sistema de raíces. A continuación, se presentan sus características físico-mecánicas, evaluando qué especies son más adecuadas para su empleo en el sector de la Construcción. Después, se indican las ventajas e inconvenientes del bambú y se describen sus usos más habituales a lo largo del mundo, así como los principales países que producen este material. Seguidamente, se explican las diferentes aplicaciones que tiene el bambú en el sector de la Construcción, así como los productos derivados de él que pueden obtenerse. Para demostrar su versatilidad y funcionalidad, se muestran una serie de edificaciones y estructuras a modo de ejemplo. También se indican las normas sobre bambú más relevantes, todas ellas procedentes de otros países, dada la ausencia de regulación sobre este material en España. Posteriormente, y en relación directa con este aspecto, se habla de la situación del bambú en España, explicando los distintos cultivos existentes, las edificaciones españolas en las que se ha empleado y los eventos que se han realizado para darlo a conocer y favorecer su regulación e implementación como material de construcción. Por último, se describen las especies de bambú que actualmente se encuentran en estudio en España, indicando sus características particulares, sus principales aplicaciones y las condiciones necesarias para su cultivo y desarrollo óptimo, comparando las diferencias existentes entre ellas.

En el **Capítulo 3** se definen los MATERIALES Y MÉTODOS usados en esta Tesis Doctoral para cada uno de los ensayos de laboratorio realizados. En lo referente a Materiales, se definen las especies de bambú *Bambusa vulgaris Vulgaris* y *Guadua angustifolia Kunth*, incluyendo una descripción de sus características, su cultivo y sus usos (tanto dentro como fuera del sector de la Construcción). Seguidamente se detallan los criterios de inclusión y exclusión en la selección de muestras, así como las características de la selección escogida. En cuanto a los Métodos, se describe el proceso de elaboración de los diferentes especímenes, seguido del desarrollo de los distintos ensayos de laboratorio realizados. Además, para cada una de las fases descritas se indican los equipos e instrumentos utilizados.

El **Capítulo 4** recoge los RESULTADOS. En primer lugar, se presentan los resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras y emisión acústica realizados a la *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Posteriormente se muestran los resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras, tracción vertical paralela a las fibras y flexión en 4 puntos realizados a la *Guadua angustifolia Kunth*.

En el **Capítulo 5** se presentan las CONCLUSIONES de esta Tesis Doctoral, divididas en tres apartados: en el primero, se muestran las extraídas del estudio documental realizado en relación al bambú y los múltiples beneficios y aplicaciones que presenta al tratarse de un material natural y sostenible; a continuación, se establecen las conclusiones relacionadas con la especie *Bambusa vulgaris Vulgaris*, determinando que la Emisión Acústica (EA) es un método fiable para analizar el proceso de rotura del bambú, que se produce en dos fases; y, por último, se extraen

las conclusiones relacionadas con la *Guadua angustifolia Kunth*, que permiten observar la influencia de la climatología en la resistencia de la especie.

En el **Capítulo 6** se recoge la BIBLIOGRAFÍA utilizada en el desarrollo de esta Tesis Doctoral, es decir, todos los artículos, libros, normativas, documentos y páginas webs que han servido como guía y fuente de información durante la investigación realizada.

Por último, el **Capítulo 7** incluye una serie de ANEXOS que resultan de utilidad durante la lectura del presente documento. Los anexos son los siguientes: un glosario de términos, un siglario y un catálogo de símbolos.

Por otra parte, durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral se han realizado 11 actividades distintas, divididas en tres líneas de trabajo (LT), cada una con una naturaleza diferente. Estas líneas de trabajo se han llevado a cabo de manera consecutiva.

La **Figura 18** muestra un esquema-resumen de las tres líneas de trabajo desarrolladas y de las actividades que componen cada una de ellas.

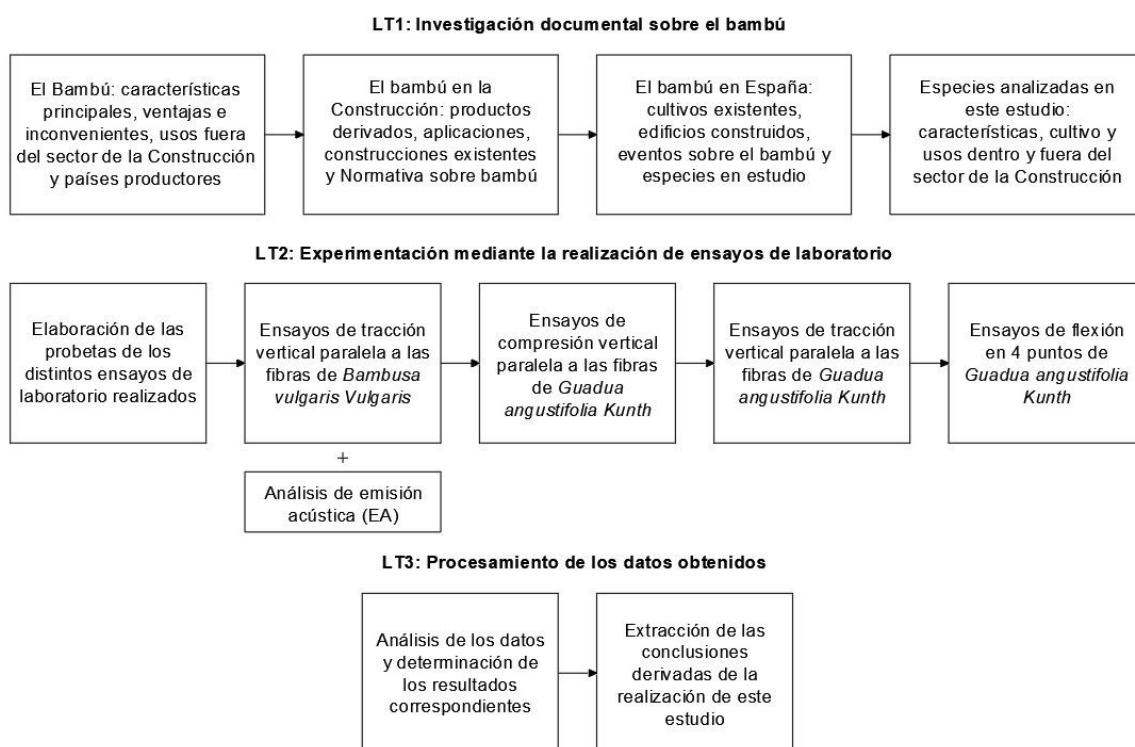


Figura 18. Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral.

2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. CONOCER EL BAMBÚ

2.1.1. DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS GENERALES

Los bambúes son plantas de tallo leñoso, generalmente duro y hueco, pertenecientes a la familia de las gramíneas *Poaceae* (Broto, 2014). Son perennes, macollantes o monopódicas, con rizomas bien desarrollados (Judziewicz, *et al.*, 1999). Las más de 1600 especies conocidas, que ocupan una amplia gama de entornos en todo el mundo, crecen principalmente en ecosistemas de climas tropicales templados y cálidos en África, Asia y América Central y del Sur (INBAR, 2019a).

Aunque el bambú es técnicamente una planta herbácea, algunas especies pueden alcanzar hasta 35 metros de altura y 30 centímetros de diámetro, como la especie *Dendrocalamus asper*. El bambú también incluye algunas de las plantas de más rápido crecimiento en el mundo: ciertas especies crecen hasta 91 cm por día, como la especie *Phyllostachys bambusoides* (INBAR, 2019a).

Durante los 5 primeros años, aproximadamente, la planta desarrolla una compleja trama de rizomas (tallos subterráneos) que se desarrollará a lo largo de los años, sirviendo como sustento y base estructural para los culmos (tallos aéreos). Entre los 3 y los 5 años, aproximadamente, el culmo alcanza su primer estado de madurez, pudiendo ser cosechado para su uso en construcción, ya que es en dicho momento cuando alcanza su mayor capacidad resistente (Baladrón Laborda, 2018).

2.1.1.1. Partes del bambú

El bambú consta de una serie de partes que lo diferencian del resto de plantas (**Figura 19**). El “tronco” o “tallo” del bambú recibe el nombre de culmo y es el elemento principal que sobresale de la tierra. El culmo se encuentra dividido en segmentos por anillos denominados nudos. El espacio entre dos nudos se llama entrenudo. Cuando la planta es joven, el culmo se encuentra protegido las hojas caulinares, unas hojas anchas habitualmente recubiertas por una vellosidad urticante de color marrón o negro. Conforme el bambú crece, desarrolla yemas en el tallo, que dan lugar a las ramas, donde brotan las hojas (Greco & Cromberg, 2011).

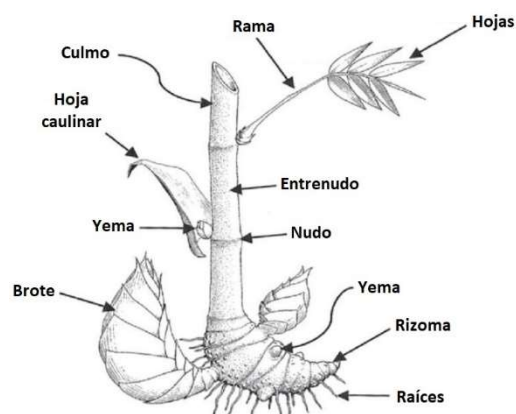


Figura 19. Partes del bambú.
Fuente: Greco y Cromberg, 2011.

Por debajo de la superficie del suelo, el bambú cuenta con un tallo subterráneo principal denominado rizoma, que desarrolla yemas que dan lugar a los nuevos brotes. Además, el rizoma cuenta con pequeños tallos secundarios, denominados raíces, que absorben del terreno los nutrientes necesarios para el correcto desarrollo de la planta (Jaramillo Benavides, 2019).

Al seccionar un culmo de bambú, se aprecia que en su interior también se divide en varias partes o elementos (**Figura 20** - Izquierda). Las fibras que conforman la caña reciben el nombre de pared del culmo y cuentan con una cara interna y una cara externa, compuesta principalmente por sílice. El “vacío” del interior de los entrenudos se llama cavidad, mientras que la parte interna de los nudos se denomina diafragma (Rodrigues Moura, *et al.*, 2018).

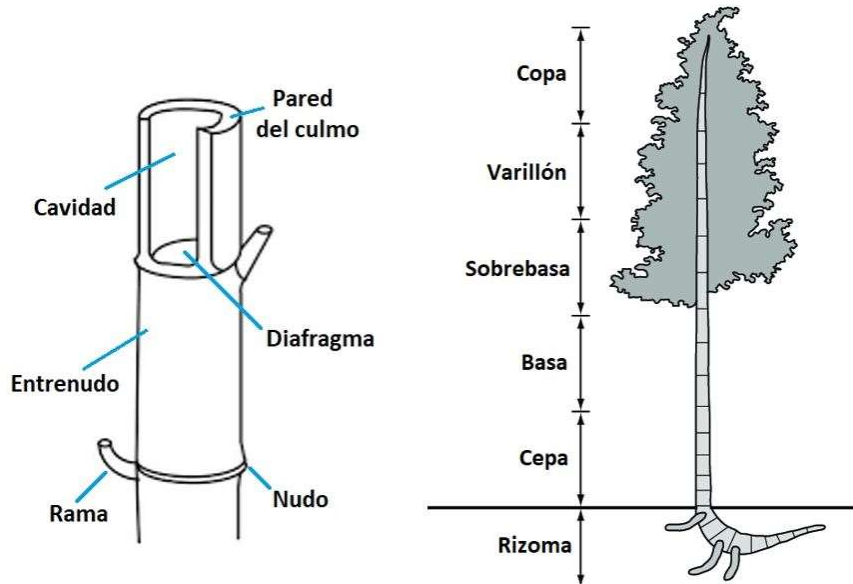


Figura 20. Partes internas (izquierda) y externas (derecha) del culmo de bambú.
Fuente: Janssen, 2000 (Izquierda) / Estrada Mejía, 2010 (Derecha).

Además, el culmo se divide en partes imaginarias según su altura con respecto al nivel del suelo, recibiendo cada una de ellas un nombre diferente (**Figura 20** - Derecha).

La parte subterránea se llama rizoma y sirve para hacer artesanías y muebles, además de ser comestible en muchas especies de bambú (Minke, 2010).

La primera parte del culmo que sobresale del suelo es la cepa, que se caracteriza por ser la que mayor diámetro presenta y, por tanto, la más resistente. Puede llegar a medir hasta 3 metros en las especies de mayor altura, siendo éstas las que se emplean en construcción. Es por ello que la cepa se utiliza habitualmente en edificación para fabricar columnas (Lucila Aguilar Arquitectos, s.f.).

La siguiente parte se llama basa y es la parte de mayor tamaño, pues llega a alcanzar hasta 8 metros, por lo que es la más útil y la más comercializada. Suele presentar un diámetro regular y se emplea, en su estado natural, para fabricar vigas y columnas. Cuando no se utiliza como elemento resistente, suele dividirse longitudinalmente en segmentos para elaborar unos productos derivados del culmo llamados latillas, con los que se componen otros materiales de construcción (Minke, 2010).

A continuación, se encuentran la sobrebasa y, seguidamente, el varillón. Ambas partes tienen una sección menor y menos constante, por lo que en el sector de la Construcción no se emplean en su estado natural, sino que se dividen en latillas que se usan como elementos de tejido. Estas partes pueden llegar a medir alrededor de 3 m de longitud cada una (Estrada Mejía, 2010).

Por último, se encuentra la copa, que corresponde a la parte apical del culmo. Su diámetro no es constante y, habitualmente, muestra curvatura, por lo que no se emplea en edificación, siendo principalmente empleado en la elaboración de artesanías (Hidalgo López, 2003).

2.1.1.2. Sistema de raíces

Como muestra la **Figura 21**, según su sistema de raíces, los bambúes presentan dos formas de crecimiento: estolonífero o cespitoso (Ardle, 2009).



Figura 21. Sistemas de raíces del bambú. Izquierda: Bambú cespitoso. Derecha: Bambú estolonífero.
Fuente: Jardinería On.

Los bambúes estoloníferos son aquellos que se desarrollan mediante rizomas finos y alargados unidos entre sí por cañas, por lo que reciben también el nombre de estolones subterráneos. En este tipo de bambúes, los nuevos brotes crecen desde raíces que se extienden con mayor rapidez, formando estructuras de mucha fuerza que se pueden expandir hasta 50 centímetros de profundidad y a muchos metros de distancia bajo el suelo, por lo que queda un mayor espacio entre ellos y se conforman culmos distantes (Sarmiento, 2018).

Por lo tanto, este tipo de bambúes tienden a ocupar grandes extensiones de terreno, lo que los hace ideales para conformar bosques. No obstante, si se desea evitar su expansión descontrolada, es conveniente emplear algún producto o elemento bloqueador de rizomas, como por ejemplo una barrera anti raíces de polipropileno.

Los bambúes de crecimiento cespitoso no tienen la capacidad de formar estolones, sino que su desarrollo se realiza a través de la bifurcación de las raíces, mediante rizomas cortos y gruesos que forman gran cantidad de yemas que se distribuyen bajo el suelo conformando una red. En este tipo de bambúes, los nuevos culmos son más finos y se producen cercanos los unos a los otros, por lo que se conforman matas que se extienden lentamente (Eberts, 2006).

En general, los bambúes de crecimiento cespitoso no suelen sobrepasar los 3 metros de altura, crecen mejor en climas tropicales y no ocupan grandes extensiones de terreno, por lo que a menudo se cultivan con fines estéticos en jardines y parques, sin necesidad de emplear ningún bloqueador de rizomas.

2.1.2. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y MECÁNICAS

2.1.2.1. Anatomía interna

La ligereza y flexibilidad del bambú se debe principalmente a su característica estructura física: de sección redonda, hueca y con un tabique rígido transversal que le permite curvarse sin romperse (Huellas de Arquitectura, 2015).

El bambú es un material anisotrópico, es decir, sus propiedades en la dirección longitudinal son diferentes a sus propiedades en la dirección transversal. La dirección longitudinal está hecha de fibras de celulosa de bambú, que son fuertes y rígidas (**Figura 22**). En la dirección transversal, el bambú está compuesto principalmente de lignina, que es suave y quebradiza (DeBambú, 2020).



Figura 22. Sección longitudinal de un culmo.
Fuente: De Bambú.

En general, la rigidez del bambú es prácticamente el doble que la de la madera, a pesar de no existir casi diferencias en su composición química. Este hecho puede deberse a la diferencia en los ángulos de disposición de la celulosa, las microfibrillas y la célula-eje, que adopta un valor de 20° en la madera y tan sólo de 10° en el bambú (Huellas de Arquitectura, 2015).

La contracción de los nudos es 4 veces mayor que la contracción de los entrenudos (porción hueca entre dos nudos), por lo que los entrenudos presentan mayor cantidad de fibras reforzadas que los nudos. Debido a las diferencias en la estructura anatómica y la densidad, hay una gran variación en la contracción tangencial desde el interior (10%) hasta la parte exterior (15%) de la pared del tallo. Por lo tanto, la contracción tangencial es mayor en las partes exteriores de la pared que en las partes interiores, motivo por el que pueden aparecer fisuras en la corteza (DeBambú, 2020).

2.1.2.2. Dimensiones

Las dimensiones del bambú, al tener un origen orgánico con más de 1600 especies repartidas por todo el mundo, resultan casi imposibles de definir con exactitud. La especie, el clima en el que se cultiva, el tipo de suelo... todas ellas son variables que afectarán a sus características. Además, sus dimensiones varían con la altura, disminuyendo la sección del culmo y el espesor de la pared de éste desde la cepa hacia la copa (Huellas de Arquitectura, 2015).

En el caso de las especies principalmente empleadas en la construcción, se puede estimar como promedio:

- Altura: de 18 a 30 metros, dependiendo de la especie y la edad.
- Diámetro: entre 8 y 20 cm en la base y hasta un mínimo de 3 cm en su extremo superior.
- Espesor de la pared externa: entre 2 y 2.5 cm en la base y 1 cm en el extremo superior.
- Distancia entre nudos: de 7 a 10 cm en la base, aumentando con la altura hasta alcanzar una distancia de entre 25 y 35 cm.

2.1.2.3. Peso específico

El peso específico del bambú varía mucho según la especie. Además, debido a las características anatómicas del bambú, también existe gran diferencia entre el peso específico en la base del culmo, donde presenta un mayor volumen hueco y, por tanto, el peso específico es menor, y el extremo superior, donde se alcanza el valor máximo. Estas diferencias se incrementan aún más en los especímenes provenientes de bosques naturales, donde la heterogeneidad es mayor (Zaragoza-Hernández, *et al.*, 2015).

La **Tabla 1** muestra los valores mínimos y máximos determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú utilizadas en la construcción.

Tabla 1. Peso específico del bambú seco según varios autores.
Fuente: Zaragoza-Hernández *et al.* 2015.

Especie	Peso específico mínimo (kg/m ³)	Peso específico máximo (kg/m ³)	Autor de la investigación
<i>Guadua aculeata</i>	370	920	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua angustifolia</i>	620	900	Correal y Arbeláez 2010
<i>Dendrocalamus asper</i>	560	700	Surjokusumo y Nugroho 1995
<i>Bambusa heterostachya</i>	390	580	Mohmod <i>et al.</i> 1995
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	570	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Bambusa blumeana</i>	390	590	Espiloy 1986
<i>Chusquea culeou</i>	550	690	Poblete <i>et al.</i> 2009
<i>Gigantochloa levis</i>	470	800	Nordahlia <i>et al.</i> 2012
Varias	500	900	Liese 1987, Liese 1998

La **Tabla 1** refleja que la especie *Guadua aculeata* es, a la vez, la especie con menor y mayor peso específico. Esto se debe a que es una de las especies a las que más le afectan las condiciones de cultivo y climatológicas.

Por su parte, la *Guadua angustifolia* Kunth (GaK) es, de entre las especies con mayor peso específico, la que presenta unos valores más estables, motivo (entre otros que se comentarán más adelante) por el que es empleada como elemento resistente en el sector de la Construcción.

Las especies de bambú con menor peso específico pertenecen al género *Bambusa* y son: la *Bambusa heterostachya* y la *Bambusa blumeana*, aunque ambas presentan valores estables.

2.1.2.4. Conductividad térmica

La conductividad térmica es la propiedad de un material que posibilita la transmisión de calor. Esta propiedad física implica que, cuando una materia dispone de conductividad térmica, el calor pasa de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura que se encuentra en contacto con él. A mayor conductividad térmica, mejor conducción del calor (Viteri López, 2017).

En el caso del bambú, la conductividad térmica depende del sentido de propagación del flujo de calor y del elemento que se esté ensayando. El coeficiente de conductividad térmica del bambú secado en horno en sentido perpendicular a las fibras es de 0.102 W/(K·m), mientras que en sentido paralelo a las fibras es de 0.166 W/(K·m) (Martínez García, 2015).

Por otra parte, el abeto común secado en horno presenta una conductividad térmica de 0.121 W/(K·m) en sentido perpendicular a las fibras y de 0.222 W/(K·m) en sentido paralelo a las fibras (Martínez García, 2015), lo que demuestra que el bambú es mejor aislante térmico que el abeto común.

La investigación desarrollada por Armando Vinicio Viteri López (2017), demuestra que las fibras de bambú a granel en molde con densidad aparente de 0.22 g/cm³ (Figura 23), muestran un coeficiente térmico de 0.049 W/(K·m) (Viteri López, 2017).



Figura 23. Bambú a granel del estudio de Viteri López (2017).
Fuente: Viteri López, 2017.

2.1.2.5. Resistencia a compresión

Gran parte del bambú utilizado en la construcción es sometido a compresión paralela a las fibras (f_c), especialmente cuando es usado en los soportes de las edificaciones. Es importante tener en cuenta que la edad y la esbeltez (relación entre la longitud y el diámetro) repercuten en la resistencia del bambú a la compresión paralela a las fibras (Martínez García, 2015).

La resistencia máxima a compresión paralela a las fibras ($f_{c,máx}$) del bambú es mayor en el extremo superior del culmo que en la base. Igualmente, la $f_{c,máx}$ aumenta considerablemente cuanto más seco se encuentra el culmo, suponiendo un incremento promedio de 20 MPa entre el bambú verde y el seco (Zaragoza-Hernández, et al., 2015).

La **Tabla 2** muestra los valores mínimos y máximos de resistencia a compresión paralela a las fibras determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú (en estado seco) utilizadas en la construcción.

Tabla 2. Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú según varios autores.

Especie	Estado	Resistencia mínima $f_{c,min}$ (MPa)	Resistencia máxima $f_{c,máx}$ (MPa)	Autor de la investigación
<i>Guadua aculeata</i>	Seco	47.9	56.6	Zaragoza-Hernández et al. 2015
<i>Guadua aculeata</i>	Seco	42.3	66.2	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	Seco	25.1	41.8	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	Seco	29.3	46.6	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. angustifolia Macana</i>	Verde	51.5	67.6	Hidalgo López 1978
<i>G. angustifolia Macana</i>	Seco	50.6	59.7	Takeuchi y González 2007
<i>Guadua angustifolia</i>	Seco	37.6	42.1	Correal y Arbeláez 2010
<i>G. angustifolia Atlántica</i>	Seco	-	41.8	Sotela 1992
<i>G. angustifolia Sur</i>	Seco	-	41.2	Sotela 1992
<i>Bambusa blumeana</i>	Seco	25.3	28.8	Mohmod et al. 1993
<i>Bambusa blumeana</i>	Seco	25.3	28.9	Mohmod y Jusuh 1992

La **Tabla 2** muestra que las especies *Guadua angustifolia* Kunth variedad *Macana* y la *Guadua aculeata* son las que mayor resistencia a compresión paralela a las fibras presentan. No obstante, el valor mínimo de la variedad *Macana* es superior al de la *Guadua aculeata*.

De entre las especies analizadas, la que menor resistencia a este tipo de esfuerzo presenta es la *Bambusa blumeana*. Esto se debe a que, como se mostrará durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral, el género *Bambusa* posee menores resistencias que el género *Guadua*.

2.1.2.6. Resistencia a tracción

La mejor propiedad mecánica que posee el bambú es su alta resistencia a tracción paralela a las fibras (f_t), pudiendo llegar a ser 4 veces mayor que a compresión para una misma especie. La resistencia a tracción es mayor que a flexión, seguida de la resistencia a compresión (Huellas de Arquitectura, 2015).

La resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú depende de su contenido de humedad, de la presencia o no de nudo en la pieza y de la zona del bambú de la que ésta proceda (Martínez García, 2015). En las diferentes variedades de *Guadua*, la resistencia es mayor en la sección media del culmo, reduciéndose en las zonas inferior y superior. Igualmente, las piezas con nudo presentan valores menores que las piezas sin nudo (Zaragoza-Hernández, *et al.*, 2015).

La **Tabla 3** muestra los valores mínimos y máximos de resistencia a tracción paralela a las fibras determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú (en estado seco) utilizadas en la construcción.

Tabla 3. Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú según varios autores.

Especie	Estado	Resistencia mínima $f_{t,min}$ (MPa)	Resistencia máxima $f_{t,max}$ (MPa)	Autor de la investigación
<i>Guadua aculeata</i>	Seco	58.5	92.2	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>G. angustifolia Macana</i>	Verde	92.5	162.7	Hidalgo López 1978
<i>G. angustifolia Castilla</i>	Verde	53.7	153.0	Hidalgo López 1978
<i>Bambusa vulgaris</i>	Seco	30.4	41.1	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Dendrocalamus asper</i>	Seco	138.0	220.3	Surjokusumo y Nugroho 1995
<i>Guadua angustifolia</i>	Seco	-	190.7	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia</i>	Seco	154.8	187.7	González <i>et al.</i> 2006

En la **Tabla 3** se aprecia que la especie que mayor resistencia a tracción paralela a las fibras presenta es la *Dendrocalamus asper*, seguida de la *Guadua angustifolia*, cuyos valores son más estables que los de la *Dendrocalamus*.

Para este esfuerzo, la especie que presenta la menor resistencia es la *Bambusa vulgaris*, cuyo valor máximo ni siquiera alcanza el valor mínimo registrado para las especies del género *Guadua*.

2.1.2.7. Resistencia a cortante

La resistencia al esfuerzo cortante (f_v) mide la capacidad de resistir fuerzas que tienden a producir deslizamiento de una porción del material con relación a otra porción adyacente. Mientras que los esfuerzos de tracción y compresión actúan perpendicularmente al área considerada, el esfuerzo cortante actúa paralelamente a dicho plano (**Figura 24**), produciendo una rotura diagonal (Martínez García, 2015).

En general, se observa que no hay gran diferencia en la resistencia máxima a cortante entre las secciones inferior y media del culmo, pero sí aparece un incremento en la sección superior, tanto en seco como en verde y tanto en especímenes con nudo como en especímenes sin nudo. Igualmente, la resistencia aumenta conforme mayor sea la densidad básica del bambú (Zaragoza-Hernández, *et al.*, 2015).

Además, su valor depende del grosor de la pared del culmo. En culmos con paredes de 10 mm de espesor, la resistencia al esfuerzo cortante es, aproximadamente, un 11% mayor que en culmos con paredes de 6 mm de espesor, debido a la mayor distribución del esfuerzo y al mayor porcentaje de fibras fuertes presentes en la sección transversal (Rodríguez Alonso & Morales Díaz, 2008).

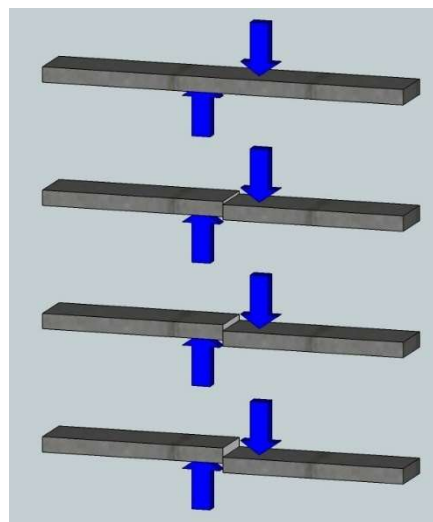


Figura 24. Esfuerzo cortante.
Fuente: David López Morte.

La **Tabla 4** muestra los valores mínimos y máximos de resistencia a cortante determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú (en estado seco) utilizadas en la construcción.

Tabla 4. Resistencia a cortante del bambú seco según varios autores.

Especie	Resistencia mínima $f_{v,min}$ (MPa)	Resistencia máxima $f_{v,max}$ (MPa)	Autor de la investigación
<i>Guadua aculeata</i>	7.70	11.60	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	4.50	7.20	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	4.50	6.80	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia</i> Cebolla	-	5.57	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia</i>	7.10	7.80	Correal y Arbeláez 2010
<i>Guadua angustifolia</i> Atlántica	-	6.18	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia</i> Sur	-	7.35	Sotela 1992
<i>Gigantochloa scortechinii</i>	4.10	6.80	Bahari y Ahmad 2009
<i>Dendrocalamus asper</i>	11.20	12.52	Surjokusumo y Nugroho 1995
<i>Bambusa blumeana</i>	4.61	5.00	Mohmod <i>et al.</i> 1993
<i>Chusqueau culeou</i>	-	9.09	Poblete <i>et al.</i> 2009

En relación a la resistencia al cortante del bambú, la especie *Dendrocalamus asper* presenta los valores más altos, seguida de la *Guadua aculeata*, que, en comparación a la *Dendrocalamus*, presenta una mayor variación entre el valor mínimo y el máximo.

La *Bambusa blumeana* es la especie que presenta el menor valor máximo de resistencia a cortante, al igual que sucedía con la resistencia a compresión paralela a las fibras.

Todas las especies de *Guadua angustifolia* recogidas en la **Tabla 4** presentan una resistencia máxima intermedia en comparación al resto de especies analizadas, con valores entre 5.57 y 7.80 MPa.

2.1.2.8. Resistencia a flexión

La tensión unitaria máxima en flexión que soporta un material antes de que se produzca la falla recibe el nombre de resistencia a flexión (f_b) o módulo de rotura (MOR) (Spavento, *et al.*, 2008).

La resistencia es mayor en la corteza del bambú que en su anillo interior. Por ello, resulta curioso que las cañas de menor sección suelen presentar mejores prestaciones a flexión que las más gruesas. Esto se debe a la proporción de fibras de la corteza exterior en relación con la totalidad de la sección, un valor que disminuye al aumentar el grosor del culmo (Huellas de Arquitectura, 2015).

La **Tabla 5** muestra los valores mínimos y máximos del módulo de rotura determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú utilizadas en la construcción.

Tabla 5. Módulo de rotura del bambú según varios autores.

Especie	Estado	$f_{b,mín}$ (MPa)	$f_{b,máx}$ (MPa)	Autor de la investigación
<i>Guadua aculeata</i>	Seco	62.8	79.6	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	Verde	51.9	69.5	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	Verde	59.7	89.2	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	Verde	77.0	102.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	Seco	72.2	93.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	Verde	75.6	88.3	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia</i>	Seco	54.5	81.7	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994
<i>Guadua angustifolia</i>	Verde	86.9	103.8	Correal y Arbeláez 2010
<i>Bambusa vulgaris</i>	Seco	66.1	136.2	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Bambusa vulgaris</i>	Verde	64.1	111.3	Valero <i>et al.</i> 2005

La especie que mayor valor de resistencia a flexión ofrece es la *Bambusa vulgaris*, tanto en estado seco como en estado húmedo. No obstante, la *Guadua amplexifolia* (verde) y la *Guadua angustifolia* (verde) del estudio de Correal y Arbeláez (2010), muestran también una alta resistencia a este tipo de esfuerzo, con una menor variación entre los valores mínimo y máximo en comparación con la *Bambusa vulgaris*.

La especie con menor valor máximo de resistencia a flexión es la *Guadua aculeata* del estudio de Zaragoza-Hernández y sus colaboradores (2015), tanto en estado seco como en estado verde.

2.1.2.9. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, o módulo de Young, es un parámetro que caracteriza el comportamiento elástico de un material y se define como la relación lineal entre la tensión debida a la carga aplicada al material y su deformación.

El módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras (E_c) y el módulo de elasticidad en flexión estática (E_b) aumentan conforme la pieza pertenece a una parte del culmo más alejada de la base y son mayores en los especímenes secos que en los verdes. Por el contrario, el módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras (E_t) es menor cuando la pieza pertenece a una parte del culmo alejada de la base, siendo más o menos similar en las zonas inferior y media de

la caña. Además, tanto para culmos secos como para culmos verdes, el E_b aumenta conforme la densidad básica del bambú es mayor (Zaragoza-Hernández, *et al.*, 2015).

La **Tabla 6** muestra los valores mínimos y máximos del módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras (E_c), en tracción paralela a las fibras (E_t) y en flexión estática (E_b) determinados por diferentes autores para las principales especies de bambú utilizadas en la construcción.

Tabla 6. Módulo de elasticidad del bambú para distintos esfuerzos según varios autores.

Especie	Estado	Compresión paralela		Tracción paralela		Flexión estática		Autor de la investigación
		$E_{c,min}$ (GPa)	$E_{c,max}$ (GPa)	$E_{t,min}$ (GPa)	$E_{t,max}$ (GPa)	$E_{b,min}$ (GPa)	$E_{b,max}$ (GPa)	
<i>G. aculeata</i>	Seco	19.3	20.7	8.2	9.8	20.8	24.1	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>G. aculeata</i>	Verde	13.7	18.0	-	-	15.1	18.6	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>G. aculeata</i>	Seco	15.1	18.8	-	-	-	-	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. aculeata</i>	Verde	8.7	18.9	-	-	13.8	19.5	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. amplexifolia</i>	Seco	9.4	14.2	-	-	-	-	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. amplexifolia</i>	Verde	8.4	12.3	-	-	14.5	22.7	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. velutina</i>	Seco	10.1	20.9	-	-	14.8	21.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. velutina</i>	Verde	8.5	12.6	-	-	15.4	19.6	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>G. angustifolia Macana</i>	Seco	17.4	18.1	-	-	-	-	Takeuchi y González 2007
<i>G. angustifolia Atlántica</i>	Seco	-	18.9	-	-	-	-	Sotela 1992
<i>G. angustifolia Sur</i>	Seco	-	17.3	-	-	-	-	Sotela 1992
<i>G. angustifolia</i>	Verde	14.9	20.0	-	-	17.0	18.3	Correal y Arbeláez 2010
<i>G. angustifolia</i>	Seco	-	-	-	-	-	17.6	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994
<i>Dendrocalamus asper</i>	Seco	-	-	-	-	3.4	4.6	Subyakto 1995

En cuanto al módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras, los valores máximos los presentan tres especies, siendo todos ellos superiores a 20.0 GPa y similares entre sí. De valor mayor a menor, dichas especies son: *Guadua velutina* (seca), *Guadua aculeata* (seca) del estudio de Zaragoza-Hernández y sus colaboradores (2015) y *Guadua angustifolia* (verde) de Correal y Arbeláez (2010).

Curiosamente, la *Guadua velutina* es también la especie que presenta el menor valor, aunque en estado verde. También la *Guadua amplexifolia*, tanto en estado seco como en estado verde, muestra los valores más bajos.

Todas las especies de *Guadua angustifolia* analizadas presentan valores máximos intermedios (entre 17.3 y 20.0 GPa) en comparación al resto de las especies.

En relación al módulo de elasticidad en tracción paralela a las fibras, sólo la *Guadua aculeata* en estado seco ha sido analizada, presentando valores muy bajos en comparación a los que muestra para el resto de esfuerzos.

Por último, con respecto al módulo de elasticidad en flexión estática, la *Guadua aculeata* (seca) del estudio de Zaragoza-Hernández y sus colaboradores (2015) es la que presenta el mayor valor máximo, seguida de la *Guadua amplexifolia* (verde) y de la *Guadua velutina* (seca), todas ellas con valores superiores a los 21.0 GPa.

La especie *Dendrocalamus asper* presenta los menores valores mínimo y máximo, con sólo 3.4 y 4.6 GPa, respectivamente. Esto podría deberse a que es la especie con el tallo de mayor diámetro, pudiendo alcanzar los 30 cm, y con mayor espesor de pared del culmo (entre 5 y 20 mm), lo que restaría flexibilidad a las muestras ensayadas.

2.1.2.10. Resistencia al fuego

Las primeras pruebas sobre su resistencia al fuego remontan a los años 80 del siglo pasado y fueron realizadas por el Instituto de Estructuras Ligeras de la Universidad de Stuttgart, Alemania. El bambú está clasificado como un material de clase B2 (moderadamente inflamable o combustible retardante de la llama) según la Normativa Alemana DIN4102 (Soler Soler, 2017).

La alta concentración de silicio en la parte exterior de la caña ralentiza la propagación de la llama, pudiendo así ser asimilado a la madera a la hora de realizar cálculos de resistencia al fuego. El valor de reacción frente al fuego del bambú es muy parecido al de la madera y se establece en 0.6 mm/min, consumidos desde el exterior de la caña hacia el interior de la misma (Bambusa.es, s.f.a).

En España, el bambú cumple los requisitos establecidos por el Documento Básico de Seguridad en Caso de Incendio del Código Técnico de la Edificación (Soler Soler, 2017).

Según la norma UNE-EN 13501-1:2019, clasificación en función del comportamiento frente al fuego de los productos de construcción y elementos para la edificación - Parte 1: Clasificación a partir de datos obtenidos en ensayos de reacción al fuego, el bambú se clasifica como categoría Cfl-S1, es decir, combustible con contribución limitada al fuego y producción baja de humos (Soler Soler, 2017).

Un estudio realizado por la Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona (España), demostró que, para la especie *Guadua angustifolia* (la más empleada como material estructural en el sector de la construcción), la humedad de equilibrio dificulta la combustión de las piezas, pero no cambia significativamente la reacción al fuego. Las zonas exteriores ricas en silicio presentan una mayor resistencia a la combustión, pero al ser las zonas menos afectadas por las variaciones de humedad su comportamiento al fuego varía menos en función de las condiciones higroscópicas ambientes. Además, la adición de un 5% octaborato de sodio tetrahidratado mejora su comportamiento al fuego, ya que reduce la duración de las combustiones y aumenta significativamente el valor necesario para producir la combustión (Avellaneda, *et al.*, 2019).

La posición en que se coloque el elemento de bambú afecta a su susceptibilidad al fuego, siendo las cañas horizontales menos vulnerables que las dispuestas en vertical o diagonal. En un

elemento de bambú colocado en horizontal, las llamas se extienden por la superficie externa hacia el nudo más cercano, pero encuentran gran dificultad para sobrepasarlo y llegar al interior. Sin embargo, en los elementos diagonales, las llamas avanzan en dirección ascendente desde la zona de corte y se propagan por el interior de la caña conformando anillos. En posición vertical sucede lo mismo, pero el fuego se propaga con mayor facilidad por el interior del elemento (Escalona, *et al.*, 2017).

Tribus ancestrales como los Orang Kubu del centro de Sumatra o los Punan de Borneo emplean cañas verdes de bambú para hervir y cocinar de forma segura agua y comida colocando la caña verde directamente sobre las brasas (Barrallo, 2016), como se aprecia en la **Figura 25**.



Figura 25. Comida cocinándose en el interior de una caña de bambú puesta al fuego.
Fuente: Lobo Nómada.

2.1.3. VENTAJAS E INCONVENIENTES

2.1.3.1. Ventajas

El bambú colabora positivamente con el ecosistema que le rodea, pues protege las riveras de los cursos de agua, regula hidrológicamente las microcuencas, disminuye el riesgo de deslizamientos, protege el suelo de la erosión, recicla nutrientes, alberga flora y fauna local, captura y almacena dióxido de carbono y contribuye a la belleza escénica (Añazco, 2013).

Los extensos sistemas de raíces del bambú se unen en el suelo y pueden elevar el nivel freático, convirtiéndose en una parte importante de los proyectos de lucha contra la desertificación en todo el mundo (INBAR, 2019a).

Desde un punto de vista ecológico, el cultivo de bambú podría servir como medio de protección y salvaguarda de otras especies maderables de mayor valor económico y crecimiento más lento. Pongamos como ejemplo el pino, por ser la madera con mayor representación en los montes españoles (Sánchez, 2017).

Un pino tarda 40 años en producir, aproximadamente, 1.30 m³ de madera. En ese mismo tiempo, el bambú produce alrededor de 2.7 veces más (Falck, 2001). Como el bambú tiene forma tubular, podemos comparar un culmo de bambú de 10 cm de diámetro con una pieza de madera de pino de 2 cm x 4 cm. En un período de 40 años, una plantación de una hectárea de bambú produciría 284160 metros lineales de culmos, mientras que una plantación equivalente de pino produciría 72000 metros lineales de piezas de 2cm x 4 cm. Por lo tanto, el bambú produciría, aproximadamente, 4 veces más que el pino.

El rápido crecimiento del bambú lo convierte en una planta ideal para una reforestación rápida del ambiente. Según la especie, en una plantación madura, un brote podría llegar a crecer, aproximadamente, unos 12 metros en 6 meses. De ahí en adelante comienza la producción de ramas y hojas, que es abundante y actúa como un medio natural de crecimiento de las malezas del entorno. Conforme las hojas se caen, el colchón que generan constituye una protección para el suelo y un medio de enriquecerlo con la descomposición de las mismas, que al tiempo se integran a la tierra. Además, la sombra que producen sus hojas evita la evaporación de las aguas cercanas (Falck, 2001).

Debido a su rápido crecimiento, el bambú puede cosecharse por primera vez entre los 3 y los 5 años de edad, aproximadamente. Pero sin duda, otra gran ventaja es que, tras haber alcanzado ese primer estado de maduración completa, los culmos podrán ser cosechados de forma prácticamente indefinida (siempre que se haga de la forma adecuada), en períodos de tiempo que van de los 2 a los 5 años entre cosecha y cosecha (Baladrón Laborda, 2018).



*Figura 26. Panda gigante comiendo bambú.
Fuente: Muy Interesante.*

Otra ventaja que ofrece el bambú es que es capaz de producir mucho más oxígeno que el que producen los árboles madereros tradicionalmente empleados en el sector de la construcción. Esto convierte al bambú en un arma indispensable para combatir el calentamiento global, pues es capaz de acumular ingentes cantidades de CO₂ en su interior mientras ayuda a regenerar el suelo en el que se halla plantado (Baladrón Laborda, 2018).

Además, el bambú es una parte clave de los ecosistemas de biodiversidad, pues especies como el panda gigante (**Figura 26**), el panda rojo, el gorila de montaña, el mono de las montañas de Bale y el lémur grande del bambú, dependen del bambú para obtener alimento y refugio (INBAR, 2019a).

2.1.3.2. Inconvenientes

El bambú presenta una serie de inconvenientes debido a su origen vegetal. La durabilidad natural de las cañas de bambú sin tratar es, para la mayoría de las especies, de menos de 2 años, y de 4 a 7 años en condiciones ideales (sin exposición al sol ni a la lluvia). La conservación de los culmos de bambú es, por lo tanto, esencial para prolongar su vida útil (DeBambú, 2020).

Como cualquier otra madera, se ve sometido al ataque de numerosos parásitos pertenecientes al reino animal (insectos) o vegetal (hongos) (Domínguez García-Tejero, 1998). La gran cantidad de almidón presente en el bambú lo hace muy atractivo para el moho y los hongos, así como para las termitas y los escarabajos (DeBambú, 2020).

La **Figura 27** muestra el parásito más importante que ataca al bambú, el “Escarabajo del bambú seco” (*Dinoderus minutus*), una especie de escarabajo de la madera perteneciente a la familia *Bostrichidae* (White, 2018).

Este parásito, rara vez se encuentra en el bambú del campo o en estado fresco, mientras que las cañas secas almacenadas son propensas a su ataque. Los escarabajos del bambú seco, perforan agujeros de, aproximadamente, 1 milímetro de diámetro para acceder al interior de la caña. Luego, las larvas perforan túneles internos que debilitan los culmos (Beaver, *et al.*, 2011).



Figura 27. El principal enemigo del bambú: los insectos xilófagos. Izquierda: Escarabajo del bambú seco (*Dinoderus minutus*). Derecha: Bambú afectado por el Escarabajo del bambú seco.
Fuente: Alchetron.

La susceptibilidad de las distintas especies de bambú al ataque de este parásito varía ampliamente. Asimismo, dentro de una misma especie, los tallos más viejos son más resistentes que los jóvenes y las partes distales de los culmos lo son más que las basales, pues el escarabajo del bambú seco prefiere las partes del tallo con mayor nivel de almidón (Plank, 2018).

Dado que la cantidad de ceras, resinas y taninos que contiene el bambú no es suficientes para asegurar su durabilidad natural una vez cortado, es necesario que sea tratado contra la posible contaminación por insectos inmediatamente después de ser cosechado.

Una de las técnicas de conservación más utilizadas y efectivas es la de impregnar las fibras de bambú con una mezcla de bórax o ácido bórico. Una vez que todos los azúcares naturales de las

fibras de bambú son reemplazados por sales, se vuelven inmunes a los insectos. Gracias a este tratamiento se consigue que las cañas de bambú alarguen su vida útil por encima de los 50 años o más, suponiendo que se encuentren en las condiciones adecuadas (DeBambú, 2020).

También hay que considerar que, al tratarse de un material de naturaleza vegetal, el bambú puede verse afectado por factores como la exposición solar directa o la humedad, provenga ésta de la lluvia, el ambiente o el suelo (García, 2015). Esto se debe a que el bambú es un material higroscópico, lo que significa que absorberá o expulsará la humedad de o hacia su entorno hasta que se alcance un equilibrio. Por lo tanto, el contenido de humedad del bambú varía según las propiedades del aire circundante (DeBambú, 2020).

El agua se mantiene en el bambú de dos maneras: agua libre que se retiene en las cavidades celulares y agua ligada que se retiene en las paredes celulares mismas. El contenido de humedad de la pared del tallo es mayor en la parte interna que en la parte externa. Los nudos tienen valores más bajos que los entrenudos. Estas diferencias pueden ser de hasta un 25%.

Durante el secado, el bambú pierde agua libre hasta que su contenido de humedad es de aproximadamente el 15%. Si se expulsara el agua restante, el tallo de bambú se encogería. No obstante, tiene la propiedad de poder recuperar volumen de nuevo después de secarse cuando la humedad relativa del aire circundante es alta. Esto significa que el bambú se contrae y se dilata según los cambios en la humedad relativa, pudiendo aparecer grietas y fisuras debido al estrés causado por la humidificación o el secado repentino (DeBambú, 2020).

Por lo tanto, hay que tener mucho cuidado a la hora de emplear el bambú inmerso en cemento (**Figura 28**), dado que la caña puede absorber la humedad de la mezcla, estropeando la composición. En Guatemala, por ejemplo, se observó que, en una construcción en la que el bambú se empleaba como mallazo en el cemento, éste se había degradado por completo al cabo de 15 años. Y exactamente lo mismo pasó en Nicaragua, donde las fibras de bambú en tejas de cemento se degradaron también, produciendo la descomposición de las tejas. Estos ejemplos demuestran que no es aconsejable el empleo de bambú como elemento resistente en cemento si se desconoce su comportamiento y el modo adecuado de tratarlo previamente a su colocación (Falck, 2001).



Figura 28. Bambú inmerso en cemento.
Fuente: A2K Technologies.

Además, como sucede con el resto de productos de madera empleados en exteriores, cuando las cañas de bambú están expuestas a la intemperie, se suman a la humedad otras condiciones climáticas como las variaciones en la temperatura y la exposición directa al sol. Los rayos UV causan la ruptura de la capa de celulosa, mientras que el viento y las partículas de polvo tienen un efecto de chorro de arena en su superficie. La combinación de todos estos factores produce la erosión de los productos de bambú para exteriores (DeBambú, 2020).

En general, para proteger las cañas de bambú es recomendable evitar su contacto directo con el suelo, a menos que estén tratadas con un material sellador que pueda ofrecer la suficiente protección. Un sellador de bambú de alta calidad se caracteriza por su alta resistencia a la humedad y a la radiación ultravioleta, así como por contener un conservante hidrófugo como la cera, la parafina o la resina, y un aglutinante que minimiza la degradación, la contracción y la hinchazón.

Dado que el sellador reduce el volumen y la velocidad del intercambio de humedad entre las fibras del bambú y la atmósfera, debe ser aplicado en la superficie del bambú y en los nudos

naturalmente cerrados que queden expuestos en las partes inferior y superior de las cañas. Para una protección óptima, es aconsejable aplicar dos capas de sellador en el momento de instalación de las cañas de bambú. Posteriormente, es recomendable aplicar una capa de sellador anualmente o cada dos años, dependiendo de las condiciones climáticas (DeBambú, 2020).

Por otro lado, al tratarse el bambú de un material de origen vegetal, es normal preocuparse por el peligro de que arda, pero lo cierto es que resulta muy ignífugo y es fácil de tratar para que no se queme (Aldama, 2019), como ya se ha explicado anteriormente y como demuestra la **Figura 29**. Además, la preservación con bórax y ácido bórico que tradicionalmente se le aplica al bambú, contribuye a su protección ante el fuego (Poppens & Morán Ubidia, 2005).



Figura 29. Arroz cocinándose en el interior de una caña de bambú puesta al fuego.
Fuente: Lobo Nómada.

Cabe señalar que la susceptibilidad al fuego depende en gran medida de la posición en que se coloquen las cañas de bambú en la construcción pues, al tratarse de un material hueco, las unidades dispuestas en horizontal son menos susceptibles al fuego que las colocadas en diagonal o vertical (Escalona, *et al.*, 2017).

No obstante, la normativa existente establece que los elementos y componentes de bambú, deben ser sobredimensionados con la finalidad de resistir la acción del fuego por un tiempo adicional predeterminado (Ministerio de Vivienda, 2012). Asimismo, aquellas partes de la edificación próximas a las fuentes de calor, deben aislarse o protegerse con material incombustible o con sustancias retardantes o ignífugas, aprobados por la legislación y que garanticen una resistencia mínima de una hora frente a la propagación del fuego (Ministerio de Vivienda, 2012).

En el caso de estructuras vistas de bambú se aplicará un material de recubrimiento ignífugo similar a los aplicados en estructuras de madera para aumentar su resistencia frente a la combustión sin necesidad de engrosar su sección (Bambusa.es, s.f.a).

Por otra parte, uno de los inconvenientes que presenta el bambú es que, debido a su rápido crecimiento y a los pocos cuidados que necesita, puede llegar a afectar a las construcciones y cultivos cercanos si no es controlado adecuadamente.

Los rizomas (tallos subterráneos que constan a la vez de raíces y de brotes de los cuales saldrán las cañas de bambú) son muy duros y crecen con gran rapidez, por lo que la mejor solución es emplear barreras anti raíces. Antiguamente se empleaban barreras construidas con ladrillos o material de mampostería. Hoy en día la mejor solución son las barreras anti raíces fabricadas con plástico de polipropileno de 1 mm de grosor (Sarmiento, 2018), como puede verse en la **Figura 30**.



Figura 30. Barrera anti rizomas de plástico de polipropileno.
Fuente: DailyBreak.

Estas barreras son bastante rígidas y utilizarlas es simple, pues basta con preparar el agujero en el que se va a sembrar el bambú y cubrir toda la zona con la lámina de polipropileno, de modo que se limite el espacio que el bambú pueda cubrir. Es importante que la barrera sobresalga al menos 10 cm sobre la superficie de tierra, ya que las raíces del bambú pueden expandirse hasta el nivel del suelo (Kurtz, 2013).

Cabe mencionar que existen otras soluciones posibles, como las barreras anti raíces fabricadas con metal, hormigón o madera, pero éstas requieren mantenimientos periódicos que garanticen su efectividad, pues todas ellas se degradan con mayor facilidad y rapidez que el polipropileno. Las mallas anti hierbas no son efectivas, ya que los rizomas del bambú las atraviesan.

Dado que existen más de 1600 especies de bambú catalogadas (**Figura 31**), resulta fundamental conocer la especie de bambú que se desea plantar, pues algunas de ellas han sido declaradas como especies invasoras en determinados países, prohibiéndose pues su cultivo.



Figura 31. Diferentes especies de bambú.
Fuente: TodoBambú.

En España, la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad, define una especie exótica invasora (EEI) como *“aquella que se introduce o establece en un ecosistema o hábitat natural o seminatural y que es un agente de cambio y amenaza para la diversidad biológica nativa, ya sea por su comportamiento invasor, o por el riesgo de contaminación genética”*. Esta misma ley creó, en su artículo 64, el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras, en el que no se incluye ninguna especie de bambú.

Por último, es imprescindible comentar que el mayor inconveniente que presenta el bambú a nivel social es el de ser un material desconocido y/u olvidado en la mayoría de los países, lo que provoca que se desconozca su verdadero potencial (Aldama, 2019). Por ello, son muy pocos los países que tienen normativas que regulen el uso del bambú.

Como explicó Borja de la Peña, barcelonés responsable de las políticas globales de INBAR, en una entrevista para el periódico El País, *“existen normativas para la madera, pero el bambú es una planta herbácea y hay mucha confusión sobre la clasificación a la que pertenece”*, lo que dificulta su estandarización (Aldama, 2019).

La normalización es fundamental para estimular el desarrollo de la industria del bambú, por lo que la organización INBAR trabaja en estrecha colaboración con la Organización Internacional de Normalización (ISO) para elaborar, publicar y establecer normas, estándares y certificaciones de este material, así como de la fabricación de productos derivados de él (INBAR, 2019a).

Con el asesoramiento de INBAR, en 2019 se publicó la norma ISO 22157:2019, que ofrece orientación respecto a cómo analizar las propiedades físicas y mecánicas de las cañas de bambú como material de construcción. También se han aprobado otras propuestas de nuevas normas y se han presentado varias más, como se explicará más adelante (INBAR, 2020b).

2.1.4. USOS DEL BAMBÚ

Hay más de 1600 especies de bambú catalogadas (Aldama, 2019), cada una de ellas con características propias y diferentes a las del resto, lo que ofrece una amplia variedad de aplicaciones y usos (Baladrón Laborda, 2018). Sirva como representación de su versatilidad la muestra de objetos recogidos en la **Figura 32**.

Si hay un país que sabe sacarle todo el partido que ofrece, ese es China, donde crecen alrededor de 400 especies y el bambú ha sido utilizado desde hace más de 7000 años. Con él se fabrican barcas, mobiliario, esterillas, instrumentos musicales, jarrones, toallas, servilletas, e incluso almohadas, que tienen muy buena acogida entre las personas de la tercera edad (Aldama, 2019).

En Japón, desde hace más de 3000 años el bambú se ha visto estrechamente ligado a los principios del Feng-Shui, que buscan la armonía total en todas las cosas, en el propio ambiente y en la relación entre el hombre y el medio que le rodea. Esta visión les ha permitido valorar inteligentemente el bambú y encontrar multitud de posibles aplicaciones (Aristizabal, 2016).

Desde la década de 1990, las nuevas tecnologías también han permitido el uso del bambú como fuente de papel, embalaje, muebles y tela (INBAR, 2019a). También se pueden fabricar gadgets, fundas de dispositivos móviles, juguetes, suelos, cortinas, utensilios domésticos, vajillas desechables, figuras decorativas o, por ejemplo, maceteros y cestas (Isan, 2017b). En el ámbito musical, se emplea para hacer flautas y tambores; en el deporte, para fabricar bicicletas, tablas de surf y bates. Su flexibilidad es aprovechada en joyería, donde se utiliza para crear pulseras, aretes, collares y otros accesorios; mientras que en cocina se fabrican tablas de cortar, vajillas, cubiertos y muchos más elementos (Monouso, 2020).



Figura 32. Utensilios cotidianos fabricados con bambú.
Fuente: Balones de Madera.

Pero la versatilidad del bambú no se detiene ahí. También sirve para desarrollar textiles con fibras ecológicas (**Figura 33**), que se utilizan en la fabricación de ropa de cama, ropa interior y todo tipo de ropa y complementos de moda. Entre sus propiedades, los textiles desarrollados con bambú son muy suaves, absorbentes y antibacterianos (Isan, 2017b). Además, cuentan con propiedades antimicóticas y son transpirables, hipoalergénicos y termoclimáticos. Son estas bondades las que permiten crear, además de los artículos ya mencionados, toallas, sábanas y mantas ligeras (como las nanas y cobijas empleadas para envolver bebés) beneficiosas por igual para la salud de niños y adultos (Monouso, 2020).

Mónica Muriel, fundadora de Zurita en Shanghái, convierte el bambú en un elemento de moda al utilizarlo en prendas de lo que se conoce como lujo asequible. *“Nosotras seguimos la clasificación que hace The Reformation sobre la sostenibilidad de los tejidos, donde se califican con una A los más ecológicos y con una E los más dañinos para el medioambiente. El tejido derivado del bambú se llama lyocell y está clasificado como A, transpira, es suave, es cómodo y*

se puede lavar en lavadora. Además, crece de forma local en China, no requiere fertilizantes, apenas consume agua y no hay que cortarlo de raíz. Todo eso está relacionado con la sostenibilidad de la ropa y reduce la huella ecológica del tejido”, explica Muriel (Aldama, 2019).

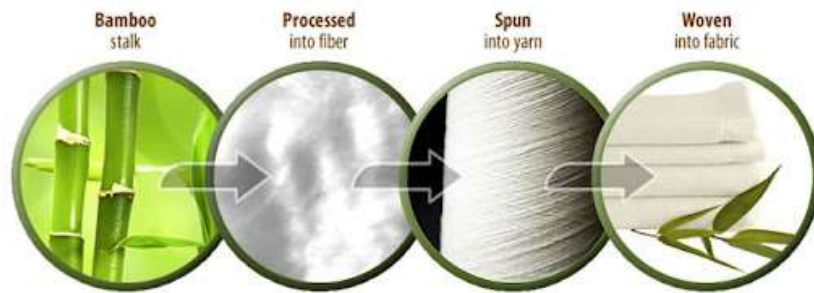


Figura 33. Proceso de fabricación de textiles a partir de bambú.
Fuente: Mil Dedales.

Por otra parte, es cierto que el bambú supone una parte fundamental en la alimentación de varias especies en peligro de extinción, como el panda gigante, el panda rojo, el gorila de montaña, el mono de las montañas de Bale y el lémur grande del bambú (INBAR, 2019a), pero, como se aprecia en la **Figura 34**, también existen especies de bambú, como la *Phyllostachys pubescens*, que el ser humano consume disecadas, enlatadas o en forma de brotes frescos, como condimento o guarnición, sin olvidar su uso para elaborar bebidas fermentadas (Isan, 2017b).

Al bambú se le atribuyen las mismas propiedades nutricionales que a la cebolla, específicamente el ser rico en potasio y vitamina A. Cuenta con hasta 17 aminoácidos, y su sabor es descrito como una agradable mezcla de alcachofa con manzana (Monouso, 2020).

También se le atribuyen propiedades terapéuticas. Wróblewska y sus colaboradores, en “*Medicinal Properties of Bamboos*”, recogen las principales propiedades medicinales del bambú, entre ellas, su capacidad para ayudar contra el asma, la hemoptisis (expulsión de sangre por vía oral) por lesión de las vías respiratorias y las hemorroides, mientras que su elevado contenido en sílice tiene propiedades de control de veneno (Wróblewska, *et al.*, 2019). Otros beneficios para la salud se derivan del consumo de sus hojas, como, por ejemplo, el mantenimiento de los niveles de azúcar en la sangre, la reducción del colesterol o la desintoxicación del cuerpo, como demuestran Shukla y sus colaboradores en “*Medicinal Importance of Bamboo*”. También se ven incidencias en la reducción de úlceras y el fortalecimiento del cabello (Shukla, *et al.*, 2012).



Figura 34. Bambú en conserva.
Fuente: Zhangzhou Hang Fat Import & Export Co., Ltd.

En relación al sector de la construcción, su rápido crecimiento y maduración (de cuatro a siete años) y su naturaleza similar a la madera hacen de ciertas especies de bambú, como la *Guadua angustifolia Kunth*, un excelente material para la construcción de viviendas y andamios (INBAR, 2019a). En ciudades como Hong Kong, sorprende que incluso los rascacielos se construyen o reforman con andamios de bambú (**Figura 35**), cuya flexibilidad les proporciona una mayor resistencia a los tifones que la de los andamios metálicos (Aldama, 2019).

Con bambú se construyen casas, cobertizos, vallas, muros, andamios, tuberías, pilares, vigas, acueductos, etc. Su uso para fortificar el hormigón armado es un ejemplo de su enorme

potencial en el sector de la construcción, sobre todo teniendo en cuenta que requiere menos recursos energéticos y que produce un menor impacto ambiental que los materiales convencionales (Isan, 2017b).

Al tratarse de un producto leñoso, y por tanto maderable, el bambú puede convertirse en *pellets* y utilizarse como combustible en forma de biomasa. Además, investigaciones recientes han demostrado nuevas aplicaciones de la biomasa del bambú, como que contribuye en la recuperación de los suelos, pues reúne características nutricionales muy favorables que mejoran de manera significativa la actividad biológica, la estructura y la consistencia (Cairo Cairo, *et al.*, 2018).



Figura 35. Andamio de bambú en un rascacielos.

Fuente: Alejandro Csome.

De hecho, la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires (FAUBA), en conjunto con el Instituto de Botánica Darwinion, perteneciente al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), han realizado un estudio científico que demuestra que el biocarbón de la especie de bambú *Guadua chacoensis* presenta excelentes propiedades como absorbente de contaminantes en el agua. En el estudio se empleó agua contaminada con azul de metileno (un producto contaminante empleado para teñir telas) y arsénico, en una proporción de 10 miligramos de arsénico por litro de agua, lo que supone mil veces más de lo recomendado por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los resultados demostraron que el biocarbón absorbió el 100% de los contaminantes (El Horticultor, 2019).

La Universidad de Lisboa, con base en estudios como el recientemente explicado, considera que, en el nuevo paradigma de la conservación de los recursos acuíferos en Europa, y de su biodiversidad, el bambú va a desempeñar un gran papel como herramienta tecnológica natural, reciclando nutrientes y capturando moléculas contaminantes en aguas residuales (Aldama, 2019).

Más allá de su uso como biomasa, el bambú también está siendo investigado como fuente de energía térmica y eléctrica. Dentro de estas iniciativas, destaca la investigación desarrollada por un grupo de estudiantes de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Nacional de Colombia, quienes han logrado la conversión del bambú en energía aprovechando su proceso de fotosíntesis. Si bien todavía produce unos modestos 8 voltios, es suficiente para cargar un teléfono móvil, y el trabajo aspira a aplicar este mecanismo a gran escala en el futuro (Isan, 2017b).

En conclusión, el bambú se ha utilizado tradicionalmente en el sector de la construcción, en artesanía y para papel, paneles, tableros, laminados, suelos, techos, tejidos, aceite, gas y carbón vegetal, además de aportar una verdura comestible saludable como son los brotes de bambú (Lobovikov, *et al.*, 2007).



Figura 36. Muebles de IKEA fabricados con bambú, ratán y mimbre.

Fuente: Zhangzhou Hang Fat Import & Export Co., Ltd.

Al apostar por este material, China y Japón han desarrollado ventajas aplicadas al campo industrial, con excelentes resultados económicos, enorme rentabilidad, amplio protagonismo de productos en los mercados internacionales y un desarrollo tecnológico efectivo para su procesamiento (Aristizabal, 2016). Por lo tanto, se puede determinar que la industria del bambú está actualmente en auge en Asia, mientras que en otros

continentes como África y América se está extendiendo progresivamente (Lobovikov, *et al.*, 2007).

Sin embargo, el bambú no termina de encontrar su hueco en Europa y son pocas las empresas que, como IKEA, fabrican y comercializan muebles y otros productos de bambú (**Figura 36**). Es por ello que INBAR tiene entre sus objetivos que los gobiernos de los países desarrollados regulen el uso del bambú y agradece que políticos como el ex ministro español de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación Josep Borrell Fontelles se interesen por las iniciativas de la organización (Aldama, 2019).

2.1.5. PRINCIPALES PAÍSES PRODUCTORES DE BAMBÚ

El bambú es un importante Producto Forestal No Maderable (PFNM) y sustituto de la madera. Se encuentra en todas las regiones del mundo, como componente de los bosques naturales y, cada vez más, en plantaciones (Lobovikov, *et al.*, 2007). Las más de 1600 especies conocidas, ocupan una amplia gama de entornos en todo el mundo, principalmente en ecosistemas de climas tropicales templados y cálidos en África, Asia y América Central y del Sur (INBAR, 2019a).

INBAR, en su condición de organismo internacional de producto básico para el bambú y el ratán, produce informes anuales sobre el estado del sector del bambú y el ratán a nivel mundial y en China. En su resumen comercial del año 2016, estimó que el mercado del bambú y el ratán tiene un valor cercano a los 60 mil millones de dólares al año, siendo China el país con el sector de bambú y ratán más grande del mundo, con una producción total estimada de 32 mil millones de dólares al año. A nivel mundial, el valor del comercio internacional anual del sector del bambú y el ratán se estima en 2.500 millones de dólares (INBAR, 2016).

La extensión de bambú es difícil de medir, puesto que son especies que suelen presentarse en pequeñas zonas dentro del bosque o como parcelas aisladas fuera de ellos. No obstante, el informe principal de Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales 2010 (FRA 2010), establece que el área total de la superficie mundial cubierta por bambú en dicho año era de, aproximadamente, 31.5 millones de hectáreas. Esta cifra fue estimada mediante la información recibida de 33⁵ de los países en los que abunda el bambú y permite considerar que el área total de bambú aumentó 1.6 millones de hectáreas (cerca de un 11%) entre 1990 y 2010. No obstante, es evidente que se precisa una mejor comunicación interna y unas evaluaciones más exactas del área de bambú en muchos países (FAO, 2010).

Según la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), los principales países productores de bambú son Brasil (9.3 millones de hectáreas), China (5.7 millones de hectáreas) e India (5.5 millones de hectáreas), seguidos de la República Democrática Popular de Lao, Nigeria y Vietnam, con aproximadamente 1.5 millones de hectáreas cada uno.

Por otra parte, la FRA 2010 no refleja la existencia de bambú en Europa y, aunque es cierto que no es autóctono ni se reproduce de forma natural en ella, algunos países europeos sí que cuentan con cultivos y plantaciones de bambú.

⁵ Para la estimación se utilizó la información aportada por 20 países en el año 2010, la recibida por otros 12 en el año 2005 y la indicada por Indonesia en el año 2000. Otros 98 países fueron consultados, pero reportaron no tener zonas de bambú en su territorio. Toda la información relacionada con el cálculo puede encontrarse en el FRA 2010.



Figura 37. *Bamboueraie de Prafance.*

Izquierda: Laberinto de bambú. Centro: Bosque de bambú. Derecha: Paseo entre los bosques de bambú.

Fuente: Association des Parcs & Jardins du Languedoc-Roussillon – Praedium Rusticum.

En Occitania (al sur de Francia), por ejemplo, se encuentra en el Parque Nacional de Cévennes el bosque de bambú más grande de Europa: la *Bamboueraie de Prafance* (**Figura 37**). Esta enorme plantación de bambú fue creada por Eugène Mazel y recuperada y enriquecida por Gaston Nègre y su familia tras una terrible helada que, en 1871, arruinó buena parte de la propiedad (El Guisante Verde Project, 2019).

También en España ha comenzado a integrarse el bambú mediante la puesta en marcha de diversas experiencias y cultivos. Como demuestra la **Figura 38**, ejemplo de ello es el cultivo experimental de bambú que la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE) de la Universidad de Granada (UGR), en colaboración con Caja Rural de Granada, puso en funcionamiento en el año 2018 en la finca "La Nacla", ubicada en el municipio de Motril (Granada, España). La plantación no sólo sigue adelante a día de hoy, sino que, además, en abril de 2021, incorporó al cultivo 7 nuevas especies de bambú.



Figura 38. *Cultivo de bambú en la finca experimental "La Nacla", ubicada en Motril (Granada, España).*

Izquierda: Julio de 2018. Centro: Octubre de 2018. Derecha: Septiembre de 2019.

2.2. EL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN

El bambú tiene multitud de usos distintos en el sector de la construcción debido a la gran versatilidad que presenta. Alrededor del 80% del consumo de bambú de Asia es para su utilización como material de construcción y otros usos locales (Francis, 1993) y se estima que, en la actualidad, alrededor de mil millones de personas viven en casas construidas con bambú (Liese & Düking, 2009).



Figura 39. Vivienda social de bambú en Las Lisas (Santa Rosa, Guatemala).
Fuente: Planos y casas.

Como dijo Coosje Hoogendoorn, directora general de la sede de Pekín (China) de INBAR durante los años 2006 a 2014, “El bambú absorbe CO₂ a través de la fotosíntesis y lo retiene en sus fibras y en el suelo donde crece. Por lo tanto, una de las principales maneras en las que puede usarse para afrontar el cambio climático es construyendo viviendas de bajo costo, sostenibles y resistentes al clima. Su fuerza y flexibilidad lo convierten en uno de los mejores materiales para soportar inundaciones, tormentas y terremotos” (Diario ecología, 2011).

Y es precisamente porque las viviendas de bambú son muy resistentes ante los seísmos y porque son económicas de construir, por lo que existen proyectos sociales que las construyen como viviendas sociales para los más desfavorecidos (**Figura 39**), como es el caso del proyecto “Bambú Social” desarrollado en Nicaragua (Aldama, 2019), el cual se explicará detalladamente más adelante.

Sin embargo, dado que se asociaba con las clases sociales más pobres, durante los siglos XIX y XX el uso del bambú en la construcción de viviendas disminuyó. Afortunadamente, a finales del siglo XX, gracias a los estudios realizados sobre el bambú, a las ferias internacionales organizadas y al desarrollo de innovadores procesos industriales que han permitido desarrollar nuevos productos como el bambú laminado, la imagen de este producto se ha renovado, mostrando que en el sector de la construcción el bambú tiene por delante un futuro lleno de posibilidades (Soler Soler, 2017), como se aprecia en la **Figura 40**.

Las especies más utilizadas actualmente en el sector de la construcción son: *Guadua angustifolia* Kunth, *Bambusa vulgaris*, *Bambusa blumeana* (Spiny/Thorny), *Dendrocalamus asper* (Petung), *Dendrocalamus strictus* (Calcutta), *Phyllostachys edulis* (Moso) y *Gigantochloa apus*. Cada una de ellas presenta características y propiedades diferentes, por lo que pueden ser empleadas en distintos campos del sector de la edificación (Baladrón Laborda, 2018).

En general, se recomienda que el bambú utilizado esté seco (con una humedad inferior al 20%) y que tenga entre 4 y 6 años de edad. Además, no debe tener fisuras en los entrenudos, ni estar dañado por la acción de insectos u hongos, debiendo ser limpiado si presenta hongos o líquenes que no hayan dañado la caña. Siempre deben emplearse cañas lo más rectas posibles, con una excentricidad máxima de 0.33%, escogiendo el tercio inferior de los culmos (donde están más juntos los nodos y la pared es más gruesa) para su uso como columnas (Soler Soler, 2017). Además, debe aplicársele la preservación tradicional de bórax y ácido bórico, que contribuye a su protección ante el fuego (Poppens & Morán Ubidia, 2005).



Figura 40. Casa Atrévada, diseñada por el estudio Luz de Piedra Arquitectos.
Fuente: Sergio Pucci.

2.2.1. PRODUCTOS DERIVADOS DEL BAMBÚ

Al igual que la madera, el bambú es un material polivalente y que puede industrializarse para obtener productos derivados (**Figura 41**). Más allá de las piezas en rollizo, las empresas productoras son capaces de transformar este material para mejorar sus prestaciones y/o aprovechar los restos procedentes del proceso de producción (Baladrón Laborda, s.f.).

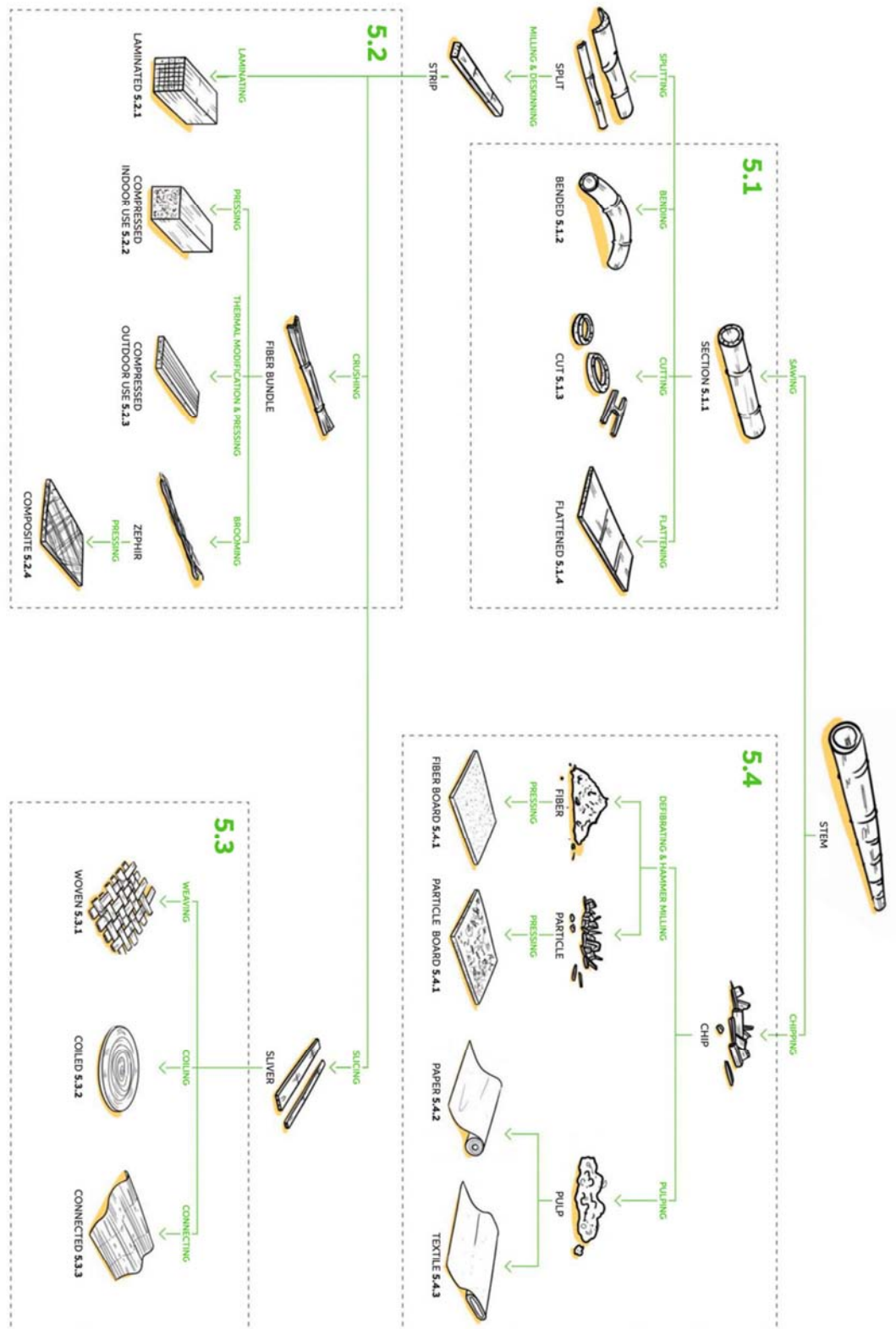


Figura 41. Esquema resumen de productos derivados del bambú.
Fuente: Booming Bamboo (Pablo van der Lugt, 2017).

La **Figura 41** contiene un esquema resumen de los productos derivados del bambú, obtenido del libro *“Booming Bamboo”*, de Pablo van der Lugt. Este autor es el único que recoge en su obra todos los productos derivados del bambú existentes, por lo que se ha tomado como referencia y punto de partida para el desarrollo de este apartado, siendo complementados sus conocimientos con los de otros autores y con los de la autora de esta Tesis Doctoral, con base en sus respectivas investigaciones y en su experiencia personal.

2.2.1.1. Culmo de bambú (*Bamboo stem*)

El culmo o tallo de bambú es la apariencia más conocida de este material y supone el punto de partida de muchos productos derivados de él que pueden fabricarse al procesarlo mecánicamente (aserrado, rebanado, doblado, aplanado, etc.). Además, por sí solo el tallo de bambú puede actuar como material de construcción, aunque, debido a su forma, puede resultar difícil construir con él (van der Lugt, 2017).

Sin embargo, en América del Sur, suelen utilizarse agrupaciones de culmos arriostrados entre sí (habitualmente de *Guadua angustifolia*) para construir los pilares de las edificaciones de más de una planta, aportando así una mayor resistencia a la estructura.

- **Sección del culmo de bambú (*Bamboo section*)**

Se trata del tronco del bambú, sin ramas, hojas ni raíces (**Figura 42**). En la parte inferior de la caña el diámetro de los nodos y el grosor de la pared es mayor. Además, la separación entre cada nodo es menor, por lo que la parte inferior del culmo es la más resistente (Soler Soler, 2017).



Figura 42. Culmos de bambú *Guadua angustifolia* Kunth.
Fuente: *Bambú Export*.

Una vez cosechado, a las cañas de bambú debe aplicárseles un tratamiento químico (por ejemplo, una solución de bórax), térmico o de humo (van der Lugt, 2017).

Debido a la forma circular de su sección, los culmos de bambú pueden ser empleados en su forma natural con fin estructural (como pilares y vigas), en particiones y cerramientos (como montantes, arriostramientos, etc.) o para conformar elementos auxiliares (tejas, canalones, andamios, etc.) (Baladrón Laborda, 2018).

Para lograr una mayor resistencia de los elementos portantes contruidos con culmos de bambú en su estado natural, es habitual emplear agrupaciones de culmos unidos entre sí mediante elementos de conexión de diferente naturaleza: desde cuerdas, pernos y abrazaderas metálicas hasta complejos sistemas metálicos de conexión (**Figura 43**).

En los techos, los culmos de bambú pueden emplearse como vigas, sustituyendo la madera que tradicionalmente sostiene las tejas. Esto puede reducir el coste a, aproximadamente, un 34% del precio estimado si, en lugar de emplear vigas de pino curado, se empleasen vigas de bambú (Falck, 2001).

Sin embargo, debido a la falta de códigos de construcción, sistemas de clasificación de calidad y resistencia, y la irregularidad del material, el uso del tallo de bambú en los países occidentales su uso está limitado a propósitos específicos como construcciones temporales, esculturas y carpas. Curiosamente, sucede todo lo contrario en los países productores de bambú, donde

tiene un potencial mucho mayor para su aplicación masiva en la industria de la construcción (van der Lugt, 2017).



Figura 43. Conexiones metálicas desarrolladas por Markus Heinsdorff.
Fuente: Markus Heinsdorff.

- **Bambú doblado (*Bended bamboo*)**

El bambú puede doblarse mediante un tratamiento térmico sencillo como, por ejemplo, con soplete (**Figura 44**). La lignina que sostiene las fibras de celulosa es termoelástica, lo que permite que el tallo de bambú se doble y mantenga su forma doblada después de enfriarse. Otra forma de doblar el bambú es quitando material o haciendo incisiones en forma de V, preferiblemente justo debajo de los nudos. Además, algunos tallos de bambú ya están curvados por naturaleza, por lo que se puede forzar y fijar el tallo ya curvado aún más, alcanzando curvaturas de más de 90° sin ninguna intrusión mecánica, incluso con grandes tallos de bambú. Esta deformación puede forzarse también durante el crecimiento colocando un molde sobre el brote, lo que hará que el tallo se curve en una determinada forma (van der Lugt, 2017).



Figura 44. Proceso de doblado de un culmo de bambú mediante soplete.
Fuente: Guadua Bamboo.

Los tallos de bambú más delgados se utilizan en el desarrollo de piezas de muebles curvas, pero también se puede usar para otros artículos más pequeños como juguetes y objetos domésticos. Además, los tallos de bambú curvados también pueden ser útiles en la construcción, ya sea de forma decorativa (por ejemplo, barandillas) o con fines estructurales.

- **Bambú cortado o rebanado (*Cut bamboo*)**

Este producto tan distintivo se obtiene de una manera muy simple. Basta con cortar el culmo de bambú transversalmente o serrarlo de manera perpendicular, diagonal o longitudinal. Cortar o rebanar el tallo de bambú brinda muchas oportunidades de aplicación, particularmente en el diseño de interiores y mobiliario al combinarlo con otros materiales y otros colores (**Figura 45**). También pueden usarse secciones transversales del culmo como material central en un panel sándwich con paneles delgados de madera o chapa de bambú en las partes superior e inferior, lo que da lugar a un panel liviano y potencialmente de bajo costo con muchas posibilidades (van der Lugt, 2017).



Figura 45. Muebles fabricados con bambú cortado.
Fuente: Aga Khan Foundation.

- **Bambú aplanado o esterilla (*Flattened bamboo*)**

El bambú aplanado es un subproducto del bambú que se obtiene cortando longitudinalmente y abriendo la caña de bambú de forma que parezca una alfombra (Isan, 2017a). Habitualmente, se realiza empleando la parte basal o intermedia del tronco. Para ello, se realizan cortes longitudinales sucesivos en la caña, tras lo que se abre y se retiran los diafragmas y los tejidos blandos con ayuda de una pala o “palín” (Soler Soler, 2017).



Figura 46. Esterilla de bambú *Guadua angustifolia* Kunth.

Fuente: *Guadua Bamboo*.

Este proceso se puede hacer de una manera mecánica tosca, lo que da como resultado una tabla gruesa y agrietada, conocida como “esterilla” en América del Sur (Figura 46), o mediante un tratamiento de vapor más suave en combinación con una malla de incisiones en la parte posterior para asegurar que el bambú no se doble hacia atrás, lo que produce sofisticadas tablas para suelos. Una ventaja de esta técnica es que apenas hay residuos (lo que proporciona beneficios medioambientales y de costes) y la parte exterior del bambú se mantiene intacta (van der Lugt, 2017).

Para la elaboración de esterillas es recomendable emplear cañas frescas de entre 2 y 3 años de edad, que aún conserven la humedad (SENCICO, 2014).

En general, este material se emplea en la construcción de paredes, falsos techos, puertas, ventanas y muebles (Isan, 2017a), además de como elemento decorativo en paredes y rejas. Por su precio, habitualmente se emplea la esterilla como lámina en viviendas de bajo costo para paredes y suelos, mientras que las tablas de bambú aplanadas tratadas con vapor, más estéticas, se utilizan a menudo como suelo debido a su capa superior robusta, dura (densidad aproximada de 850 kg/m³) y resistente al desgaste (van der Lugt, 2017).

Además, se utiliza como encofrado para el hormigón y como elemento estabilizador cuando se emplean cañas para construir paredes y/o cubiertas (Soler Soler, 2017).

2.2.1.2. Tira o listón de bambú (*Bamboo strip*)

La tira o listón de bambú (Figura 47) es el componente más importante de la industria del bambú, ya que a partir de él se componen muchos de los materiales empleados en la ingeniería del bambú, como el bambú laminado y el bambú tejido (van der Lugt, 2017).



Figura 47. Tiras de bambú *Guadua*.
Fuente: *Bambukindus S.A.S.*

Los listones son segmentos longitudinales de la caña de bambú que se obtienen partiendo de una esterilla y realizando cortes sucesivos paralelos a las fibras (Soler Soler, 2017), después de lo cual se quitan la capa exterior y la capa interior en una máquina cepilladora. Los cortes se pueden hacer empleando desde medios humildes como cuchillos especializados y cortadores radiales hasta sistemas mecánicos para la fabricación industrial de listones (SENCICO, 2014).

Las tiras tienen un color amarillo claro natural, pero se pueden cocer al vapor para que adquieran un color marrón claro (caramelo) o tratar térmicamente para que adquieran un color marrón oscuro (chocolate) (van der Lugt, 2017).

- **Bambú laminado (*Laminated bamboo*)**

Los elementos laminados (**Figura 48**) son piezas obtenidas a partir de latillas extraídas de la parte basal del culmo del bambú (es decir, de los primeros 8 a 12 metros de un tallo de bambú *Guadua*, el más empleado en este tipo de elementos), a las que se les elimina la parte interior y exterior, lo que da lugar a listones de sección rectangular de unos 5 milímetros de grosor (Stamm, 2008). Estas latillas rústicas se procesan y convierten en latillas totalmente secas (SENCICO, 2014). A continuación, dichos listones se ensamblan y apilan entre sí (normalmente creando 4 o 5 capas), tras lo que se unen con pegamentos o mediante calor y alta presión (Soler Soler, 2017).



Figura 48. Tableros de bambú laminado hechos con *Guadua*.
Fuente: Hangzhou Zen Bamboo and Hardwood Products Co., Ltd.

Debe existir un control de calidad de cada paso y componente del proceso, partiendo de los bosques de bambú donde se planifica y realiza el corte y aprovechamiento de los culmos con destino al tipo de producto de laminado que se requiere (SENCICO, 2014).

Además, los elementos de bambú laminado (vigas, paneles, tableros, etc.) pueden impregnarse con biocidas aprobados por la Unión Europea para aumentar su durabilidad, lo que permite su aplicación en exteriores (van der Lugt, 2017).

El bambú laminado se puede usar para crear materiales estéticos, de alta calidad y de dimensiones diferentes, desde láminas delgadas hasta grandes vigas. Por lo tanto, empleando laminados de bambú se pueden obtener elementos constructivos como tablas, columnas, vigas, paneles y suelos (SENCICO, 2014). Por lo tanto, los laminados de *Guadua* se presentan como una alternativa factible para la construcción de estructuras para las cuales la *Guadua* en su estado rollizo presenta limitaciones (López & Correal, 2009).

Una vía de producción alternativa para el bambú laminado es cortar láminas delgadas de chapa de un gran bloque de bambú laminado gigante. También es posible obtener chapa desenrollada de bambú, aunque su calidad y rendimiento son considerablemente inferiores a los de la chapa de bloque, lo que explica que sea menos utilizada (van der Lugt, 2017).

Los primeros paneles de bambú laminado fueron desarrollados en China en 1982, donde hoy en día se producen a escala de industrialización hasta una densidad de 1200 kg/m³. Además, son absolutamente impermeables y pueden ser utilizados para la restitución de maderas duras de bosques primarios (Minke, 2010).

López y Correal, en su estudio publicado en 2009 titulado “Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural”, determinaron que la densidad promedio de los laminados de *Guadua angustifolia* es de 715 kg/m³, con un contenido promedio de humedad 12%, lo que supone un buen indicador de rigidez. Por ello, concluyeron que “*los laminados de Guadua se proyectan como un material alternativo de ingeniería de fabricación industrial, con excelente resistencia y ambientalmente sostenible*”.

- **Fibras de bambú tejidas para uso interior (*Strand woven bamboo – Indoor use*)**

A principios de la década de 2000, se desarrolló una nueva tecnología de producción en la que los haces de fibra de bambú en bruto (triturados activamente para aumentar el área potencial de unión del pegamento) se sumergen en una resina, después de lo cual se presan en frío en moldes de alta compresión (aumentando la densidad de 700 kg/m³ a 1050 kg/m³). Después de esto, el pegamento se activa en un horno para producir vigas y paneles de alta densidad. El resultado es un material extremadamente duro con un aspecto que difícilmente se puede distinguir de la madera dura tropical y que, en función de los parámetros de producción, ofrece una calidad (estabilidad, durabilidad, dureza) diferente. Por ejemplo, mediante una trituración y prensado en caliente más controlados, se pueden crear paneles adecuados para tráfico extremadamente pesado y uso semi al aire libre, como en los pasillos de las estaciones de tren y en los establos de caballos (van der Lugt, 2017).

Este producto también se conoce como bambú de alta densidad o rejilla de bambú y, además de sus buenas propiedades mecánicas, otro beneficio que ofrece es que se pueden utilizar como



Figura 49. Parquet realizado con fibras de bambú tejidas.

Fuente: Bothbest Bamboo Flooring.

material de entrada tiras que no son aptas para producir productos laminados debido a sus dimensiones. El bambú de alta densidad está disponible en vigas y tablonos y, debido a su alta dureza y a su aspecto de madera dura, se usa habitualmente en tableros de mesa y como suelo, como puede apreciarse en la **Figura 49**. Debido a su alto peso relativo, su uso para vigas estructurales es limitado, aunque su buena resistencia a flexión se puede utilizar en algunas otras aplicaciones interiores, como escaleras de apoyo, balcones y pasarelas (van der Lugt, 2017).

- **Fibras de bambú tejidas para uso exterior (*Strand woven bamboo – Outdoor use*)**



Figura 50. Suelo de bambú de alta densidad diseñado para exteriores.

Fuente: BWG Bamboo Vietnam.

A diferencia de lo que sucede con el bambú de alta densidad para uso interior, en este caso las tiras de entrada se modifican primero térmicamente para aumentar su durabilidad a la clase más alta posible (clase de durabilidad 1 según EN 350), lo que también aumenta la estabilidad dimensional (encogimiento/hinchamiento). Además, el prensado y la activación del pegamento se producen al mismo tiempo (prensado en caliente). Debido al mayor contenido de resina y compresión, este producto tiene una densidad aún mayor (1200 kg/m³), lo que también resulta en una muy alta resistencia al fuego (Euroclase B - EN 13501-1) sin impregnación con retardadores de fuego. Sin embargo, debido

a la modificación térmica, las tiras de entrada son más frágiles, lo que reduce el módulo E (10373 N/mm²) y la resistencia a la flexión (50.3 N/mm²). También se consume más energía y el impacto medioambiental es mayor que en el caso del bambú de alta densidad para uso interior (van der Lugt, 2017).

Este producto se presenta en forma de paneles, vigas pequeñas y tablas y, debido a su mayor durabilidad, es ideal para utilizarlo en aplicaciones en las que normalmente se utilizan maderas duras tropicales, como tarimas, revestimientos y muebles de exterior (**Figura 50**). Dado que es un material resistente y duradero, también son posibles aplicaciones en el sector civil, como revestimiento de canales, tablestacas y puentes (van der Lugt, 2017).

- **Composite de bambú (*Bamboo composite*)**

El material base de los composites de bambú de alta calidad es el céfiro, que son haces de fibras finas y largas que se aíslan de las células del parénquima y se someten a un proceso llamado cepillado. El cepillado se puede hacer de varias maneras e implica la separación mecánica o química de los haces de fibras gruesas de los céfiros más finos y puros. Otra opción de producción es a través de la explosión de vapor seguida de la separación mecánica utilizando agujas de bloque. Los céfiros forman un bloque de construcción lineal anisotrópico fuerte que, si se combina en una estera o malla, se puede usar como preforma o preimpregnado en materiales compuestos. Como los céfiros son lo suficientemente grandes como para colocarse en una determinada dirección (alta rigidez y resistencia a la tracción, competitivo con la fibra de vidrio), en combinación con un aglutinante termoendurecible (alta resistencia a la compresión), pueden actuar como una malla en un uni (o iso) material compuesto direccional, que puede tener ventajas tanto mecánicas (máxima resistencia en una determinada dirección) como estéticas (moldeado en diferentes formas) (van der Lugt, 2017).

Debido a su excelente rendimiento mecánico, el composite de bambú (**Figura 51**) se utiliza para aplicaciones donde el peso ligero, la libertad de forma y la resistencia son atributos clave, como las industrias: automotriz, aeroespacial, de embarcaciones y de equipos deportivos (Chaowana & Barbu, 2017). Pero también puede emplearse para componentes de alta resistencia en la industria de la construcción, en infraestructuras y obras hidráulicas, por ejemplo, como revestimiento de canales, varillas de refuerzo, etc. (van der Lugt, 2017).



Figura 51. Composite de bambú.
Fuente: Chaowana y Barbu, 2017.

2.2.1.3. Latilla de bambú (*Bamboo Sliver*)

Las latillas son tiras finas de bambú que se obtienen de la parte media y superior del tallo, donde el grosor de la pared es menor. La fabricación de latillas es más fácil cuando la caña aún está verde. Generalmente, se producen mecánicamente, dividiendo las tiras de bambú varias veces. Esta división se puede realizar con máquinas especializadas o con un machete. Las latillas tienen a menudo una sección transversal rectangular, pero también pueden tener una sección transversal circular, por ejemplo, para su uso como material para producir cortinas (láminas hechas de latillas cosidas) (van der Lugt, 2017).



Figura 52. Mujer entrecruzando latillas de bambú.
Fuente: D'source.

Las latillas se emplean en la construcción de paredes de barro embutido, paredes de quincha, suelos, muebles y elementos de artesanía (Hidalgo López, 1974), como muestra la **Figura 52**. Las latillas pueden doblarse si se mantienen sumergidas en agua durante varias horas, adquiriendo una mayor curvatura cuanto mayor sea la longitud de la pieza. También pueden conectarse entre sí de diversas formas para producir distintos materiales de bambú.

A su vez, existe un subproducto derivado de las latillas: las correas de bambú. Las correas son elementos longitudinales similares a las latillas, pero más estrechas aún y obtenidas únicamente

de la parte más exterior de la caña de bambú, lo que las hace más flexibles. Se utilizan para hacer algunos objetos de artesanía y para unir latillas en paralelo (Soler Soler, 2017).

- **Bambú tejido (*Woven bamboo*)**

Uno de los procesos mejor conocidos y más empleados históricamente es el tejido de finas tiras y latillas de bambú para producir lo que se conoce comúnmente como alfombra o estera de bambú (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Habitualmente este proceso se realiza a mano, aunque pueden emplearse máquinas para ello. Para producir latillas adecuadas para tejer es recomendable usar bambú joven (1-3 años), siendo algunas especies más adecuadas que otras (van der Lugt, 2017).

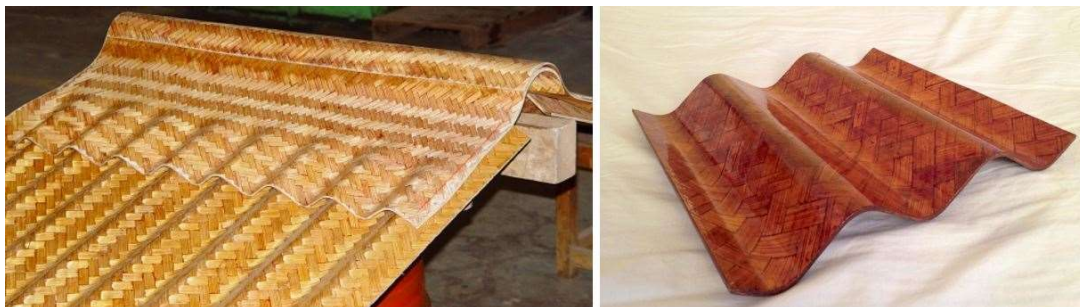


Figura 53. Bambú tejido. Izquierda: Estera de bambú tejido. Derecha: Panel ondulado de bambú tejido.
Fuente: Huellas de Arquitectura (izquierda) / Guadua Bamboo (derecha).

En Asia existe una larga tradición de tejido de bambú que se remonta a unos 6000 años, siendo considerado un arte en Japón. El tejido manual se enfoca en la fabricación de productos de uso diario como cuencos, cestas, jaulas para animales y alfombras. Sin embargo, en China se han introducido nuevas tecnologías de procesamiento para aplicar el bambú tejido al sector de la construcción. El tablero de estera de bambú, por ejemplo, se fabrica sumergiendo láminas de bambú tejido en resina, tras lo que se prensan en caliente y se curan para formar tableros duros y rugosos adecuados para diversas aplicaciones. Igualmente, las láminas se pueden prensar en varias formas, incluidas las de cartón ondulado (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), lo que proporciona una alternativa de bajo costo a las láminas de zinc que aún se usan para techos en los países en desarrollo (van der Lugt, 2017).

- **Bambú enroscado (*Coiled bamboo*)**

El bambú enroscado es una técnica procedente de Vietnam. En ella, las latillas de bambú de 1 mm de espesor se curvan primero en un rodillo. A continuación, se ensamblan herméticamente en un molde (generalmente un anillo de bambú), tras lo que se pueden colocar sobre otro molde tridimensional para crear la forma deseada para el producto final. Por último, se aplica un adhesivo en ambos lados, se lija y se colora (si así se desea). Este proceso requiere mucha mano de obra, pero la calidad estética del bambú enroscado es muy apreciada en el mercado occidental, por lo que se usa comúnmente para fabricar objetos decorativos para el hogar, como cuencos (**Figura 54**), jarrones, bandejas, muebles y lámparas (van der Lugt, 2017).



Figura 54. Cuencos de bambú enroscado.
Fuente: Mignon Shop.

- **Bambú conectado (*Connected bamboo*)**



Figura 55. Tapetes fabricados con bambú conectado de diferentes especies.

Fuente: Brightfields.

En lugar de tejer las latillas, también se pueden alinear una al lado de la otra y coser juntas por medio de un hilo para producir una gran estera comúnmente llamada cortina de bambú. En China, este proceso está altamente industrializado, utilizando máquinas especialmente diseñadas para la fabricación de cortinas de bambú. En lugar de un hilo, también se puede usar una tela flexible o látex para conectar los elementos de bambú separados. Las aplicaciones típicas de la cortina de bambú son como tapete (**Figura 55**), alfombra, cortina o cubierta de asiento de automóvil. Combinado con un respaldo de látex, sirve

como alfombra aislante del sonido. Además, debido a su flexibilidad, se puede usar en elementos curvos como lámparas, armarios y muebles (van der Lugt, 2017).

2.2.1.4. Viruta de bambú (*Bamboo Chip*)

Los elementos más pequeños que participan en la industria del bambú son las virutas y partículas de bambú, que son producidas a partir de bambú completo, el cual se introduce en una máquina con cuchillas situadas en unos determinados ángulos que aseguran que se creen virutas pequeñas con una superficie transversal lo más grande posible, lo que garantiza una compactación uniforme (en el caso de tableros de partículas y tableros de fibras) o la intrusión de productos químicos que digieren la pulpa (en el caso del papel y el textil). Igualmente, según la aplicación final, son más recomendables unas especies de bambú que otras (van der Lugt, 2017).

- **Tablero de fibra y tablero de partículas de bambú (*Bamboo fiber board & particle board*)**

El proceso de producción de tableros de partículas de bambú y MDF (fibropanel de densidad media) es muy similar al de su contraparte a base de madera. Sin embargo, en lugar de utilizar troncos completos como material de entrada, se utilizan desechos de otras industrias del bambú como materia prima (**Figura 56**).

En primer lugar, se lavan las virutas de bambú. Después, se refinan en un proceso de despulpado termomecánico

utilizando vapor para ablandar las virutas. A continuación, se muelen y se mezclan con resina. Tras el secado, las fibras se forman y se transportan en una cinta transportadora hasta una prensa continua en caliente que presiona las virutas de bambú conformando un tablero uniforme de densidad media (aproximadamente, 700 kg/m³) o alta (más de 800 kg/m³). Para la producción de tableros de partículas de bambú, las virutas deben tener un ancho y espesor de 1-5 mm y 1-20 mm de largo (van der Lugt, 2017).



Figura 56. La fibra de bambú se emplea en la fabricación de tableros MDF de bambú.

Fuente: Mohammad Jawaid.



Figura 57. Filamento de PLA/PHA de bambú para impresora 3D.
Fuente: Adafruit Industries.

Los tableros de fibra y partículas de bambú se utilizan en áreas similares a los tableros de fibra de madera, siendo especialmente empleados como contrapisos en suelos y como paneles semiestructurales no decorativos. Una aplicación más innovadora de la fibra de bambú es como relleno en gránulos adecuados para impresión 3D o moldeo por compresión, especialmente cuando se combina con una resina de base biológica como el ácido poliláctico (PLA) (Figura 57). Esto proporciona una alternativa ecológica al uso de plásticos en múltiples aplicaciones en las que la biodegradabilidad es un problema (van der Lugt, 2017).

- **Papel de bambú (Bamboo paper)**

El bambú es un excelente material para la industria del papel y el cartón debido a sus altos rendimientos, a sus fibras relativamente largas y a su buena resistencia físico-mecánica (Figura 58). El proceso para producir papel a partir de fibras naturales (incluido el bambú), se conoce como el proceso "Kraft", donde las virutas se mezclan y se calientan con agua, sulfuro de sodio e hidróxido de sodio (mezcla conocida como "licor blanco") para deslignificar las virutas y recuperar pulpa de celulosa. Durante este proceso se produce una cantidad considerable de residuos nocivos conocidos como "licor negro", que deben recuperarse y procesarse para evitar la contaminación de los ecosistemas. Después, se le agregan a la pulpa de celulosa agua y aditivos como carbonato de calcio, lo que blanquea la mezcla y permite producir papel (blanco). En este proceso, se requieren grandes cantidades de agua limpia, que se puede reciclar casi por completo en el sitio si el proceso está bien diseñado (van der Lugt, 2017).



Figura 58. Vajilla biodegradable de bambú.
Fuente: El Rincón Sostenible.

Sin embargo, a día de hoy, los procesos tradicionales de fabricación de papel no son respetuosos con el medio ambiente. Afortunadamente, se están desarrollando nuevas técnicas que incorporan procesos de biorrefinería más respetuosos con el medio ambiente y sistemas de circuito cerrado que reducen el impacto ambiental de la producción de papel y textiles de bambú (van der Lugt, 2017).

- **Textil de bambú (Bamboo textile)**



Figura 59. Fibras de diferentes materiales naturales.
Fuente: Tapicería Carrasco.

La celulosa de bambú también puede convertirse en rayón⁶ (también llamado viscosa) para la producción de textiles de bambú. El rayón de bambú tiene gran suavidad, pocas arrugas y buenas propiedades térmicas, aunque difiere poco de otras fibras naturales (**Figura 59**). Sin embargo, la producción de textil influye negativamente en el medioambiente, ya que el proceso de disolución de la pulpa implica varios productos químicos para producir una solución líquida de viscosa homogénea, la cual se somete a un baño de ácido sulfúrico que lo reconvierte en fibras de celulosa de bambú, que luego pueden hilarse en hilos de varios tamaños. Después de lavar, blanquear y secar, el hilo final se puede tejer o hilar para producir varios tipos de telas de bambú. En las prendas finales, el hilo de bambú generalmente se combina con otros materiales como el algodón para hacer la tela más resistente (van der Lugt, 2017).

Los disolventes utilizados en el proceso productivo se pueden mantener en un sistema de circuito cerrado para reducir el impacto ambiental, pero pueden ser peligrosos para la salud de los trabajadores. Por este motivo, algunos productores textiles han anunciado mejoras en el proceso productivo mediante la incorporación de nanotecnología, disolventes más ecológicos y/o nuevos procesos de producción de filamentos de celulosa como, por ejemplo, el Lyocell⁷ (van der Lugt, 2017).

El textil de bambú se puede utilizar en todo tipo de prendas, en particular, en aquellas donde las buenas características térmicas, táctiles e higroscópicas sean necesarias, como calcetines, ropa interior y camisetas (**Figura 60**).



Figura 60. Toalla fabricada con fibras de bambú.
Fuente: DH Gate.

⁶ El rayón o viscosa es una fibra de celulosa previamente solubilizada y posteriormente regenerada. Es una fibra muy versátil y tiene las mismas propiedades en cuanto a comodidad de uso que otras fibras naturales, pudiendo imitar el tacto de la seda, la lana, el algodón o el lino. Los tejidos de rayón son suaves, ligeros, frescos, cómodos y muy absorbentes, pero no aíslan el cuerpo, permitiendo la transpiración.

⁷ El Lyocell es un tipo de rayón. Consiste en fibra de celulosa, hecha a partir de la disolución de la pulpa, y luego reconstituida por hilatura en seco a chorro de agua. A diferencia del rayón, la producción de Lyocell no utiliza disulfuro de carbono, que es tóxico para los trabajadores y perjudicial para el medioambiente.

2.2.2. APLICACIONES DEL BAMBÚ EN LA CONSTRUCCIÓN

2.2.2.1. Con carácter estructural

El bambú puede emplearse para realizar pilares, vigas, pórticos, cerchas, arcos, etc. Uniendo varias cañas se pueden realizar todo tipo de estructuras, desde las más simples (como pudiera ser una cubierta como la de la **Figura 61**) hasta las más complejas (como un andamio de gran envergadura o un puente). La versatilidad del bambú se debe en gran parte a su estructura anatómica y morfológica, pues su sección circular ahuecada presenta algunas ventajas estructurales frente a las secciones rectangulares (Soler Soler, 2017).



Figura 61. Cubierta realizada con *Guadua*.
Fuente: Bambusa Estudio.

Pese a que existen más de 1600 especies de bambú catalogadas, los géneros más comúnmente utilizados en la construcción son los recogidos en la **Tabla 7**.

Tabla 7. Géneros de bambú más comúnmente utilizados en la construcción.
Fuente: Martínez García, 2015.

Género	Altura (m)	Diámetro (cm)	Procedencia más habitual
<i>Bambusa</i>	6 a 30	3 a 18	China, India, Birmania y Taiwán
<i>Chusquea</i>	4 a 6	2 a 4	Chile y Argentina
<i>Dendrocalamus</i>	20 a 35	20 a 30	India, Birmania, Sri Lanka y Taiwán
<i>Gigantochloa</i>	10 a 16	8 a 15	Malasia, Indonesia y Filipinas
<i>Guadua</i>	10 a 30	5 a 15	Colombia, Ecuador, México, Bolivia y Panamá
<i>Phyllostachys</i>	5 a 22	2 a 17	China y Japón

En Asia, predomina el uso del género *Dendrocalamus*, destacando las especies *Dendrocalamus giganteus* y *Dendrocalamus asper*, siendo dos de las más grandes que existen, con diámetros superiores a 30 cm y alturas de más de 30 metros. Ambas especies son empleadas, además de en el sector de la construcción, para la producción de papel y la elaboración de muebles. En América del Sur, el género que predomina es la *Guadua*, concretamente la especie *Guadua angustifolia*, que presenta un diámetro de entre 9 y 15 cm, aunque puede llegar a 21 cm si las condiciones climáticas son buenas. Esta especie puede alcanzar en menos de 1 año una altura de entre 15 y 30 metros (Martínez García, 2015). La **Figura 62** muestra ambos géneros.



Figura 62. Géneros de bambú más utilizados en la Construcción. Izquierda: *Dendrocalamus*. Derecha: *Guadua*.
Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de Plagas (Izquierda) / *Guadua* Bambú (Derecha).

Por otra parte, las características físico-mecánicas del bambú se pueden comparar con las de materiales tradicionalmente empleados en la construcción.

El hormigón trabaja bien frente a esfuerzos de compresión, pero al someterlo a esfuerzos de tracción falla con facilidad. El bambú, en cambio, presenta buena resistencia ante los dos esfuerzos. Con respecto al acero, ambos materiales dotan de flexibilidad a las estructuras y muestran una resistencia a flexión similar. Sin embargo, el bambú presenta peores prestaciones debido a que su unión con otros elementos puede provocar agrietamientos y que la estructura se debilite (Soler Soler, 2017).

Pero sin duda el material al que más se parece el bambú es a la madera pues ambos son materiales naturales de origen biológico que pueden presentar problemas de durabilidad. El sol, la lluvia y la humedad pueden acortar su vida útil, por lo que es deseable evitar su contacto directo con el agua y con el suelo, así como su exposición directa a la radiación solar. Además, ambos materiales pueden ser atacados por organismos vivos como insectos u hongos (Martínez García, 2015).

Se puede concluir por tanto que los lugares menos indicados para utilizar bambú en una edificación son los cimientos y las cubiertas, aunque en estas últimas es muy habitual encontrarlo, ya que su durabilidad sigue siendo aceptable (pese a verse reducida por los factores climatológicos) y la forma de las cañas es aprovechada para facilitar el desagüe de los tejados, evitando así acumulaciones de humedad (Martínez García, 2015).

Sin embargo, pese a lo recién comentado, en algunos países el bambú se ha empleado sumergido en cemento para reforzar losas o paredes como lo haría tradicionalmente el acero (**Figura 63**). Aunque los resultados preliminares son en su mayoría exitosos, aún deben estudiarse los resultados a largo plazo, pues en algunos casos el bambú no ha sido bien preparado antes de su implementación en la construcción, lo que ha dado lugar a que algunas cañas se pudran (Falck, 2001).



Figura 63. Armado de bambú de la solera de hormigón bastardo de cal y cemento de una vivienda ecológica situada en las afueras de Madrid (España) realizada por la empresa de bioconstrucción Econhouse.
Fuente: Bambusa Estudio.

No obstante, volviendo a la comparación entre el bambú y la madera, aunque la composición química de ambos materiales no difiere demasiado, el bambú es dos veces más resistente que la madera frente a la tracción, debido a la disposición de la celulosa y las microfibrillas en su interior (Soler Soler, 2017).

2.2.2.2. En cerramientos y revestimientos exteriores

El bambú puede ser empleado como cerramiento tanto en su forma natural de caña rolliza, como mediante laminados de bambú o en forma de latillas (**Figura 64**). Además, dependiendo del uso que vaya a tener la edificación, puede combinarse con otros materiales para obtener resultados más beneficiosos para los usuarios.



Figura 64. *Blooming Bamboo House en Hanoi (Vietnam), diseñada y construida en 2013 por H&P Architects. Fuente: Doan Thanh Ha.*

Como cerramiento, el bambú presenta determinadas características a destacar frente a los materiales cerámicos o el hormigón. Dado que el bambú es una estructura hueca conformada por infinitos conductos con aire ocluido en su interior, ofrece un excelente comportamiento como aislante térmico y como disipador acústico. Además, su taxonomía conformada a través de fibras paralelas, ofrece la posibilidad de crear aislantes térmicos ecológicos o tejidos vegetales para acabados (Baladrón Laborda, 2018).

Permite la ventilación entre dos elementos consecutivos de bambú, haciendo que se regule la humedad del ambiente. Además, su bajo peso le confiere la ligereza necesaria para poder utilizarlo en el revestimiento de edificios sin suponer una carga adicional a la estructura (**Figura 65**), mientras que su bajo coste permite poder utilizarlo para cubrir por completo la fachada de grandes edificios, siendo fácil y barato de reemplazar si se ve dañado. También puede ser utilizado como doble piel de edificios (permitiendo que pase la luz) o puede emplearse como refuerzo en el hormigón como lo hace el acero (Soler Soler, 2017).



Figura 65. *Cubierta inclinada tradicional con cobertura de medias cañas de bambú Guadua. Fuente: Bamboo Grassroots Atelier.*



Figura 66. *Cerramiento construido con bahareque encementado. Fuente: Plataforma Arquitectura.*

De igual modo, en algunas zonas subdesarrolladas se emplea una técnica tradicional de construcción denominada bahareque encementado (**Figura 66**), consistente en un sistema estructural de muros que se basa en la fabricación de paredes construidas con un esqueleto de bambú *Guadua* cubierto con un revoque (enlucido/pañete) de mortero de cemento aplicado sobre malla de alambre (malla de gallinero o malla expandida o venada), clavada en caña picada o esterilla de *Guadua* que, a su vez, se clava sobre el esqueleto del muro (INBAR, 2015).

2.2.2.3. Como revestimiento interior y en acabados

Aunque la caña rolliza puede ser empleada en el interior de las edificaciones, la mejor opción es la utilización del bambú laminado (**Figura 67**). Estos paneles son una excelente opción como revestimiento interior, pues presentan mejor resistencia al fuego, al rayado, a la abrasión y a los golpes que la madera sin perder capacidad de aislamiento térmico y acústico (Soler Soler, 2017).



Figura 67. Bambú como revestimiento en interiores. Izquierda: Bambú rollizo. Derecha: Bambú laminado.
Fuente: Mundo Constructor (Izquierda) / Beatriz Argüeso (Derecha).

Habitualmente estos paneles consisten en 3 o 5 líneas de tiras de 4 o 5 milímetros de grosor, pegadas con fenol formaldehído o urea formaldehído, ortogonalmente de forma alternada. Las piezas también se pueden unir con ayuda de calor y alta presión (Hidalgo López, 2003).

Como ya se ha comentado anteriormente, según López y Correal (2009), la densidad media de la *Guadua* laminada es de 715 kg/m³, con un contenido medio de humedad del 12%. Su estudio obtuvo, además, los datos recogidos en la **Tabla 8** con respecto al bambú *Guadua* laminado:

Tabla 8. Propiedades mecánicas de los laminados de *Guadua* según el estudio de López y Correal (2009).
Fuente: López y Correal, 2009.

Propiedades mecánicas	Promedio (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Coefficiente de variación
Compresión paralela a la fibra			
Esfuerzo máximo	48.0	3.0	5%
Esfuerzo en el límite proporcional	36.0	2.0	6%
Módulo de elasticidad	19137	1625	9%
Compresión perpendicular a la fibra			
Esfuerzo máximo radial	5.0	0.6	12%
Esfuerzo máximo tangencial	6.8	0.9	13%
Tracción paralela a la fibra			
Esfuerzo máximo	132.0	24.1	18%
Módulo de elasticidad	17468	3655	21%
Tracción perpendicular a la fibra			
Esfuerzo máximo radial	1.1	0.3	22%
Esfuerzo máximo tangencial	1.8	0.4	21%
Cortante paralelo a la fibra			
Esfuerzo máximo	9.4	1.2	13%
Flexión estática			
Esfuerzo máximo radial	74.0	10.6	14%
Módulo de elasticidad radial	9523	1100	12%
Esfuerzo máximo tangencial	87.0	12.8	15%
Módulo de elasticidad tangencial	11456	1450	13%

Comparando los valores de las propiedades mecánicas de los laminados de *Guadua* del estudio de López y Correal (2009) con los valores obtenidos por diversos autores para diferentes especies de *Guadua* utilizadas en su forma natural (**Tabla 2** a **Tabla 6**), se observa que la *Guadua* laminada presenta mayor resistencia a compresión paralela a las fibras que las especies *Guadua amplexifolia*, *Guadua velutina*, *Guadua angustifolia Atlántica* y *Guadua angustifolia Sur* en su estado natural. En cambio, la *Guadua aculeata* y la *Guadua angustifolia Kunth variedad Macana* muestran valores superiores.

Con respecto a la resistencia a tracción paralela a las fibras, sólo la *Guadua aculeata* muestra un valor menor que la *Guadua* laminada. La *Guadua angustifolia Kunth variedad Castilla* es la especie que presenta una resistencia más similar a la *Guadua* laminada.

En el caso del esfuerzo cortante, sucede justo lo opuesto: la *Guadua aculeata* es la única especie que supera la resistencia a cortante de la *Guadua* laminada.

Por último, la *Guadua aculeata* (verde) del estudio de Zaragoza-Hernández y sus colaboradores (2015) es la única especie que, en comparación con la *Guadua* laminada, presenta un valor menor de resistencia a flexión estática, siendo precisamente la versión seca de esta misma especie la que muestra un valor más parecido (aunque superior) al de la *Guadua* laminada.

2.2.2.4. Construcciones efímeras o urgentes

La versatilidad y la rapidez de construcción que presenta el bambú hace que se presente como una gran alternativa en dos casos bien diferenciados: en construcciones efímeras y en edificios cuya construcción es urgente.

Las construcciones efímeras suelen estar ligadas a exposiciones y ferias. En ellas, la propia construcción es el elemento a mostrar, ya sea por el material del que está hecha o por la técnica empleada. Suelen ser construcciones con estructuras complejas, pero de duración determinada, por lo que ésta no es un factor a tener en cuenta. El bambú presenta gran flexibilidad y ligereza, así como un coste bajo, por lo que permite crear estructuras tridimensionales económicas que pueden ser cubiertas (o no) posteriormente con otros materiales, además de poder ser construidas tanto en exterior como en interior (Soler Soler, 2017).

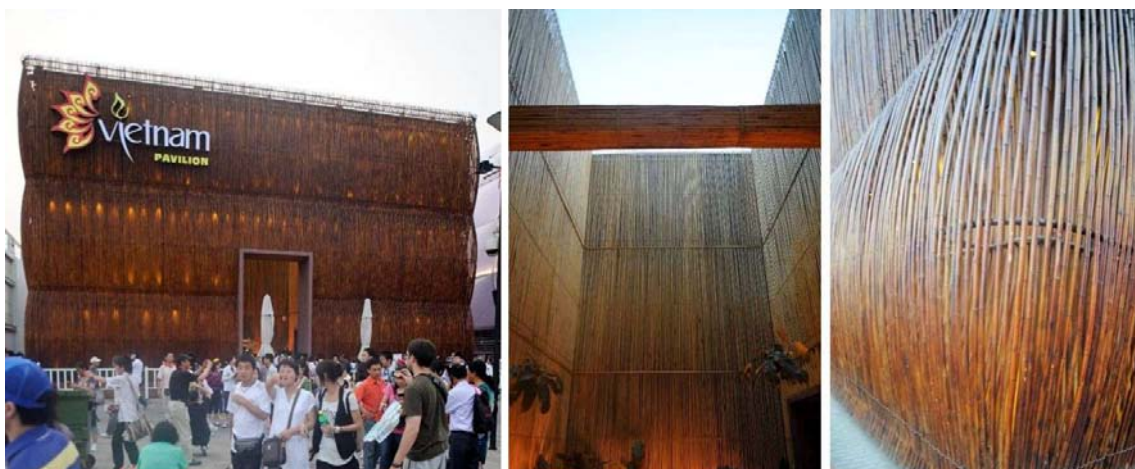


Figura 68. Pabellón de Vietnam en la Exposición Universal de Shanghái de 2010.

Fuente: Larry Speck.

La Exposición Universal de Hannover de 2000 y la Exposición Universal de Shanghái de 2010 fueron escenarios perfectos en los que el bambú demostró su eficacia como material de construcción en arquitecturas efímeras, como se aprecia en la **Figura 68**.

Por otra parte, los edificios cuya construcción resulta urgente también pueden verse gratamente beneficiados gracias al bambú. Al tratarse de un material que presenta buena resistencia ante esfuerzos de tracción y compresión, el bambú es ideal para la construcción de refugios y viviendas de emergencia. En lo que a estos casos concretos se refiere, el bambú tiene la ventaja de ser un material fácilmente disponible y accesible en gran parte del mundo. Además, se puede trabajar con herramientas sencillas, tiene una rápida ejecución y permite mejorar las estructuras paulatinamente para generar viviendas permanentes (Moreira & Souza, 2020).

Tanto en las construcciones efímeras como en las de emergencia, el bambú presenta ciertas ventajas con respecto a otros materiales. Los metales, por ejemplo, son más caros y difíciles de trabajar, llegando a requerir mano de obra cualificada. El cartón, material empleado también en viviendas y refugios de emergencia, presenta una resistencia a los esfuerzos muy inferior a la del bambú, además de que el agua en abundancia puede deshacerlo. En el caso de la madera, si bien es cierto que los tiempos de montaje y su sostenibilidad se asemejan a los del bambú, su peso y precio son notablemente mayores, lo que convierten al bambú en una mejor opción (Soler Soler, 2017).

2.2.3. CONSTRUCCIONES CON BAMBÚ

Existen multitud de construcciones y estructuras significativas realizadas con bambú en todo el mundo. Como muestra de las posibilidades que este material ofrece al sector de la construcción, se recogen a continuación algunas de ellas:

2.2.3.1. Andamios de bambú en la construcción de rascacielos en Hong Kong

A finales del siglo XX, el área urbana de Hong Kong creció hasta convertirse en uno de los lugares más densos y verticales del mundo, con más edificios de una altura superior a los 150 metros que cualquier otra ciudad. Sin embargo, en vez de utilizar andamios de acero o de aluminio, la mayoría de los rascacielos de Hong Kong y de gran parte de Asia fueron construidos empleando andamios de bambú, sirva como ejemplo el mostrado en la **Figura 69** (Lynch, 2016).

El principal motivo de esta elección es el coste, pues los andamios de bambú son alrededor de un 30% más baratos que los metálicos. Pero también la versatilidad y la inmediatez que ofrece el bambú son importantes, pues si de algo carece Hong Kong es de espacio. En ocasiones, los edificios literalmente se tocan entre ellos, y la rigidez del metal a veces hace imposible colocar andamios en según qué sitios o estructuras. Sin embargo, los «taap pang» (especialistas en el montaje de andamios de bambú) se las arreglan para cortar, afilar y adaptar el bambú a cualquier superficie, siendo la mayoría de las veces la única opción posible (Cancela, 2015).



Figura 69. Andamio de bambú en la construcción de un edificio de Hong Kong.
Fuente: Plataforma Arquitectura.

Por último, hay que destacar la rapidez de montaje de estos andamios. Los obreros atan entre sí las cañas con bridas de plástico y trepan por la estructura como si de una escalera se tratase, lo que les permite moverse rápidamente por el edificio. Si bien el empleo de dispositivos de seguridad ralentiza un poco el montaje, los equipos más experimentados de obreros pueden construir fácilmente 300 m² de andamios en un solo día. En algunos casos, la estructura se protege mediante gasas de nylon que cubren la parte exterior (Lynch, 2016).

2.2.3.2. Viviendas tradicionales de bambú

El motivo por el que el bambú se asoció con los estratos sociales más pobres es porque, debido a su abundancia y fácil acceso, a menudo ha sido empleado por los más desfavorecidos para construir viviendas seguras y de bajo coste en las que poder resguardar a sus familias (**Figura 70**).



Figura 70. Vivienda tradicional de bambú en la región de Esmeraldas (Ecuador).
Fuente: Semana Sostenible.

En países como Ecuador, Colombia, Perú, China, Tailandia o India (entre otros), es fácil encontrar barrios enteros llenos de viviendas sencillas y humildes fabricadas con bambú. Por supuesto que este material permite erigir maravillosos e imponentes edificios, pero ante todo debemos recordar que la gran mayoría de construcciones

realizadas con él responden más a un criterio funcional que a un criterio estético, pues, habitualmente, se construyen como respuesta a una necesidad.

2.2.3.3. Viviendas sociales de bambú

Numerosas organizaciones y empresas alrededor de todo el mundo colaboran en la construcción de viviendas sociales realizadas con bambú.

En Ecuador, el día 16 de abril de 2016 a las 18:58 horas, tuvo lugar un terremoto de magnitud 7.8 en la escala sismológica de magnitud de momento, con epicentro entre las localidades de Cojimíes y Pedernales, en la zona norte de la región de Manabí. Dicho fenómeno supuso la destrucción de miles de edificaciones, lo que dejó a más de 25000 personas sin hogar (BBC Mundo, 2016).

A través de la iniciativa Casas Emergentes de Bambú (Caemba), Cristina de la Torre y Manuel Pallares encontraron que la solución a este desastre natural estaba en la construcción de casas y edificaciones que fueran de fácil y rápida elaboración, de construcción sencilla y resistente (**Figura 71**). El bambú, además, es un material económico y de fácil transporte, lo que resultó aún más ventajoso. Así pues, realizaron una serie de creativos diseños e iniciaron su construcción, descubriendo en el proceso que esas estructuras podrían servir para edificar casas permanentes, por lo que le incorporaron una serie de latones que permitirían añadir bambú picado o madera a las paredes, así como ajustar el techo (Piñeros, 2017).



Figura 71. Vivienda social construida tras el terremoto de Ecuador de 2016.
Fuente: Semana Sostenible.

También en Ecuador existe desde el año 1971 una importante organización llamada Hogar de Cristo, fundada por el padre jesuita Francisco García Jiménez con el objetivo de proporcionar viviendas dignas a los más desfavorecidos. El proyecto ha cambiado con los años, incluyendo nuevos tipos de ayudas además de la proporción de viviendas, y viéndose también éstas afectadas por el avance tecnológico (Hogar de Cristo, 2020).



Figura 72. Viviendas modelo construidas por Hogar de Cristo en Ecuador.
Fuente: Hogar de Cristo.

Se calcula que, hasta la fecha, Hogar de Cristo ha proporcionado más de 100.000 viviendas como las mostradas en la **Figura 72**. Las edificaciones están hechas de paneles prefabricados de bambú, que son producidos en una pequeña fábrica que proporciona empleo a más de 50 personas. El bambú es cultivado en plantaciones sostenibles. Las viviendas son fáciles y simples de construir, de modo que, mediante orientaciones sencillas, las familias pueden construir sus propias viviendas en un día. Las viviendas cuestan sólo una séptima parte del costo de las viviendas más baratas construidas por el gobierno. La ayuda proveniente de donaciones es usada para extender la capacidad de la planta de manufactura y satisfacer las necesidades de los más desfavorecidos (World Habitat, 2018).

En Perú, las inundaciones provocadas por el fenómeno El Niño, que tuvo lugar entre enero y marzo de 2017, afectaron a 1.9 millones de personas, de las cuales casi la tercera parte fueron niños y adolescentes. Miles de familias perdieron sus casas y fuentes de ingreso (Unicef, 2017). A raíz de tal suceso, diferentes organismos e individuos pusieron en marcha el diseño de módulos y viviendas sostenibles que los afectados pudiesen construir con facilidad y rapidez.



Figura 73. Módulo de vivienda de 22 m² construido por el IVUC en Pisco (Perú).
Fuente: IVUC.

El Instituto de Vivienda, Urbanismo y Construcción (IVUC) de la Universidad de San Martín de Porres (USMP) de Perú inició un programa de reconstrucción post terremoto, que fue ejecutado por la Comisión Episcopal de Acción Social y durante el cual se apoyó a las familias damnificadas en la región de Pisco. El IVUC desarrolló una propuesta constructiva sismorresistente y económica a base de estructuras de bambú. El proyecto incluía la construcción de la iglesia de la Compañía de Jesús y la fabricación de 54 módulos de viviendas de 22 m² cada una (**Figura 73**). Dichos

proyectos fueron diseñados mediante componentes constructivos que pudieran ser prefabricados en un taller y montados rápidamente en la obra. Con un equipo experimentado, la construcción del módulo se realizaba en una semana (Barnet & Jabrane, 2017).

Por su parte, el arquitecto Carlos Pastor Santa María desarrolló un módulo de vivienda sostenible y progresiva, es decir, una vivienda que sortea las variables de clima, territorio, temporalidad, costos y bajo impacto en su emplazamiento (**Figura 74**). Este proyecto propone una solución sostenible basada en tecnologías emergentes, tomando como materiales básicos aquellos que usa la población de la zona y que pueden encontrarse con mucha facilidad en almacenes rurales, mayoritariamente no industrializados y artesanales (Plataforma Arquitectura, 2017).



Figura 74. Módulo de vivienda sostenible y progresiva del arquitecto Carlos Pastor Santa María.
Fuente: Plataforma Arquitectura.

En El Rama (Nicaragua), el proyecto Bambú Social, en colaboración con la Universidad India y Caribeña Bluefields (BICU), desarrolló un curso de construcción sostenible cuyo objetivo era crear una alternativa sostenible a la tradicional vivienda social (**Figura 75**). El diseño de la casa modelo se inspiró en la arquitectura ancestral de la zona, la de los indígenas Rama Keys. El techo de la vivienda recoge el agua de lluvia, que se almacena en un tanque de agua y se purifica con un filtro biodigestor, produciendo agua potable para hasta 5 personas. La casa se construye con materiales que se pueden conseguir localmente, asequibles y lo más naturales posible, como el bambú. Además, el diseño se adapta al clima local y a las preferencias del pueblo. La casa modelo que se realizó fue donada a la BICU, donde funciona como biblioteca pública, y sirvió como ejemplo para crear un manual de construcción, el cual explica paso a paso y por medio de dibujos y fotos el proceso de construcción de esta casa social de bambú (Archivo Digital Arquitectura Panamericana, 2020).



Figura 75. Casa modelo diseñada por Bambú Social y la BICU en El Rama (Nicaragua).
Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.

En Vietnam, el estudio H&P Architects diseñó en el año 2013 un módulo de vivienda de 44 m² realizado con bambú (**Figura 76**), como solución ante los graves fenómenos climatológicos que afectan al país (tormentas, inundaciones, deslizamientos de tierra, etc.) y que matan alrededor de 500 personas cada año. El proyecto desarrolló un módulo denominado *Blooming Bamboo* (Bambú Floreciente), de planta cuadrada (de 3.30 metros de lado o 6.60 metros) y dos pisos de altura capaz de resistir inundaciones de 1.50 metros de altura. Esta estructura puede ser montada por los propios usuarios en 25 días. Además, puede ser producida en masa a través de módulos, reduciendo el costo a 2500 dólares por vivienda (Plataforma Arquitectura, 2013).



Figura 76. *Blooming Bamboo House*.
Fuente: Urban Contest.

El módulo se eleva sobre pilotes, dejando un espacio debajo de la vivienda que permitiría el paso del agua en caso de una inundación, por lo que se accede a la casa mediante escaleras de madera que conducen a pequeñas terrazas perimetrales. La estructura básica está fabricada con cañas de bambú de 8-10 cm de diámetro, aunque se complementa con cañas de bambú de 4-5 cm de diámetro, tableros de fibra y hojas de coco. Todos los elementos se unen entre sí con pernos. Esto permite adaptar cada módulo al clima y a los materiales locales, creando una arquitectura vernácula. Las paredes se pliegan hacia afuera para ventilar el edificio. Además, algunas secciones del techo pueden abrirse o cerrarse completamente, dependiendo del clima.

Si bien ha sido diseñado como vivienda, también podría usarse como aula de escuela, instalación médica o centro comunitario (Davis, 2013).

2.2.3.4. Puentes de bambú

El bambú también permite la construcción de puentes, algunos de los cuales soportan varias toneladas de peso, por lo que vehículos ligeros e incluso algunos camiones pueden cruzarlos sin problema.

En 1734 se construyó en Santiago de Cali (Colombia) un puente de *Guadua* que unía el centro de la ciudad con la zona norte. Sin embargo, debido a la falta de mantenimiento, la estructura se deterioró rápidamente (El Tiempo, 1995).

En el año 1853 se construyó con *Guadua* un puente de uso peatonal de 16.6 x 22 metros sobre el río Ingará, en el departamento de Chocó (Colombia). Chocó es una zona de alto caudal de lluvias, por lo que muchos de estos puentes rudimentarios atravesaban los ríos y arroyos a menudo crecidos. La **Figura 77** reproduce una acuarela realizada en el año 1853 por Manuel María Paz (1820-1902), reconocido pintor que solía representar actividades cotidianas y costumbres tradicionales de los diferentes grupos étnicos, raciales y sociales de Colombia, la cual muestra a dos hombres cruzando dicho puente (Biblioteca Digital Mundial, 2016b).

Debido al éxito de dicho puente, sólo 4 años después, en 1857, se construye también con *Guadua* un puente sobre el río de La Plata, en el departamento de Cauca (Colombia). De nuevo, Manuel María Paz captura la esencia de la estructura en una acuarela (**Figura 77**). La pintura muestra una imagen del río y su puente de bambú, con la vista orientada hacia la ciudad de La Plata, en la provincia de Neiva (departamento de Huila, al sudoeste de Colombia), en las estribaciones meridionales de la cordillera central (Biblioteca Digital Mundial, 2016a).



Figura 77. Acuarelas de Manuel María Paz.

Izquierda: Puente sobre el río Ingará construido en 1853.

Derecha: Puente sobre el río La Plata construido en el año 1857.

Fuente: Biblioteca Digital Mundial.

El día 25 de enero de 1999 a las 13:19 horas, tuvo lugar un terremoto de magnitud 6.2 en la Escala de Richter en el Eje Cafetero, afectando enormemente a los departamentos de Quindío y Risaralda (Colombia), por lo que se inició la construcción de viviendas, puentes y otras estructuras públicas con *Guadua*, por tratarse el bambú de un material sismorresistente (Henríquez Defelipe & Morón Sierra, 2017).

En agosto del 2000, el arquitecto Jörg Stamm, inició un curso práctico y teórico de construcciones de puentes con *Guadua* para arquitectos, ingenieros y artesanos. Para ello contó con la colaboración de la Cooperación Técnica Alemana (GIZ) y de la Universidad Cooperativa de Colombia - Pereira (UTP). Como resultado, no sólo se demostró que trabajadores poco experimentados pueden fabricar una cercha de bambú en 3 días con máquinas sencillas, sino que además se construyó junto a la Universidad Tecnológica de Pereira el primer puente



Figura 78. Puente diseñado por Jörg Stamm y construido en la UTP (Colombia).

Fuente: CONBAM.

que contaba con todas las autorizaciones estructurales y estáticas que exigía la normativa de la ciudad (**Figura 78**). El arco de *Guadua* cuenta con una cercha con diagonales atirantados contra cargas asimétricas. El puente cubre 40 metros y tiene un gálibo de 5 metros (CONBAM, 2005).

En puente Jenny Garzón (**Figura 79**), ubicado en la localidad de Engativá en el límite noroccidental de Bogotá (Colombia), fue construido en el año 2003 por los arquitectos Simón Vélez y Marcelo Villegas. Este puente, de uso peatonal y para el tránsito de bicicletas, cuenta con alrededor de 1200 cañas de *Guadua macana*. Tiene 3 metros de ancho, 45 metros de largo y 5.8 metros de altura. La cubierta está elaborada con teja shingle y el suelo con madera sapán. El puente pesa alrededor de 13 toneladas y resiste 36 toneladas. Los empujes laterales generados por las cañas de bambú se contrarrestan con reforzamiento de riostras en las bases (Henríquez Defelipe & Morón Sierra, 2017).



Figura 79. Puente Jenny Garzón, de Simón Vélez y Marcelo Villegas, ubicado en Bogotá (Colombia).
Fuente: Historia Bogotana.



Figura 80. Puente de Simón Vélez para un hotel ecológico en la localidad de Guanezhoua (China).
Fuente: Arkilínea. Ideas Arquitectónicas.

En el año 2005, Simón Vélez fue contratado por una importante empresa china para construir un hotel ecológico de 6000 m² en la localidad de Guanezhoua, China. Como entrada al complejo, Vélez construyó un puente de bambú siguiendo un diseño similar al del puente Jenny Garzón de Bogotá, el mostrado en la **Figura 80**. Sin embargo, este puente tiene una longitud de 38 metros, una altura promedio de 4 metros y un ancho de 2.50 metros. Además, en su fabricación se empleó bambú originario de China, el cual fue macizado con mortero de cemento. En su construcción participaron obreros colombianos y chinos, por lo

que éstos últimos tuvieron que realizar prácticas con el fin de familiarizarse con la técnica implementada por Simón Vélez (Salas Delgado, 2006a). La estructura de este puente está conformada por una gran viga de bambú que da forma a un arco que se apoya directamente en sus extremos en dos grandes pedestales de hormigón armado (Henríquez Defelipe & Morón Sierra, 2017).

También durante el año 2005, en el barrio de Santo Domingo Savio (en la ciudad de Medellín, Colombia), se empezó a planear la construcción de un puente de *Guadua* (**Figura 81**), gracias a un convenio entre el Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) y la Alcaldía de Medellín, a través de la Empresa de Desarrollo Urbano (EDU). Aprendices y egresados del Centro de la Construcción de la Regional Quindío del SENA se encargaron del diseño y construcción de este puente en arco de 46 metros de longitud y 7 metros de altura, cuya construcción se inició en 2008 (Cardona Tobón, 2011).

Sin embargo, el puente nunca llegó a ser abierto al público, ya que no se le pudo realizar la prueba de carga. Simón Vélez incluso llegó a decir “Exigí que me mostraran los diseños de ese puente y con sólo verlos supe que esa estructura se caería. También exigí al SENA de Medellín la memoria de cálculo y nunca me la dieron, porque no existía. Nunca lo pudieron



Figura 81. Puente de Santo Domingo Savio (Medellín, Colombia).
Fuente: SENA.

inaugurar ni abrir al público, porque desde el comienzo la estructura comenzó a caerse” (Semana S.A., 2013).

El problema se incrementó cuando, debido al abandono del puente, comenzaron los saqueos y el vandalismo, que dieron lugar a que la Comisión Técnica del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGR) recomendase su cierre definitivo y lo cubriese con una malla (Semana S.A., 2013). La tarde del 19 de octubre de 2013, tuvo lugar el colapso parcial del puente (**Figura 82**), que presentó un desprendimiento del techo, ocasionando el giro de la estructura hacia uno de los costados (Minuto30.com, 2013). Tan sólo 10 días después, el 29 de octubre de 2013, se firmó un convenio entre el SENA y la Alcaldía de Medellín para su desmonte (Teneche, 2015).



Figura 82. Puente de Santo Domingo Savio (Medellín, Colombia) colapsado.
Fuente: Semana S.A.

Para los empresarios que llevan décadas promocionando la *Guadua*, el proyecto del puente de Santo Domingo Savio fue un error desde el principio. “*Es un episodio grave, porque la gente le adjudica los daños al material y no a la construcción, cuando de lo que se trata es de errores humanos, de ingeniería, de cálculo y, en última instancia, de previsión*”, dice Marcelo Villegas, experto en construcción de estructuras con *Guadua* (Semana S.A., 2013).

En Cúcuta (Colombia), sobre la Avenida Libertadores, se encuentra un puente de bambú construido por Jörg Stamm en el año 2008 en tan sólo 3 meses (**Figura 83**). La estructura está conformada por 600 cañas de *Guadua* con diámetros de entre 10 y 14 cm. El puente soporta una carga viva equivalente a 40 personas y la estructura principal es el arco, que absorbe el 90% de la carga total del puente, a pesar de poseer éste torres piramidales con paquetes de entre 5 y 6 cañas. Este puente atirantado cuenta con una cubierta en membrana industrial de PVC reforzado con fibra de vidrio y una capa de teflón (Henríquez Defelipe & Morón Sierra, 2017).



Figura 83. Puente sobre la Avenida Libertadores (Cúcuta, Colombia) diseñado por Jörg Stamm.
Fuente: Megaconstrucciones.net

En febrero de 2010, en Davao (Filipinas), la Federación de Matina acogió, con el apoyo de un grupo de arquitectos locales liderados por Andrea Fitrianto, un taller de diseño que exploró la posibilidad de emplear bambú para construir un puente peatonal para la comunidad (**Figura 84**). Dado que era necesario salvar 23 metros de luz, se optó por emplear la especie local



Figura 84. Puente construido con *Dendrocalamus asper* en Davao (Filipinas).
Fuente: Andrea Fitrianto.

Dendrocalamus asper. A principios de 2011, en las afueras de la ciudad se seleccionaron, cortaron y trataron las cañas que serían empleadas, escogiendo las mejores de entre 3 y 5 años de edad. En abril, dos carpinteros tradicionales de bambú de Indonesia lideraron el proceso de construcción, involucrando a voluntarios de la comunidad. En un mes se completó la estructura, incluyendo tornillos y tuercas para las juntas. Además, se inyectó lechada de cemento en las articulaciones principales, mientras que en el suelo se construyó una losa de hormigón armado de cuatro

pulgadas de espesor para asegurar su estabilidad y permanencia. A fines de mayo, el puente estaba completamente terminado (Franco, 2013).

2.2.3.5. Construcciones efímeras de bambú

El artista del bambú Wang Wen-Chih, nació en Chiayi (Taiwán) en 1959, donde reside actualmente. Se formó en Bellas Artes en Taiwán, China y Francia, y pronto se hizo conocido por crear obras que proporcionan al espectador una sensación de inmersión en la naturaleza. Empleando técnicas tradicionales de tejido a mano que aprendió en las montañas de su tierra natal, crea grandes estructuras que combinan bambú y ratán. Sus obras son grandes domos naturales que se integran en el entorno y cuyos objetivos principales son albergar paz y tranquilidad, unir al visitante con la naturaleza y servir como ejemplo de arquitectura ecológica (Interioresymás, 2016).

El *Setouchi International Art Triennale* (también conocido como Setouchi Triennale) es un festival de arte contemporáneo que se celebra cada tres años en una docena de islas en el Mar Interior de Seto (Setonaikai), el mar que separa Honshu y Shikoku, dos de las islas principales de Japón. El festival se inauguró en 2010 con el objetivo de revitalizar la zona y en él se presentan más de 150 obras de arte de artistas tanto de Japón como del extranjero (Japan-guide.com, 2019). En el año 2010, Wang Wen-Chih participó en el festival mediante la construcción en el valle de Nakayama (Shōdoshima, una de las islas localizadas en el Mar Interior de Seto, en el sur de Japón) la obra denominada *House of Shōdoshima* (Casa de Shōdoshima), una estructura fabricada completamente con bambú cultivado en la isla (**Figura 85**). Desgraciadamente, la obra se mantuvo en pie menos de un año, pues fue gravemente afectada por un fuerte tifón seguido de un invierno relativamente duro, por lo que decidieron desmontar lo que quedaba de ella (Billa, 2014).



Figura 85. *House of Shōdoshima*, obra de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2010. Fuente: Chinesenewart.



Figura 86. *Light of Shōdoshima*, obra de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2013. Fuente: The Little Dröm Store.

En el Setouchi Triennale 2013, Wen-Chih construyó exactamente en el mismo lugar la denominada *Light of Shōdoshima* (Luz de Shōdoshima), una cúpula gigante fabricada con 5000 cañas de bambú procedentes de la isla (**Figura 86**). La estructura se situaba al pie de una pendiente de campos en terrazas, quedando perfectamente integrada con el paisaje y la vegetación. Los asistentes debían descalzarse para entrar y se les animaba a hablar en voz baja, para que pudiesen disfrutar de los sonidos de la naturaleza que la rodeaba. Esta creación se mantuvo en pie hasta noviembre de 2014, cuando fue desmontada (The Little Dröm Store, 2014).

Wang Wen-Chih participó también en el Setouchi Triennale 2016, donde presentó su obra *Dream of Olive* (Sueño de Oliva), titulada así en honor a la isla, pues Shōdoshima es conocida por ser el primer lugar de Japón en el que se consiguió cultivar olivos, a comienzos del siglo XX. La estructura estuvo en pie hasta diciembre de 2017. En el Setouchi Triennale 2019, Wen-Chih presentó *Love in Shōdoshima* (Amor en Shōdoshima), su obra de mayor envergadura, que

cuenta con dos accesos y que se mantuvo en pie hasta finales de 2020 (Billa, 2020). En la **Figura 87** pueden apreciarse ambas construcciones.



Figura 87. *Dream of Olive* (a la izquierda) y *Love in Shōdoshima* (a la derecha), obras de Wang Wen-Chih en el Setouchi Triennale 2016 y en el Setouchi Triennale 2019 respectivamente.
Fuente: David Billa.

Pero también se pueden encontrar fuera de Japón las obras de Wang Wen-Chih, pues éste fue contratado en 2013 para construir una obra que sirviese como entrada al *Woodford Folk Festival* (Festival de Folk de Woodford), en Australia (**Figura 88**). Empleando 600 cañas de bambú y 70 troncos de pino radiata (todos ellos recolectados a menos de 20 km del lugar), Wen-Chih construyó *Woven Sky* (Cielo Tejido), una estructura de 15 m de altura y 100 m de longitud. La construcción de la obra llevó 3 semanas y para ello Wen-Chih colaboró con la empresa Cave



Figura 88. *Woven Sky*, obra de Wang Wen-Chih como entrada al Woodford Folk Festival (Australia).
Fuente: Cave Urban.

Urban (un estudio de arte y arquitectura de la zona), contando con 40 trabajadores y un pequeño grupo de voluntarios procedentes de Sídney. La fabricación de la estructura requirió que cada caña de bambú se dividiese en 4-5 piezas, que serían entretejidas conformando una especie de cesta. En diciembre de 2014, la estructura se modificó para crear una nueva entrada. Además, se reformaron el techo y las paredes, creando una serie de brazos que se extienden hacia fuera (Interioresymás, 2016).

También en 2013, Wen-Chih participó en un proyecto de mediación cultural desarrollado en Linz (una ciudad al noreste de Austria) llamado Höhenrausch.3 El Arte de las Torres. En este caso, su obra se tituló *Bamboo Cupola* (Cúpula de Bambú) y consistió en una imponente torre de observación de 15 metros de altura construida con bambú y ratán entretejidos (**Figura 89**). La estructura surgía de una de las azoteas de la ciudad y podía definirse como una habitación contemplativa orientada hacia dentro e inundada de una luz que invita a quedarse. Además, la torre se iluminaba desde el interior por la noche, lo que la convertía en una obra artística única e inconfundible en el espacio urbano nocturno de Linz (Hill, 2014).



Figura 89. *Bamboo Cupola*, obra de Wang Wen-Chih para el Höhenrausch.3 (Linz, Austria).
Fuente: Otto Saxinger y Andreas Kepplinger.

También dentro de las obras efímeras realizadas con bambú hay que destacar las realizadas por el maestro de la *Guadua*, el colombiano Simón Vélez.

En el año 1999, Vélez construyó un pabellón de 2000 m² de superficie (**Figura 90**) en el Parque del Pensamiento Jaime Restrepo Mejía (en la ciudad de Manizales, en la región montañosa del oeste de Colombia) por petición de la fundación *Zero Emissions Research and Initiatives* (ZERI), que ese mismo año desarrolló en el Eje Cafetero el V Congreso Mundial ZERI. Los tres últimos días de congreso tuvieron lugar en el pabellón de *Guadua*, donde también se llevó a cabo el Primer Congreso Internacional de Juventudes ZERI. La estructura está hecha de bambú, cemento reciclado, cobre y paneles fabricados con tierra, cemento y fibra natural. El pabellón fue construido en 4 meses y en su fabricación se emplearon 3000 cañas de *Guadua*, consiguiendo voladizos de 15 metros. El edificio pesa 500 toneladas, de las cuales 400 toneladas son de hormigón, 10 de acero y 90 de bambú (Arango Díaz, *et al.*, 2005).



Figura 90. Pabellón ZERI en Manizales (Colombia), obra de Simón Vélez para el V Congreso Mundial ZERI.
Fuente: KALTIA.



Figura 91. Reproducción del Pabellón ZERI en la Exposición Universal de Hannover 2000.
Fuente: EcoHabitar.

Un año después, con motivo de la Exposición Universal de Hannover 2000, se le pidió a Vélez que realizase una reproducción del denominado “Pabellón ZERI” en Alemania (**Figura 91**). Ingenieros de la Universidad de Stuttgart se desplazaron hasta Manizales y sometieron al pabellón original a cálculos estructurales, pruebas de ingeniería y pruebas de carga de todo tipo como requisito de las autoridades alemanas para otorgarle la licencia de construcción en Alemania, donde Vélez y el bambú asombraron al mundo con la tecnología y belleza de las estructuras en *Guadua* (Salas Delgado, 2006b).

En Pereira, municipio colombiano capital del departamento de Risaralda y ciudad más poblada de la región del eje cafetero (zona centro-occidente de Colombia, en el valle del río Otún en la Cordillera Central de los Andes colombianos), el terremoto de 1999 dañó gravemente la Catedral de Nuestra Señora de la Pobreza, por lo que, en el año 2000, tuvieron que llevarse a cabo importantes obras de reconstrucción que supusieron su cierre. Para dar a los feligreses un templo sustituto, Simón Vélez fue contratado para construir una iglesia provisional con bambú de la especie *Guadua angustifolia*. El autor implementa una reinterpretación poética de los arcos naturales que se desarrollan en las plantaciones de bambú, combinada con la intención de recrear el espíritu de una iglesia gótica (**Figura 92**). Por ello, Vélez mantuvo la tripartición clásica de las naves y de la fachada. Además, empleó proporciones clásicas y formas como el cuadrado, el doble cuadrado y el rectángulo áureo, tanto en la planta como en la sección de edificio (Bullaro, 2018).



Figura 92. Interior de la catedral provisional construida en Pereira, obra de Simón Vélez.
Fuente: BBC Worldservice.

La iglesia se levantó en sólo 5 semanas. Las paredes y el techo fueron construidos con una estructura de *Guadua angustifolia* cubierta de malla metálica estirada y mortero de cemento. El edificio medía 16 metros de ancho y 40 metros de largo y constaba de tres naves. El espacio central tenía un vano de 8 metros y una altura de 11 metros (Soler Soler, 2017).

Desgraciadamente, la iglesia de Simón Vélez sólo estuvo en pie 1 año y medio, dado que, al finalizar la reconstrucción de la catedral, las autoridades de la ciudad decidieron demoler la estructura y construir en su lugar un centro comercial (Sangronis Padrón, 2012). Sin embargo, Simón Vélez y sus socios decidieron en 2005 reproducir la iglesia en una hacienda de Cartagena (una ciudad portuaria en la costa caribeña de Colombia), pero esta vez con carácter permanente. Si bien esta estructura conserva las mismas dimensiones de su predecesora, se diferencia de ella en que ésta está aislada y fue construida en mitad de un lago artificial, por lo que se accede a ella a través del agua. Desde el exterior, la puerta de la iglesia es totalmente opaca de día y translúcida de noche, produciéndose el efecto opuesto en el interior del edificio (Vélez, 2016).



Figura 93. Catedral permanente de bambú construida por Simón Vélez en Cartagena (Colombia).
Izquierda: Vista exterior. Derecha: Vista desde el interior.
Fuente: BBC Worldservice.

En 2008, Simón Vélez construyó la mayor estructura de bambú del mundo como sede del Museo Nómada (*Nomadic Museum*), una exposición errante de fotografías y vídeos del artista Gregory Colbert titulada Cenizas y Nieve (*Ashes and Snow*). Este edificio se levantó en la Plaza de la Constitución de Ciudad de México, conocida popularmente como El Zócalo. La estructura, que contaba con tres naves, tenía una superficie de 5130 m² y una altura de 16 metros. Vélez construyó grandes muros curvos, de modo que cada fotografía quedase delimitada entre 2 columnas con capiteles bulbosos, y colocó bajo las obras un espejo de agua lo que, unido a la gran altura del edificio y a la tenue luz del interior, creaba un ambiente casi sagrado (M., 2008).



Figura 94. Museo Nómada del Zócalo (Ciudad de México) construido por Simón Vélez.
Izquierda: Vista exterior. Derecha: Vista del interior de una de las naves laterales de la exposición.
Fuente: Randy Maldonado (imagen del exterior) y Mark Sobczak (imagen del interior).

Pero sin duda, la Exposición Universal de Shanghai 2010 fue el evento en el que más estructuras temporales de bambú se reunieron al mismo tiempo, pues muchos de los pabellones utilizaron bambú en su diseño, entre ellos, los de España, India, Indonesia, Noruega, Vietnam, Perú, Madrid y la Casa Germano-China. Todas estas estructuras asombrosas transformaron la Expo en la demostración más grande del mundo de la increíble versatilidad, durabilidad y sostenibilidad del bambú, proporcionando una alternativa más sostenible a la madera, el plástico, el hormigón y otros materiales, y demostrando cómo el bambú puede ayudar a crear mejores ciudades y mejores vidas (INBAR, 2010).

El Pabellón de Madrid (que junto con Barcelona y Bilbao disponían de pabellón propio) incluía dos edificios emblemáticos: el Árbol del Aire y la Casa de Bambú, siendo ésta última una réplica de un importante proyecto de viviendas sociales diseñado por el arquitecto Alejandro Zaera y construido en el Ensanche de Carabanchel (Madrid, España). La Casa de Bambú (**Figura 95**) constituye un auténtico modelo de edificación sostenible, pero, a diferencia de en el caso original, por dentro no es un edificio de viviendas. Lo que sí que se mantiene es el exterior, con las modificaciones necesarias adaptadas al clima local para que el visitante pueda ver y notar cómo se aplican las energías renovables a cosas tan cotidianas como la climatización o el control de la luz a través de elementos integrados en la estructura del edificio como, por ejemplo, un atrio solar, el muro norte acristalado y la “piel” de bambú (Domenico, 2010).



Figura 95. Casa de Bambú, parte del Pabellón de Madrid en la Exposición Universal de Shanghai 2010.
Fuente: Carlos J. Vial

La Casa Germano-China, diseñada por Markus Heinsdorff, fue el único edificio de dos pisos de la Expo cuyas estructuras portantes estaban hechas de bambú (**Figura 96**). La sede de Shanghai de la empresa germano-china MUDI fue la responsable de la planificación y del proceso de aprobación integral, mientras que la empresa Shanghai Oriental Expo Services supervisó la construcción (Jordana, 2010).

La Casa Germano-China contaba con una superficie de 330 m² distribuidos en dos plantas. La planta inferior medía 10 metros de ancho, 25 metros de largo y hasta 8 metros de altura, por lo que, como soportes, se emplearon cañas de bambú *Dendrocalamus asper* procedentes de Yulong, al sur de China. Además, el bambú fue tratado con químicos que le otorgaron resistencia al fuego y recibió una certificación acreditativa de ello. Empleando vigas de bambú de hasta 6 metros de largo y 23 cm de diámetro, el diseñador logró crear una planta superior de 4 metros de altura y 80 m² de superficie, accesible mediante una escalera de acero soportada por una columna de bambú tejido. Dado que la planta superior era una sala de conferencias, se cerró completamente con placas de policarbonato transparente de 12 mm de espesor para evitar el ruido (Jordana, 2010).

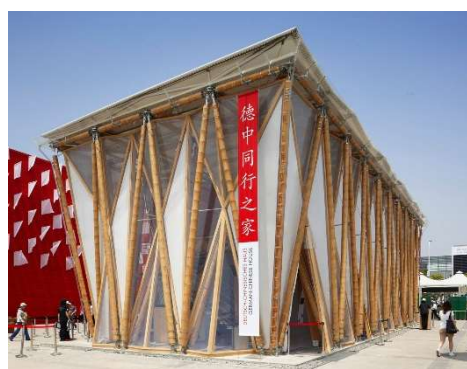


Figura 96. Casa Germano-China en la Exposición Universal de Shanghai 2010.
Fuente: Sebastian Jordana.

El techo del edificio constaba de membranas especiales de PVC, mientras que en la fachada se combinaba el bambú con láminas de ETFE translúcidas

a la luz. Todas las uniones se realizaron con elementos de acero inoxidable desarrollados especialmente para este pabellón y fueron diseñados para que el edificio pudiese desmontarse fácilmente al acabar la exposición. Las piezas roscadas situadas en los pies de las columnas permitían acomodar tolerancias (Detail Inspiration, 2010). En los extremos de las cañas de bambú se aplicó resina de poliuretano. A continuación, los entrenudos de los extremos se rellenaron con una mezcla de hormigón compuesta por una elevada proporción de cenizas volantes, garantizando así que el hormigón se adhiriera firme y adecuadamente al interior del bambú (Soler Soler, 2017).

El pabellón de INBAR de la Expo 2010 también fue construido principalmente con bambú de origen local, e incluía una llamativa pieza central inspirada en el histórico Templo del Cielo de Pekín que desafiaba las percepciones tradicionales del bambú. Además, en su interior se disponían una serie de exhibiciones dinámicas e interactivas que demostraban la progresión de los productos de bambú a lo largo de los siglos (INBAR, 2010).

El Pabellón de la India, de 4000 m² de superficie, exhibió la cúpula de bambú más grande del mundo (**Figura 97**), inspirada en la Gran Estupa de Sanchi, un antiguo monumento budista construido entre el 321 y el 187 a.C. por el emperador Ashoka Vardhana. La cúpula es una rejilla espacial de bambú *Moso* con juntas de acero con lechada, ofreciendo una alternativa duradera, flexible y más rentable que el acero, además de colaborar en la eficiencia energética del pabellón, que fue diseñado como un área sin químicos. La superficie exterior de la cúpula, de microhormigón, se crea *in situ* a mano. Un innovador sistema de tela grapada forma la superficie de montaje para hierbas y células solares, en una impresionante composición con el Árbol de la Vida realizado en cobre, coronado por un pequeño aerogenerador (Prakash, 2016).

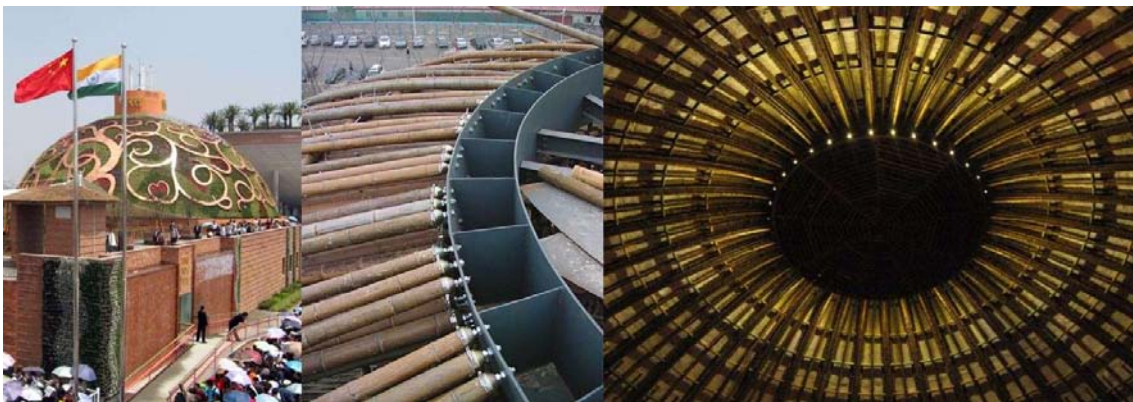


Figura 97. Cúpula del Pabellón de India en la Exposición Universal de Shanghái 2010.

Fuente: Sanjay Prakash.

Además de en los pabellones, el bambú también se utilizó ampliamente en todo el recinto de la Expo 2010 en asientos, arbustos ornamentales y un paseo marítimo de 1.6 km de largo a lo largo del río Huang Pu (INBAR, 2010).

2.2.3.6. Acabados con bambú

A diferencia de lo que sucede con otros materiales empleados como acabado, el bambú permite la ventilación entre dos elementos consecutivos de dicho material, haciendo que se regule la humedad del ambiente. Además, su bajo peso le confiere la ligereza necesaria para poder utilizarlo en el revestimiento de edificios sin suponer una carga adicional a la estructura y su bajo coste permite utilizarlo para cubrir grandes superficies de fachada, y si se ve dañado es fácil de

reemplazar. También puede ser utilizado como doble piel de edificios, permitiendo que pase la luz, tamizándola y ajustándola a las necesidades de cada momento. Estudiando adecuadamente cómo funciona, puede también ser utilizado como refuerzo del hormigón, tal y como sucede con el acero (Soler Soler, 2017). En algunos países (especialmente en los de América del Sur) suelen realizarse entramados de bambú que posteriormente se recubren con tierra, barro o materiales similares, dando lugar al denominado bahareque.

El zoológico de Leipzig (Alemania) recibe alrededor de 1.3 millones de visitantes al año, por lo que en 2002 realizó un concurso para el diseño de un aparcamiento atractivo y económico que encajase con los terrenos del zoológico adyacentes. Como resultado, los arquitectos de Hentrich-Petschnigg & Partner (HPP), diseñaron una fachada de bambú que pretendía simular un caparazón, a la vez que hacía referencia al mundo exótico del zoo y transmitía una impresión suave y háptica (**Figura 98**). Dado que ganaron el concurso, su proyecto de garaje se construyó, finalizando las obras en el año 2004. Los 4000 m² de fachada del aparcamiento están revestidos con un total de 7700 cañas de bambú *Guadua angustifolia* procedente de Colombia, de 2.60 metros de longitud cada una y colocadas a intervalos de 7.5 centímetros entre sí, lo que aporta ventilación e iluminación natural al interior del aparcamiento. La única excepción es la zona situada frente a la entrada del zoológico, que cuenta con una fachada acristalada que rodea una escalera. Además de como elemento decorativo, el bambú es usado en el garaje como barandilla (Architectuul, 2021).



Figura 98. Fachada del aparcamiento del zoológico de Leipzig (Alemania).
Fuente: Architectuul.



Figura 99. Fachada de la extensión del aparcamiento del zoológico de Leipzig (Alemania).
Fuente: Archello.

En 2011, el aparcamiento fue ampliado mediante la construcción de un nuevo edificio, pero apostando de nuevo por el bambú como material para la fachada (**Figura 99**). A diferencia de lo que sucedía en el primer edificio, la extensión presenta ondulaciones idénticas a lo largo de la fachada, lo que aleja aún más al edificio de la función mundana y le aporta un aspecto único. Además, la fachada de bambú minimiza las emisiones de ruido y, como ya sucedía con el anterior garaje, permite la ventilación del aparcamiento y aporta iluminación natural al edificio (Archello, 2021).

Como se aprecia en la **Figura 100**, también el estudio de arquitectura austriaco Karawitz Architecture apostó por usar el bambú como material de acabado exterior cuando en el año 2009 diseñó y construyó su famosa *Passive House* (Casa Pasiva) en Bessancourt (Francia). La vivienda, de 177 m² de superficie y dos plantas de altura, pretende replicar la estética y distribución de una vivienda tradicional, pero aplicando en ella las técnicas más innovadoras de reducción de consumo de energía. La segunda piel del edificio está realizada con cañas de bambú distribuidas de manera homogénea, las cuales envuelven la estructura de la vivienda, que está fabricada con enormes paneles de madera maciza prefabricados en taller y ensamblados in situ. Este revestimiento, que se vuelve gris con el tiempo, se inspira en los graneros típicos de la región en la que se ubica la casa y cubre completamente la fachada y las ventanas que dan al norte, continuando por el techo. Persianas idénticas cubren los grandes ventanales del sur. La losa de cimentación es el único elemento de hormigón (ArchDaily, 2010a).



Figura 100. Passive House en Bessancourt (Francia), obra de Karawitz Architecture.
Fuente: Hervé Abbadie y Karawitz.

En cuanto a su uso como material de acabado en el interior de los edificios, el bambú se presenta como una gran opción, tal y como demuestra la propuesta que realizó el arquitecto Simón Vélez para la Terminal de Cabecera de Aguablanca (Cali, Colombia) del Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente (MIO) (**Figura 101**). La construcción se compondría de dos grandes naves rectangulares y paralelas de dos pisos de altura cada una, unidas entre sí en la zona central de la planta superior mediante una tercera nave ubicada de manera perpendicular a las otras dos, la cual actúa a modo de “puente”. La cubierta estaría realizada con tejas que descansarían sobre la estructura de *Guadua angustifolia* (Salas Delgado, 2012).



Figura 101. Propuesta del arquitecto Simón Vélez para la Terminal de Cabecera de Aguablanca (Cali, Colombia) del Sistema de Transporte Masivo Integrado de Occidente.
Fuente: Salas Delgado, 2012.

2.2.3.7. Grandes construcciones con bambú

El bambú tiene multitud de usos en el sector de la construcción y permite construir todo tipo de estructuras y edificaciones. Sin embargo, su empleo en la arquitectura europea es escaso debido a su desconocimiento y a la ausencia de normativas que regulen su uso. Para combatir este hecho, se exponen a continuación ejemplos de grandes construcciones realizadas con bambú a lo largo de todo el mundo.

Como ya se ha mencionado, Simón Vélez fue contratado por una importante empresa china para construir un hotel ecológico de 6000 m² en la localidad de Guanezhoua, China: el Crosswaters



Figura 102. Vista exterior de las zonas comunes del Crosswaters Ecolodge & Spa.
Fuente: Architizer.

Ecologde & Spa (**Figura 102**, **Figura 103** y **Figura 104**). Este proyecto comenzó en el año 2003, convirtiéndose en el primer complejo turístico ecológico del Parque Forestal Nacional de la Montaña de Nankun (en la provincia de Cantón, China). Es el proyecto comercial más grande del mundo que utiliza bambú y el primer proyecto en Asia de una escala tan grande en utilizar bambú como un elemento estructural en viviendas. Este proyecto de Simón Vélez recibió en 2006 el Premio de Honor en la categoría de Análisis y Planificación de la Sociedad Estadounidense de Arquitectos Paisajistas (Conciencia Eco, 2011).



Figura 103. Sala común del Crosswaters Ecolodge & Spa.
Fuente: Architizer.

El propósito era proteger la biodiversidad del bosque y respetar el espíritu del lugar a través de una planificación y diseño compatibles con el entorno. Este objetivo se consiguió mediante la realización de un estudio exploratorio previo y gracias a la creación de un equipo multidisciplinar que incluía desde expertos en arquitectura con materiales vegetales hasta estudiosos del feng shui (creencia muy importante en el sur de China). Para realizar este proyecto, Simón Vélez viajó hasta Cantón con 4 obreros colombianos que permanecieron dos años trabajando codo con codo con otros 150 obreros chinos, quienes

rápidamente aprendieron las técnicas diseñadas por Vélez para trabajar el bambú. El método empleado consistía en inyectar hormigón dentro de las cañas de bambú en aquellas zonas en que dos elementos constructivos se unían (More Hotels, 2012).

Dado que dentro del emplazamiento donde se levantaría el complejo ecoturístico existía una gran extensión natural de bambú que no se explotaba comercialmente, se optó por emplearlo en la construcción de la estructura. Además, la mayoría de los materiales que se usaron en la construcción y decoración fueron biodegradables, como el bambú, la madera y algunos textiles locales. También se reutilizaron insumos, como es el caso de las tejas de barro de la cubierta, que provenían de edificios demolidos en los poblados cercanos (More Hotels, 2012).



Figura 104. Túnel de entrada al Crosswaters Ecolodge & Spa.
Fuente: Architizer.



Figura 105. Jorge Morán Ubidia ante el Centro de Documentación del Bambú.
Fuente: Jorge Martillo M.

También en América del Sur podemos encontrar a otro gran experto que ha dedicado la mayor parte de su vida al estudio y la promoción de la construcción con bambú: el arquitecto ecuatoriano Jorge Andrés Morán Ubidia (**Figura 105**). A diferencia de Vélez, que realiza construcciones de grandes dimensiones, Morán Ubidia prefirió siempre dedicarse a la investigación y a la educación, empleando sus conocimientos en el desarrollo de viviendas sociales muy económicas que supusieron una gran mejora de las zonas más desfavorecidas de su país, otorgando así una mayor calidad de vida a las personas necesitadas. Para ello, colaboró con diversas empresas y organizaciones, entre ellas, la ya mencionada Hogar de Cristo.

La obra más reconocida de Jorge Morán es sin duda el Centro de Documentación del Bambú (**Figura 106** y **Figura 107**), que diseñó y construyó con ayuda de su amigo el arquitecto Robinson Vega Jaramillo. Esta obra está ubicada en Guayaquil (Ecuador), en la Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, junto a la Facultad de Arquitectura y Diseño (Rodríguez, 2013). El edificio cuenta con 40 m² de superficie, en los que se incluyen un área de estudio (equipada con ordenadores, mesas y sillas) y una zona con estanterías que alberga la colección de libros y documentos sobre el bambú que Morán Ubidia donó a la Facultad de Arquitectura.

Para salvar la topografía y evitar la influencia de la humedad, el edificio se separó del suelo, por lo que cada columna y viga de *Guadua* descansa sobre una banda de neopreno de 8 mm de grosor, separándolas de los elementos de hormigón, evitando así la humedad por capilaridad y amortiguando las vibraciones en caso de sismo. Además, todas las piezas de bambú empleadas fueron tratadas para mejorar su resistencia al fuego y al ataque de xilófagos. La estructura se basa en la triangulación de fuerzas y emplea apoyos puntuales de carga por medio de conos y monturas metálicas de acero, relleno de los entrenudos de las uniones con mortero de cemento. Para los cerramientos y el suelo se emplearon tableros estructurales de bambú, que asumen parte de los esfuerzos de deformación del edificio. Con los residuos de bambú, se fabricaron tableros con los que se hizo el mobiliario (Archivo Digital Arquitectura Panamericana, 2020).



Figura 106. Vista exterior del Centro de Documentación del Bambú.

Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.

La cimentación está conformada por plintos, muros de piedra y vigas de hormigón armado. Sobre éstas descansa la construcción, formada por columnas, vigas y diagonales de *Guadua*



Figura 107. Vista interior del Centro de Documentación del Bambú.

Fuente: Archivo Digital Arquitectura Panamericana.

rolliza, ancladas a la cimentación por medio de varillas de acero empotradas en las columnas. La cubierta cuenta con grandes aleros que protegen el edificio de la lluvia y de los rayos UV. Para minimizar la incidencia solar, se colocaron marquesinas y antepechos de bambú en los ventanales y se plantó bambú en los alrededores para generar sombra (Archivo Digital Arquitectura Panamericana, 2020). El edificio minimiza el consumo energético, aprovechando la ventilación cruzada, la sombra y el aislamiento térmico de la cubierta metálica con poliuretano. Dos puntos de ventilación pasiva inducida, dispuesta bajo la edificación, introducen aire fresco en el edificio, mientras que dos ventiladores de techo expulsan el aire caliente (Rodríguez, 2013).

Existe también un renombrado estudio de arquitectura que ha dado a conocer las bondades del bambú internacionalmente gracias a los magníficos proyectos que ha realizado con este material en Indonesia. Dicho estudio no es otro que IBUKU.

IBUKU es un equipo de arquitectos, diseñadores y artesanos liderados por la balinesa Elora Hardy, diseñadora y directora creativa del estudio. IBUKU se hizo famoso por la construcción en 2008 de la *Green School* (Escuela Verde), una institución educativa privada e internacional fundada por John y Cynthia Hardy, los padres de Elona (Galiana, 2016).

La *Green School* (**Figura 108**) se ubica a ambos lados del río Ayung, cerca de Abiansemal (Bali, Indonesia), y tiene 7542 m² de superficie. El campus cuenta con todo tipo de espacios: lugares de reunión con varios pisos de altura, aulas, oficinas, baños, gimnasio, cafetería y hasta viviendas para los profesores, todo ello construido con bambú local cultivado con métodos sostenibles y utilizado de formas innovadoras y experimentales que muestran sus posibilidades arquitectónicas. Además, el campus, que se construyó dentro de una exuberante jungla con plantas y árboles nativos que crecen junto a jardines orgánicos sostenibles, funciona con varias fuentes de energía alternativas, entre las que se incluye un sistema de cocción y agua caliente con serrín de bambú (ArchDaily, 2010b).



Figura 108. Vista exterior de la Green School.
Fuente: Iwan Baan.

Este proyecto se inició con el objetivo de motivar a las comunidades a vivir de manera sostenible, lo que incluía mostrar a la gente cómo construir con materiales ecológicos como el bambú. Por este motivo, se establecieron también la Fundación Meranggi, que desarrolla plantaciones de bambú mediante la presentación de plántulas de bambú a los cultivadores de arroz locales, y PT Bambú, una empresa de diseño y construcción con fines de lucro que promueve el uso del bambú como material

principal de construcción, en un esfuerzo por evitar el agotamiento de las selvas tropicales. El resultado es una comunidad verde holística con un fuerte mandato educativo que busca inspirar a los estudiantes a ser más curiosos, más comprometidos y más apasionados con el medio ambiente y el planeta (Soler Soler, 2017).

A poca distancia de la *Green School*, como ampliación a ésta, IBUKU construyó en 2010 la *Green Village* (Pueblo Verde), una zona residencial de 18700 m² de superficie repleta de casas de bambú diseñadas y construidas alrededor de los contornos naturales de cada parcela, lo que les proporciona hermosas vistas al río Ayung y a los volcanes de Bali. Al igual que la *Green School*, la *Green Village* se basa en los conceptos arquitectónicos de construcción sostenible y autosustentabilidad. El concepto es crear hermosos espacios de vida, en los que las personas puedan sentirse conectadas con la naturaleza sin interrumpirla, es decir, respetar el medio ambiente mediante la combinación de arquitectura y sostenibilidad (ArchDaily, 2012b).



Figura 109. Sharma Springs vista desde el sur.
Fuente: Río Helmi.

Como parte de la *Green Village*, por petición de la familia Sharma, IBUKU diseñó y construyó en 2012 una vivienda de 750 m², con 6 plantas y 4 dormitorios con vistas al valle del río Ayung. La residencia recibe el nombre de *Sharma Springs* (Manantiales de Sharma) y está construida casi en su totalidad con bambú (**Figura 109** y **Figura 110**). La entrada a la casa se realiza a través de un espectacular túnel-puente que conecta directamente con los espacios de la cuarta planta: la sala de estar, el comedor y la cocina.



Figura 110. Sharma Springs vista desde el noreste.
Fuente: Río Helmi.

Las escaleras, que rodean la torre central de la que parte todo el edificio, comunican con el resto de niveles. Las plantas inferiores contienen una sala de juegos, una biblioteca y los dormitorios, mientras que la última planta es un mirador con increíbles vistas del atardecer sobre el valle del río Ayung. El equipo de IBUKU también diseñó los muebles de bambú de la casa (ArchDaily, 2019).

Sólo 3 años después, en 2015, el estudio construyó en el mismo valle una vivienda compuesta por tres edificios que recibió el nombre de *Ananda House* (Casa Ananda), la cual se aprecia en la **Figura 111**. De nuevo el material principal es el bambú, que aporta un valor único en esta edificación, cuyas cubiertas toman la forma de enormes hojas ligeramente curvadas. La estructura más pequeña del conjunto es un pabellón abierto en forma de lágrima, que contiene la sala de estar, la cocina y un pequeño loft. El edificio mediano, de dos plantas de altura, está destinado al descanso y cuenta en cada planta con un dormitorio, un balcón y un baño privado. La estructura más grande tiene tres plantas de altura y es la situada más al norte de las tres. En la planta baja se encuentra el dormitorio principal, que está orientado al este y cuenta con un elaborado baño al aire libre. El espacio de la planta intermedia se desplaza con respecto al de la inferior, de modo que la habitación queda orientada hacia el noreste, apuntando directamente hacia el Monte Agung. En la planta más alta de este edificio se encuentra una pequeña habitación diseñada a modo de mirador, a la que se accede por una escalera a través de una trampilla. *Ananda House*, al igual que el resto de obras de IBUKU, promociona la apuesta por el bambú y por la construcción sostenible con materiales ecológicos y reciclables (ArchDaily, 2020).



Figura 111. *Ananda House*.
Fuente: Stephen Johnson.

Pero este estudio no sólo fabrica viviendas y escuelas. En 2007, IBUKU participó en la construcción de un edificio imaginado por Aldo Landwher, un ex escultor y diseñador de joyas que participó en el diseño de la *Green School* (**Figura 112** y **Figura 113**). Dado que inicialmente se diseñó para ser usado como restaurante, recibió el nombre de *Aldo's Kitchen* (La Cocina de Aldo), aunque actualmente es la sede la oficina de IBUKU (IBUKU, s.f.).



Figura 112. Vista exterior de la *Aldo's Kitchen*.
Fuente: IBUKU.

El edificio, de 500 m² de superficie, se inspira en la forma de un caracol (en espiral y sin partes ortogonales) y cuenta con 3 plantas de altura desarrolladas alrededor de una gran torre central que permite la entrada de luz cenital. Debido al clima de la región, no existen muros perimetrales, lo que permite una ventilación abundante, que incluso recorre los distintos pisos debido a que el suelo de bambú es permeable. Los grandes aleros de la estructura impiden que la lluvia afecte al entorno de trabajo (ArchDaily, 2018).

La estructura está compuesta principalmente por bambú de la especie *Dendrocalamus asper*, conocido localmente como *Petung*, cuya longitud útil alcanza unos 18 metros. Los pilares de bambú, igualmente espaciados entre sí, siguen la forma de espiral, con las vigas que sostienen el techo colocadas radicalmente desde la torre central. *Aldo's Kitchen* fue uno de los primeros edificios de bambú en el área y ha demostrado con creces la versatilidad y longevidad de las estructuras de bambú (ArchDaily, 2018).



Figura 113. Interior de la *Aldo's Kitchen*.
Fuente: IBUKU.

En lo que respecta a arquitectura deportiva hecha con bambú, la *Kura Kura Badminton Court* (Cancha de Bádminton Kura Kura), construida en 2016, es un ejemplo perfecto (**Figura 114** y **Figura 115**). La idea surgió de Studio Jencquel, un estudio internacional de diseño y arquitectura ubicado en Ubud (Indonesia) y fundado en 2011 por el venezolano Maximilian Jencquel (Studio Jencquel, 2020).



Figura 114. Interior de la Kura Kura Badminton Court.
Fuente: Tommaso Riva.

Studio Jencquel estaba desarrollando una residencia privada llamada *Rumah Hujan Villa* y disponía de un terreno libre cercano a la calle, por lo que optó por construir un edificio deportivo que amortiguase el ruido procedente de la calle. Maximilian Jencquel optó por crear una cancha de bádminton, pero, dado que el volante necesita una altura libre de 9 metros para realizar su trayectoria parabólica, Jencquel necesitaba que el edificio tuviese curvas pronunciadas, por lo que eligió fabricarlo con bambú. Fue entonces cuando contactó con IBUKU y ambos estudios comenzaron a colaborar en el proyecto.

Decidieron emplear dos especies distintas con la idea de contrastar el bambú negro y el rubio. Además, se optó por extender las líneas del techo hasta casi tocar el suelo, para evitar así que los vientos dominantes afectasen al edificio mientras se mantenía la circulación de aire necesaria para asegurar que el calor salga del edificio (ArchDaily, 2021).

La *Kura Kura Badminton Court* tiene una superficie de alrededor de 300 m² y su forma exterior está inspirada en el caparazón de una tortuga. El pabellón está construido completamente con bambú (tanto la estructura como la cubierta), excepto el suelo, que es de una resina de caucho especial. La estructura de la cubierta está construida siguiendo una forma ergonómica y cuenta con la altura de 9 metros necesaria para garantizar una trayectoria ininterrumpida del volante (Studio Jencquel, 2020).



Figura 115. Exterior de la Kura Kura Badminton Court.
Fuente: Tommaso Riva.

Cambiando totalmente de registro, el arquitecto japonés Kengo Kuma emplea el bambú como un elemento estético que permite jugar con la luz y crear espacios personales e íntimos, como dejó claro en su proyecto *Great (Bamboo) Wall* (Gran Muralla de Bambú), representado en la **Figura 116** y en la **Figura 117**.



Figura 116. Exterior del edificio *Great (Bamboo) Wall*.
Fuente: Arquitectura Viva.

En el año 2002, Kengo Kuma y otros nueve arquitectos asiáticos recibieron el encargo de diseñar diez residencias cada uno, creando un conjunto de cien estructuras que conforman una comunidad ambientalmente sostenible en un bosque adyacente a la Gran Muralla China. El concepto básico de Kengo Kuma y su equipo fue dejar intactas las características geográficas originales y utilizar materiales de producción local tanto como fuera posible. Por lo tanto,

decidieron construir las paredes de las casas para que realzaran las características geográficas existentes. Para ello, diseñaron las paredes como filtros formados por bambú, de modo que permitiesen el paso de la luz y el viento. El bambú es un símbolo del intercambio cultural entre Japón y China, por lo que querían que el edificio fuera un símbolo similar de intercambio cultural y conexión entre dos mundos (World-Architects, 2020).

En la mayoría de paredes del edificio, la distancia entre las cañas de bambú que las conforman es fija, pero tanto la pared de bambú que separa la cocina del comedor como las que envuelven la zona central del patio, permiten acercar o alejar entre sí las cañas de bambú, por lo que actúan casi más como cortinas que como muros (KENGO KUMA Atmospheric Works 2000-2014, 2014). Kengo Kuma varió la distancia entre las cañas de bambú y el grosor de éstas en las distintas paredes de la casa, definiendo un nivel diferente de luz en cada una y creando una peculiar fluidez al pasar de un espacio a otro. La luz penetra entre los delgados tallos, generando en el usuario la sensación de que la casa se encuentra en mitad de un bosque de Asia. Con creaciones como esta, Kuma tiene como objetivo restaurar la tradición de los edificios japoneses, pero aplicando un enfoque moderno centrado en el uso de materiales ligeros y naturales que otorgan un nuevo tipo de transparencia (Inhabitat, 2006).



Figura 117. Patio del edificio Great (Bamboo Wall).
Fuente: Arquitectura Viva.

En Vietnam también hay estudios especializados en el diseño y la construcción con bambú, así como magníficos ejemplos de edificaciones realizadas con este noble material.

El complejo turístico *Flamingo Dai Lai Resort* fue diseñado y construido para que los habitantes de la ciudad disfruten de sus fines de semana en un entorno más natural. El complejo se ubica en medio de bosques, cerca del lago Dai Lai y a sólo unos 50 km de Hanói, capital de Vietnam. Este resort cuenta con dos edificios emblemáticos construidos con bambú: *Bamboo Wing* (Ala de bambú) y *Dai Lai Conference Hall* (Sala de Conferencias Dai Lai), ambos obra del estudio vietnamita de arquitectura Vo Trong Nghia Architects (Stevens, 2014).

El edificio Ala de Bambú (**Figura 118** y **Figura 119**), construido en 2009, tiene una superficie de 1430 m² y consiste en una estructura techada de bambú semicircular de 190 m de perímetro y 12 m de ancho aproximadamente, posada sobre un espejo de agua y articulada en torno al extremo noreste del Hồ Thiên Yến, uno de los “meandros” del lago Dai Lai. La estructura sirve como espacio para la realización de eventos y restaurante entre otros múltiples usos (Laino, 2015).



Figura 118. Interior del Bamboo Wing.
Fuente: Hiroyuki Oki.

Las columnas de bambú se alinean metódicamente apoyadas en un punto, lo que genera un amplio espacio libre de obstrucciones. La estructura curva empleada evidencia lo versátil y fuerte que es el material que la constituye. Los autores mencionan que uno de los objetivos del proyecto era el estudio del bambú y el potencial del espacio que éste puede crear, no sólo como material de acabado, sino como material estructural. Asimismo, se utilizan soportes de acero para el arriostramiento y cuerda para la unión entre cañas. La cubierta está hecha con una mezcla de quincha y paja (Laino, 2015).

El proyecto utiliza los principios del diseño aerodinámico, lo que permite la reducción del uso de



Figura 119. Detalle del Bamboo Wing.
Fuente: Hiroyuki Oki.

energía eléctrica, acondicionando el aire de forma natural. Inspirada en la naturaleza, la estructura toma la forma de las alas de un pájaro, por lo que el techo captura en el interior del edificio el viento enfriado por el agua del lago. Esto contribuye a su eficiencia energética, minimizando el uso de aire acondicionado. Asimismo, la profundidad de los aleros proyecta una cuantiosa sombra en el espacio interior. Con sus aleros profundos y el agua en los espacios abiertos, los visitantes se sienten como si estuvieran en medio de la naturaleza (Franco, 2012).

Cabe mencionar que, eventualmente, cuando el nivel del lago iguala el del espejo de agua, la obra se amalgama con la naturaleza, fusionándose, conformando un escenario idílico. Mediante la utilización de materiales naturales locales y la experimentación con la luz, el viento y el agua, Vo Trong Nghia Architects crea una sensación de lujo, calidad espacial y armonía con la naturaleza (Laino, 2015).

La Sala de Conferencias Dai Lai (**Figura 120** y **Figura 121**) fue construida en el año 2012, tiene 730 m² y toma la forma de un impresionante muro curvo de piedra de 80 metros de largo, 8 metros de alto y 1 metro de espesor. Un acceso ortogonal entre colinas artificiales conduce a los visitantes a través del muro de piedra hasta un vestíbulo cubierto por una estructura de bambú de grandes dimensiones. La razón para elegir este material fue el deseo de realizar una estructura de gran envergadura que emplease materiales locales que creasen un espacio agradable en el que realizar eventos. En este sentido, el bambú era el material ideal: es un material local, presenta un hermoso color y textura, es ligero y se pueden cubrir grandes luces con él (ArchDaily, 2012a).



Figura 120. Interior del Dai Lai Conference Hall.
Fuente: Hiroyuki Oki.



Figura 121. Detalle del techo de bambú del Dai Lai Conference Hall.
Fuente: Hiroyuki Oki.

Para fabricar la estructura los arquitectos quisieron usar bambú “*Tam Vong*”, una variedad típica del sur de Vietnam flexible y adecuada para crear figuras curvas, pero, dado que es difícil encontrarlo en el norte del país, optaron por usar bambú “*Luong*”. El problema que encontraron es que dicha variedad tiene un gran diámetro, por lo que es difícil de doblar. El desafío consistía en crear una forma curva utilizando un bambú duro y recto. Por ello, los marcos del techo tenían que cambiar su forma gradualmente. Este es el motivo por el que la estructura conformada se define como una serie de cerchas dispuestas de modo que sigan la curva de la

fachada a la vez que soportan el techo asimétrico (Frearson, 2013). Para realizarla, varias cañas de bambú se unieron entre sí para formar “vigas compuestas” de mayor grosor, lo que garantiza mayores resistencias que si se usasen las cañas de forma individual. Además, esta técnica

permite cubrir luces más grandes, como los 13.60 metros de luz que se requirieron en la sala de conferencias Dai Lai. Aunque los requisitos funcionales como centro de conferencias dividen el espacio en salas específicas, la estructura de bambú permite a los visitantes sentir los espacios más amplios y abiertos, mostrando su continuidad a través del espacio abierto que queda sobre las particiones (ArchDaily, 2012a).

El estudio Vo Trong Nghia Architects recibió en el año 2014 el máximo honor en los premios del Consejo Regional de Arquitectos de Asia (ARCASIA), donde el *Dai Lai Bamboo Complex* (Complejo de Bambú Dai Lai), definido como el conjunto formado por *Bamboo Wing* y *Dai Lai Conference Hall*, fue seleccionado entre 276 propuestas y galardonado con el *Building of the Year Award* (Premio al Edificio del Año), uno de los premios más prestigiosos de la arquitectura asiática (Stott, 2014).

Este estudio de arquitectura construyó también el *Diamond Island Community Center* (Centro Comunitario Isla Diamante), que se levantó en 2015. Se trata de un centro comunitario de 1450 m² ubicado en una península del río Saigón, al este de la ciudad de Ho Chi Minh (Vietnam). El conjunto cuenta con un total de 8 pabellones de planta redonda, con intrincadas estructuras de bambú y techos de paja. Estos espacios son utilizados por turistas y residentes locales para realizar todo tipo de actividades, como fiestas, banquetes, conferencias, etc. (Frearson, 2015).



Figura 122. Cúpula grande y cúpula pequeña del *Diamond Island Community Center*.
Fuente: Hiroyuki Oki.

Las 8 estructuras están repartidas por un parque. Las dos cúpulas más grandes miden 24 metros de diámetro y 12.5 metros de altura, presentando un perfil redondeado que les da aspecto de setas gigantes. Estas cúpulas fueron fabricadas in situ por trabajadores especializados. Las otras seis estructuras tienen 11 metros de diámetro y 7 metros de altura, y su forma se asemeja más a la de paraguas. Cada una de estas cúpulas consta de 12 unidades estructurales prefabricadas ensambladas, lo que proporciona mayor eficiencia constructiva. Según el estudio, las estructuras están inspiradas en las tradicionales

cestas de bambú que los granjeros vietnamitas usaban para albergar aves (ArchDaily, 2015). La **Figura 122** y **Figura 123** reflejan el aspecto final de las cúpulas construidas.

Debajo de la cubierta de paja, cada pabellón tiene una compleja estructura de bambú. Varias cañas se unen para crear columnas que parten del suelo y que se extienden hasta encontrarse con los anillos que enmarcan el techo en forma de cúpula. El bambú incluso se usa en las uniones entre diferentes secciones de las cúpulas pequeñas, manteniendo unido el marco. En cambio, los grandes pabellones son estructuras de domo de doble capa. La capa exterior del techo de paja sobresale de la estructura interna en forma de canasta para crear aleros profundos, protegiendo toda la estructura de bambú de la fuerte luz del sol y las fuertes lluvias. Además, las ocho estructuras tienen un tragaluz redondo en la parte superior del techo para garantizar que no se necesite iluminación artificial para las actividades diurnas. El aire caliente también sale por esta abertura, manteniendo los espacios bien ventilados (Frearson, 2015).



Figura 123. *Cúpula grande del Diamond Island Community Center.*
Izquierda: Vista interior. Derecha: Vista exterior.
Fuente: Hiroyuki Oki

A pesar de la aplicación de varios métodos de construcción tradicionales, el objetivo del proyecto no es reproducir la arquitectura vernácula, sino crear una sostenible adaptada al presente. Para ello, la sistematización de la producción y construcción de la arquitectura de bambú es fundamental y, como resultado, el proyecto es una fusión de arte popular tradicional y arquitectura contemporánea (ArchDaily, 2015).

2.2.4. NORMATIVA

En este apartado se presenta una recopilación de las principales normativas y regulaciones sobre bambú utilizadas en diferentes países. Los documentos aquí presentados no abarcan el total existente, sino que son sólo una representación escogida por la importancia de su contenido, por su relevancia a nivel mundial (puesto que algunas de ellas han servido como base para la redacción de otras normas) y por la extensión de su uso.

Las normas y regulaciones seleccionadas se presentan divididas en función de su país de origen y ordenadas en función de su importancia. De cada una de ellas se incluye el título en español, la normativa a la que sustituye (en caso de que sea aplicable) y un breve resumen de su contenido, indicando su aplicación principal y los aspectos que la caracterizan.

En primer lugar, se desarrollan las normas de carácter internacional relacionadas con el bambú. Seguidamente, se presentan las normas de distintos países, desarrollando en primer lugar la norma de mayor relevancia. Al final del apartado, se incluyen algunas normas de carácter no obligatorio desarrolladas por INBAR, que sirven como guía práctica para el uso y la aplicación del bambú en la construcción de viviendas.

2.2.4.1. Organización Internacional para la Estandarización (ISO)

En 2004, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) publicó tres normas sobre la construcción con bambú (*ISO 22156*, *ISO 22157-1* e *ISO 22157-2*), lo que supuso el primer paso para estandarizar el bambú para este propósito. Estas normas se redactaron con base en el conocimiento tradicional y hacían referencia a las normas ISO sobre madera existentes, adaptando los métodos de ensayo al bambú (Sharma, 2010).

En la actualidad, las tres normas publicadas en 2004 han sido derogadas y sustituidas por versiones actualizadas de las mismas, cuyo contenido se comenta a continuación. Además, ISO ha continuado creando normas relacionadas con el bambú conforme la evolución tecnológica ha permitido desarrollar nuevos productos y aplicaciones con este material, por lo que se incluye un listado con los títulos de algunas de ellas.

- **ISO 22156:2021 *Bamboo structures – Bamboo culms – Structural design***

Título: ISO 22156:2021 *Estructuras de bambú – Culmos de bambú – Diseño estructural*

Sustituye a: ISO 22156:2004 *Bamboo – Structural design*

Este documento se aplica al diseño de estructuras de bambú cuya estructura principal esté fabricada con culmos de bambú o con sistemas de paneles en los que los elementos estructurales estén hechos de culmos de bambú, pero no contempla su aplicación en el caso de andamios ni estructuras fabricadas con productos mecanizados de bambú (como laminados, composites, etc.) o con materiales en los que el bambú no es el principal componente de carga. Además, únicamente se aplica en la construcción de edificios residenciales, comerciales, institucionales e industriales de una o dos plantas de altura, que no excedan los 7 m de altura (ISO, 2021).

Esta norma indica cómo calcular la capacidad de carga admisible y/o la tensión admisible para el diseño de estructuras de bambú, refiriéndose únicamente a los requisitos de resistencia

mecánica, capacidad de servicio y durabilidad de las estructuras de bambú. Por lo tanto, no se contemplan otros requisitos, como los relativos al aislamiento térmico o acústico. No obstante, el documento también contempla criterios de diseño basados en métodos de diseño de factor de seguridad parcial, diseño de factor de carga y resistencia, experiencia previa establecida o enfoques documentados de “diseño por prueba” (ISO, 2021).

La norma proporciona una serie de factores de modificación (denominados C_i), determinados empíricamente y considerados universalmente aplicables a los materiales de bambú que son apropiados para la construcción de edificios. Además, contempla los parámetros que afectan al rendimiento del bambú, utilizando valores característicos de resistencia y rigidez determinados experimentalmente (ISO, 2021).

- **ISO 22157:2019 *Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods***

Título: ISO 22157:2019 *Estructuras de bambú – Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú – Métodos de ensayo*

Sustituye a: ISO 22157-1:2004 *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1: Requirements* + ISO/TR 22157-2:2004 *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 2: Laboratory manual*

Esta norma recoge los métodos de ensayo aplicables a especímenes obtenidos de culmos de bambú, permitiendo determinar su: contenido de humedad, densidad, masa por unidad de longitud, resistencia paralela a las fibras en compresión, tracción y flexión, y resistencia perpendicular a las fibras en tracción y flexión. También proporciona métodos para calcular los módulos de elasticidad en flexión, compresión y tracción paralela a las fibras y flexión perpendicular a las fibras (ISO, 2019).

Los métodos de ensayo recogidos en esta norma pueden ser utilizados como referencia para la investigación científica y/o ser aplicados en la determinación de las propiedades y características físicas y mecánicas de los culmos de bambú que vayan a ser empleados con fines comerciales como material estructural (ISO, 2019).

- **ISO 19624:2018 *Bamboo structures – Grading of bamboo culms – Basic principles and procedures***

Título: ISO 19624:2018 *Estructuras de bambú – Clasificación de las cañas de bambú – Principios y procedimientos básicos*

Esta norma parte del principio de que cualquier tipo de procedimiento de clasificación de los culmos de bambú es aceptable, siempre que esté definido, controlado y documentado en la medida requerida para lograr el grado de confiabilidad previsto para la aplicación estructural del producto. Este documento especifica los procedimientos que se ajustan a este principio, incluyendo clasificación visual, dimensional y mecánica para garantizar la conformidad (ISO, 2018).

La clasificación visual se basa en las características observables de la pieza. La clasificación mecánica utiliza la medición no destructiva de propiedades del culmo que se correlacionan con determinados valores característicos. Los procedimientos de clasificación de este documento se pueden utilizar en un régimen de aceptación de calidad, aunque la norma no define ni aborda

los criterios de aceptación. Además, sólo permite clasificar culmos de bambú en estado seco (ISO, 2018).

Por lo tanto, según la ISO 19624, la clasificación se puede hacer según el origen del material (por ejemplo, la especie de bambú o la plantación de la que procede) o según su finalidad (es decir, para qué va a utilizarse). La norma define la clasificación como “*el método de clasificar cada pieza de bambú en una muestra en grados según los criterios de selección descritos*”, utilizando características que afectan a la resistencia o a la capacidad de carga de los elementos de bambú (Amede, *et al.*, 2021).

La ISO 19624 divide esas características en propiedades condicionales, geométricas y dimensionales. Las propiedades condicionales se refieren al estado del material en términos de contenido de humedad, edad en el momento de la cosecha, daño por insectos y hongos, y defectos tales como fisuras y muescas longitudinales. Las propiedades dimensionales se refieren al diámetro, espesor de la pared, longitud de los entrenudos y longitud del culmo. Las propiedades geométricas se refieren al arco, la conicidad y la ovalidad⁸ de la caña (ISO, 2018).

- **Otras normas ISO relacionadas con el bambú**

La constante evolución tecnológica ha permitido desarrollar nuevos productos basados o relacionados directamente con el bambú, por lo que ISO ha publicado una serie de normas al respecto que, debido a su menor relación con el tema principal de esta Tesis Doctoral, no se desarrollan en este apartado, pero cuyos títulos se indican a continuación:

- ISO 21626-1:2020 *Bamboo charcoal – Part 1: Generalities*
- ISO 21626-2:2020 *Bamboo charcoal – Part 2: Fuel applications*
- ISO 21626-3:2020 *Bamboo charcoal – Part 3: Purification applications*
- ISO 21625:2020 *Vocabulary related to bamboo and bamboo products*
- ISO 21629-1:2021 *Bamboo floorings – Part 1: Indoor use*

Además, ISO tiene está desarrollando otras siete futuras normas relacionadas con el bambú, cuyos títulos son los siguientes:

- ISO/DIS 21629-2 *Bamboo floorings — Part 2: Outdoor use*
- ISO/WD 5942 *Bamboo-wood Composite for Container Flooring*
- ISO/CD 5946 *Bamboo-based Activated Carbon*
- ISO/CD 6128 *Laminated products made of bamboo strips for indoor furniture purposes*
- ISO/AWI 7567 *Bamboo Structures — Glued laminated bamboo – Product specification*
- ISO/DIS 23478 *Bamboo structures – Engineered bamboo products – Test methods for determination of physical and mechanical properties*
- ISO/CD 5257 *Bamboo Structures — Engineered bamboo composites — Evaluation requirements*

⁸ Defecto de redondez de la sección de un tubo. Es la relación entre la diferencia entre el diámetro mayor y el menor y el diámetro nominal (CONSTRUTECH, s.f.).

2.2.4.2. China

Como resultado de una mayor investigación sobre la construcción con bambú, China desarrolló alrededor de 86 normas y códigos relacionados con el bambú y sus materiales derivados. Estas regulaciones abarcan desde la cosecha de los culmos hasta la gestión de la calidad en varios aspectos (Amede, *et al.*, 2021).

De entre esas normas, a continuación, se explica la JG/T 199-2007: *Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building*, que proporciona métodos de ensayo para las propiedades físicas y mecánicas del bambú utilizando secciones de la pared del culmo para las pruebas mecánicas en lugar del culmo completo.

- **JG/T 199-2007: *Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building***

Título: JG/T 199-2007: Método de ensayo para las propiedades físicas y mecánicas del bambú utilizado en la construcción

Estado: Vigente

Esta norma incluye una serie de términos y definiciones relacionados con el bambú. Además, indica los procedimientos que deben seguirse durante el corte y transporte de los culmos que serán ensayados, así como el proceso de elaboración de especímenes y los requisitos básicos que deben cumplirse. El documento permite calcular: el contenido de humedad de las muestras, su higroscopia, su densidad y su contracción. En relación a la determinación de las propiedades físicas y mecánicas del bambú utilizado en construcción, esta norma permite determinar las resistencias: a compresión perpendicular a las fibras, a compresión paralela a las fibras y su módulo de elasticidad, a tracción paralela a las fibras y su módulo de elasticidad, a flexión y su módulo de elasticidad, a corte paralelo a las fibras y al impacto (Harbin Institute of Technology, 2007).

La norma JG/T 199-2007 incluye las pruebas físicas y mecánicas que se encuentran en la norma ISO 22156:2004, pero difiere en los métodos y parámetros de ensayo. Por ejemplo, JG/T 199-2007 utiliza como especímenes a evaluar secciones de la pared de la caña para todas las pruebas mecánicas, mientras que la norma ISO utiliza la caña completa para las pruebas de compresión, corte y flexión. Además, la norma china utiliza pruebas independientes para obtener el módulo de elasticidad en compresión, tracción y flexión; y proporciona un factor de corrección, que utiliza una ecuación empírica para tener en cuenta el contenido de humedad en la muestra, para obtener los valores de resistencia y rigidez (Gatóo, *et al.*, 2014).

- **Otras normas de China relacionadas con el bambú**

En China existen otras normas relacionadas con el bambú y su uso en el diseño y construcción de elementos estructurales. Entre ellas, destacan:

- JG/T 428-2014: *Composite ply bamboo form with steel frame*
- JGJ 254-2011: *Technical code for the safety of bamboo scaffold in construction*
- GB/T 2690-2000: *Bamboo timber*
- GB/T 30762-2014: *Quality grading standards of main bamboo shoot*
- GB/T 15780-1995: *Testing methods for physical and mechanical properties of bamboo*

2.2.4.3. Colombia

En Colombia, la principal regulación sobre el uso del bambú en la construcción se desarrolló tras evaluar los daños ocasionados por el terremoto del Eje Cafetero de 1999⁹ y comprobar que el 90% de las pérdidas ocurrieron en viviendas que no estaban construidas con bambú. Este hecho animó a la Asociación de Ingenieros Estructurales de Colombia a estudiar las propiedades físicas y mecánicas del bambú. Así pues, en 2002, el Gobierno de Colombia incorporó (por medio del Decreto 52 de 2002) al Título E del *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98* el Capítulo E.7, que permite el uso de bambú en estructuras siempre que sea parte de un sistema de bahareque, lo que limita el papel del bambú. Además, no contiene orientación sobre el diseño de vigas y sólo incluye valores prescriptivos y muy limitados para el diseño de columnas y conexiones (Amede, *et al.*, 2021).

En este apartado se incluye una descripción del *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, que sustituyó al *NSR-98* y que incorporó un Título dedicado al diseño y construcción de estructuras con bambú. Además, se incluye un listado con algunas de las Normas Técnicas Colombianas más importantes en relación al bambú.

- ***Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10 (Título G – Estructuras de Madera y Estructuras de Guadua)***

Sustituye a: *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-98*

El *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10*, a diferencia del *NSR-98*, incluye el *Título G. Estructuras de madera y estructuras de Guadua*, que se centra en el diseño y construcción de estructuras con la especie de bambú más común en Colombia: la *Guadua*.

Este título establece los requisitos mínimos para el diseño estructural y sismorresistente con *Guadua*, utilizando un diseño en el que la tensión admisible se determina a partir de propiedades mecánicas, obtenidas de ensayos experimentales, y modificadas por múltiples factores de seguridad para tener en cuenta la incertidumbre en las condiciones de prueba y los métodos de ensayo (Gatío, *et al.*, 2014). También contiene algunas guías de clasificación visual, un proceso para obtener valores característicos, propiedades mecánicas, procedimientos de diseño para vigas y columnas, algunos valores de diseño para conexiones y valores de resistencia de muros de carga. Sin embargo, sólo considera la especie *Guadua angustifolia Kunth* y no incluye el procedimiento de determinación del valor de diseño de conexión (Amede, *et al.*, 2021).

No obstante, es considerado el primer y más completo reglamento desarrollado para el diseño estructural con bambú, por lo que ha servido como modelo de referencia para la elaboración de la *Norma Ecuatoriana de la Construcción – Seguridad Estructural – Guadua*, de la *Norma Técnica Peruana E.100 Bambú* y de la *Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado*, desarrollada por INBAR.

⁹ El terremoto del Eje Cafetero de 1999 fue un sismo que afectó gravemente a los departamentos de Quindío y Risaralda, en Colombia. El terremoto tuvo lugar el día 25 de enero de 1999 a las 13:19 (hora local) y tuvo una magnitud de 6.2 en la Escala de Richter (El País, 2019).

- **Otras normas de Colombia relacionadas con el bambú**

Colombia cuenta también con una serie de Normas Técnicas que complementan al *NSR-10* y que regulan otros aspectos del cultivo, la comercialización y el uso del bambú. A continuación, se incluye el título de algunas de ellas:

- NTC 5300 - *Cosecha y postcosecha del culmo de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5301 - *Preservación y secado del culmo de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5405 - *Propagación vegetativa de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5407 - *Uniones de estructuras con Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5458 - *Elaboración de artesanías y muebles con culmos maduros de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5525 - *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 5726 - *Inventario de rodales de Guadua angustifolia Kunth para aprovechamientos con fines comerciales*
- NTC 5727 - *Terminología aplicada a la Guadua y sus productos*
- NTC 5829 - *Obtención de latas y tablillas de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 6100 - *Etiquetas ambientales Tipo I. Sello ambiental colombiano. Criterios ambientales para productos de primero y segundo grado de transformación de Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 6191 - *Hojas caulinares de Guadua angustifolia Kunth y productos artesanales elaborados a partir de ellas*
- NTC 6338 - *Casetones con Guadua angustifolia Kunth*
- NTC 6389 - *Identificación y cualificación de servicios ecosistémicos de guaduales naturales plantados (Guadua angustifolia Kunth)*

Cabe señalar que la NTC 5525 - *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth*, es una adopción modificada de la norma ISO 22157-1:2004 *Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – Part 1: Requirements*.

Además, existen una serie de Guías Técnicas Colombianas que se presentan como herramientas de aprendizaje de determinadas metodologías relacionadas con el bambú. Entre ellas, destacan:

- GTC 220 - *Tablas a partir de esterilla (tablerilla) de Guadua angustifolia Kunth*
- GTC 270 - *Guía de criterios de selección para la comercialización de Guadua angustifolia Kunth*
- GTC 303 - *Guía para la elaboración de tableros de esterilla de Guadua angustifolia Kunth*
- GTC 307 - *Guía para la elaboración de artesanías de Guadua angustifolia Kunth y otros bambúes*

2.2.4.4. Ecuador

Al igual que sucedió en Colombia con el sismo de 1999, fue a raíz del Terremoto de Ecuador de 2016¹⁰ cuando el Gobierno de Ecuador desarrolló un capítulo de *Seguridad Estructural – Estructuras de Guadúa (GaK)* y lo incorporó a la *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, que había sido publicada en 2014 en sustitución del, hasta ese momento vigente, *Código Ecuatoriano de la Construcción* (Witte, 2019).

- ***Norma Ecuatoriana de la Construcción (Seguridad Estructural – Estructuras de Guadúa (GaK))***

El capítulo se centra en la seguridad estructural, por lo que tiene como finalidad establecer los principios básicos para el diseño sismorresistente de las estructuras, considerando que Ecuador registra un alto riesgo de vulnerabilidad sísmica. Dentro de ese eje, plantea un conjunto de directrices y alineamientos para diseño, ejecución, control y mantenimiento de las edificaciones con miras a garantizar la calidad del entorno construido en beneficio de los usuarios (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016).

Para este propósito, el capítulo aborda el procesamiento, la selección, la construcción y el mantenimiento, aunque, a diferencia de las normas colombianas sobre uniones y conservación (NTC 5407), la norma ecuatoriana describe el proceso, pero no incluye cálculos de diseño (Gatóo, *et al.*, 2014).

- ***GPE INEN 42 (1976): Bambú caña guadua***

La *Guía Práctica Ecuatoriana del Instituto Ecuatoriano de Normalización N°42 Bambú caña Guadua – Recomendaciones para el uso en la construcción* (GPE INEN 42) fue publicada para dar a conocer a la población técnicas sencillas que garantizaran la construcción de viviendas con bambú que ofreciesen mayor seguridad y resistencia contra los agentes climatológicos y de la naturaleza, aprovechando así las excelentes propiedades de resistencia mecánica y contra los insectos y la putrefacción que posee el bambú (y en concreto la *Guadua angustifolia Kunth*) de Ecuador, Colombia y Perú (Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1976).

Si bien el *GPE INEN 42* promueve los beneficios y aspectos prácticos del bambú como material de construcción en Ecuador, al igual que sucediera con la *Norma Ecuatoriana de la Construcción*, tampoco incluye una guía de diseño (Amede, *et al.*, 2021).

¹⁰ El terremoto de Ecuador de 2016 fue un movimiento sísmico ocurrido a las 16:58 (hora local) del sábado 16 de abril de 2016, con epicentro entre las parroquias Pedernales y Cojimíes del cantón Pedernales, en la provincia ecuatoriana de Manabí. Con una magnitud de 7.8 en la escala sismológica de magnitud del momento, constituye el sismo más fuerte sentido en Ecuador desde 1979 y el más destructivo desde 1987 (Instituto Geofísico - EPN, 2016).

2.2.4.5. India

India desarrolló y publicó en el año 1970 el *Código Nacional de Construcción de la India*, cuyo objetivo era proporcionar pautas que regulasen las actividades de construcción de edificios en todo el país. El código se revisó por primera vez en 1983, emitiéndose, posteriormente, tres enmiendas importantes (dos en 1987 y la tercera en 1997). La segunda revisión tuvo lugar en 2005 (emitiéndose dos modificaciones en 2015). Con la intención de actualizar y mejorar el código para adaptarlo a los cambios y avances surgidos en la sociedad y en el sector de la Construcción, bajo el auspicio de la Comisión Seccional del Código Nacional de Edificación, se asumió un proyecto de revisión integral del código en el que participaron alrededor de 1000 expertos. Como culminación del proyecto, la versión revisada se presentó como *Código Nacional de Construcción de la India 2016*, reflejando en su contenido prácticas internacionales aplicables contemporáneas y de vanguardia (Bureau of Indian Standards, 2016).

Este código se complementa con dos Normas Indias, que detallan el diseño estructural con bambú y los diferentes métodos de ensayo aplicables para evaluar las características físicas y mecánicas de los culmos de bambú.

- ***National Building Code of India 2016***
(Part 6 - Structural design. Section 3 - Timber and Bamboo: 3B Bamboo)

Título: *Código Nacional de Construcción de la India 2016*

(Parte 6 – Diseño estructural. Sección 3 – Madera y bambú: 3B Bambú)

Sustituye a: *National Building Code of India 2005*

El *Código Nacional de Construcción de la India 2016* es un código de construcción integral que proporciona pautas para regular las actividades de construcción de edificios en el país. La *Sección 3B Bambú* del código abarca el uso del bambú con fines constructivos en estructuras o elementos de la estructura, asegurando la calidad y eficacia del diseño y la construcción utilizando bambú. Abarca los datos de resistencia mínima, los requisitos dimensionales y de clasificación, el curado, el tratamiento de conservación, el diseño y las técnicas de unión con bambú que facilitarían la aplicación científica y el rendimiento a largo plazo de las estructuras. También cubre pautas para garantizar la adquisición, el almacenamiento, las precauciones y las limitaciones de diseño adecuadas para el bambú (Bureau of Indian Standards, 2016).

Cabe destacar que la *Sección 3B Bambú* establece límites de resistencia para tres clases de bambú, que representan especies que se encuentran comúnmente en la India. No obstante, si bien se proporcionan algunos ejemplos de uniones y conexiones de bambú, no se abordan los detalles con dimensiones y capacidades (Sharma, 2010).

- ***Indian Standard 15912 (2012): Structural design using bamboo – Code of practice***

Título: *Norma India 15912 (2012): Diseño estructural utilizando bambú – Código de práctica*

Esta norma proporciona los requisitos mínimos para el diseño de edificios con bambú estructural en términos de resistencia mecánica y durabilidad estructural, considerando como elemento resistente tanto las cañas de bambú como elementos derivados de ellas. También incluye datos sobre resistencia mínima, estabilidad dimensional, especificaciones de clasificación y uniones tradicionales de bambú para garantizar la calidad, así como indicaciones sobre el trabajo *in situ*, la elaboración de piezas y su instalación. Esta norma clasifica las especies de bambú ensayadas

y recomendadas en tres grupos según su resistencia, clasificándolas a su vez para diferentes aplicaciones estructurales según su rigidez y sus características físicas. Por último, esta norma aconseja (con base en pruebas incluidas en el documento) secar las cañas maduras hasta que alcancen un contenido de humedad de alrededor del 20% antes de utilizarlas, ya que es cuando alcanzan su mayor resistencia (Amede, *et al.*, 2021).

- **Indian Standard 6874 (2008): Method of tests for bamboo**

Título: Norma India 6874 (2008): Métodos de ensayo del bambú

Esta norma permite determinar las propiedades físicas y mecánicas del culmo completo de bambú. Los procedimientos recogidos en ella son muy similares a los indicados en la *ISO 22157-1 (2004)*, pero no se incluyen ensayos de determinación de resistencia perpendicular a las fibras. Además, el diseño de las probetas del ensayo de resistencia a tracción paralela a las fibras se asemeja más al de la *ISO 22157 (2019)*, aunque difiere en las dimensiones de las muestras.

2.2.4.6. Perú

En Perú, la entidad responsable de la elaboración de las *Normas Técnicas de Edificación* del *Reglamento Nacional de Edificaciones* (RNE) y la evaluación para la aprobación de los Sistemas Constructivos No Convencionales es el Departamento de Normalización. Las normas se elaboran a través de Comités Técnicos conformados por representantes de diversas instituciones, entre ellas, universidades, institutos de investigación, consultores reconocidos, etc. El Comité Técnico es el encargado de elaborar los proyectos de propuestas de las normas del RNE que, tras ser sometidas a discusión pública, son aprobadas por el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020).

- **Reglamento Nacional de Edificaciones
(Norma Técnica E. 100 Bambú)**

Como ya se ha comentado, fue a raíz del terremoto de Perú de 2007¹¹ cuando se impulsaron las investigaciones sobre las propiedades de ingeniería y los valores del bambú como material de construcción para viviendas, lo que terminó dando lugar a la elaboración de la *Norma Técnica E.100 Bambú* en el año 2012 (Amede, *et al.*, 2021). Esta norma se aprobó mediante el *Decreto Supremo Nro. 011-2012-VIVIENDA, del 03 de marzo de 2012* y su objetivo es establecer los lineamientos técnicos que se deben seguir en Perú para el diseño y construcción de edificaciones sismorresistentes con bambú *Guadua angustifolia* y otras especies de características físico mecánicas similares (Instituto de la Construcción y Gerencia, 2012).

En la norma se hace referencia a códigos y normas de otros países, entre ellos, el *Reglamento Colombiano NSR-10*, la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* y las normas *ISO* para la construcción con bambú (todos ellos anteriormente explicados en este apartado de la Tesis

¹¹ El Terremoto de Pisco de 2007 fue un sismo registrado el 15 de agosto de 2007 a las 18:40 (hora local) con una duración de 3 minutos y 50 segundos. Su epicentro se localizó en las costas del centro de Perú, a 40 km al oeste de Pisco y a 150 km al suroeste de Lima. Tuvo una magnitud de 8.0 en la escala sismológica de magnitud de momento, dejando 600 muertos, 1300 heridos y 48000 viviendas totalmente destruidas (Tavera, 2020).

Doctoral). De hecho, se incluyen versiones modificadas de los cálculos de diseño estructural del *NSR-10* (aunque con menos detalles que en el documento original) y de diseño de construcción de la *Norma Ecuatoriana de la Construcción* (Gatío, *et al.*, 2014).

2.2.4.7. Estados Unidos de América

Estados Unidos aún no cuenta con una normativa que regule el uso de los culmos de bambú en edificación, pero sí que dispone de una norma de la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) que permite el uso de bambú en la elaboración de productos de madera compuesta (composites) con aplicación estructural.

- ***ASTM D5456 (2013): Standard specification for evaluation of structural composite lumber products***

Título: *ASTM D5456 (2013): Especificaciones normalizadas para la evaluación de productos de madera compuesta estructural*

Esta norma es la primera en reconocer la chapa laminada de bambú como un producto con carácter estructural y brinda orientación sobre las normas que han de seguirse en su fabricación y los métodos de ensayo (Gatío, *et al.*, 2014). El material se trata como un equivalente a los productos de madera compuesta estructural, como la madera de chapa laminada (LVL), la madera de hebra laminada (LSL), la madera de hebra paralela (PSL) o los tableros de fibra orientada (OSB) (ASTM, 2013).

2.2.4.8. INBAR

También INBAR ha desarrollado Normas Técnicas, de carácter no obligatorio, que sirven como guía en el uso y aplicación del bambú con carácter estructural en el ámbito de la edificación. A continuación, se presentan las dos más significativas.

- ***Norma Técnica para la utilización de la Guadua angustifolia Kunth en la Construcción: Guadua angustifolia Kunth como material constructivo y sus procedimientos generales en la construcción para ser aplicados en edificaciones GaK***

Esta Norma Técnica recoge una serie de normas que sirven como guía en la aplicación de la *Guadua angustifolia Kunth* como material resistente de construcción. El documento divide las normas en tres grupos: *Normas M*, para considerar a la GaK como material de construcción; *Normas C*, referidas a los procedimientos generales de procesos de construcción a ser aplicados en una edificación con GaK y *Normas E*, acerca de los aspectos estructurales que se deben considerar en el uso de la GaK como material estructural sometido a esfuerzos (INBAR, 2011).

El documento incluye indicaciones en relación a los procesos de selección del material, transporte, almacenamiento, preservado y secado. También especifica las condiciones que deben cumplir los culmos, así como los métodos que deben emplearse en la elaboración de uniones, cortes, paneles, vigas y estructuras.

- **Norma Andina para diseño y construcción de casas de uno y dos pisos en bahareque encementado**

El bahareque encementado es un sistema estructural de muros que se basa en la fabricación de paredes construidas con un esqueleto de *Guadua* y madera, cubierto con un revoque de mortero de cemento, que puede apoyarse en esterilla o *Guadua*, malla de alambre o una combinación de ambos materiales (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, s.f.).

Esta norma tiene como objetivo indicar los requisitos mínimos que se requieren para el diseño y construcción sismorresistente de viviendas fabricadas con muros de bahareque encementado en los países del área Andina (Colombia, Ecuador y Perú). El documento es aplicable al diseño estructural de viviendas de uno o dos pisos de altura y de uso exclusivamente residencial, otorgándoles una resistencia tal que minimice la posibilidad de que la construcción colapse durante eventos sísmicos fuertes, que sufra daños estructurales mínimos durante eventos sísmicos moderados y que no sufra daños estructurales durante eventos sísmicos leves, e igualmente para eventos eólicos (INBAR, 2015).

2.2.4.9. Análisis y conclusiones sobre la normalización del bambú

Para implementar el bambú natural y mecanizado como material de construcción y, en concreto, como elemento estructural, es necesario desarrollar normas, reglamentos y códigos que regulen su utilización en el sector de la Construcción.

Esta ausencia de normativa se hace aún más notable en Europa y Estados Unidos, donde, si bien es cierto que el bambú se está dando a conocer poco a poco, aún queda un largo camino por recorrer hasta conseguir que sea aceptado y regularizado como material de construcción.

A nivel internacional, ya se ha dado el primer paso, pero es evidente que aún hay mucho trabajo por hacer, pues, actualmente, las únicas normas de carácter internacional relacionadas con el bambú (ISO) aportan indicaciones sobre el diseño y los métodos de ensayo cuando se usan culmos de bambú, pero no toman en consideración otros productos derivados de este material, ni aportan la información suficiente para diseñar y construir cualquier estructura (Harries, *et al.*, 2012). Como consecuencia, las propiedades, uniones y conexiones del bambú se estudian caso por caso, en lugar de emplear un diseño universal (Finch, 2005). Para superar la variabilidad geométrica y material del bambú, se hace cada vez más necesario el desarrollo de productos mecanizados que puedan incorporarse fácilmente a la práctica, así como de normas que regulen su aplicación.

Los países donde el bambú es un recurso local (como China, Colombia, Ecuador, India y Perú) ya cuentan con normas que no sólo regulan su aplicación en la edificación, sino que gestionan todos los aspectos relacionados con su explotación, garantizando la calidad del material desde el momento de su cultivo (INBAR, 2018). Cabe destacar que estas regulaciones surgieron, en un principio, como secciones en los códigos y normas de construcción nacionales, incorporando métodos de ensayo para el bambú y exigencias relativas a la construcción y al diseño estructural con este material (Gatío, *et al.*, 2014).

En conclusión, la normalización internacional promovería el bambú estructural y de ingeniería como un producto estructural renovable en todo el mundo, creando una demanda de tecnologías mejoradas que, de otro modo, no tendrían éxito comercial. Las normas brindan una forma de garantizar la calidad de los productos y cubre detalles específicos, como los métodos

de ensayo, a los que se suele hacer referencia en los códigos de construcción (Blayse & Manley, 2004). Los códigos y normas estructurales cierran la brecha de transferencia de tecnología entre la investigación y la práctica y son un respaldo legal para garantizar la seguridad pública. Por lo tanto, la necesidad del desarrollo de un código estructural para la construcción con bambú, apoyado en un cuerpo de normas previo, es necesario para promover el material en la construcción (Ellingwood, 1994). Para ser aceptado tanto por los expertos en construcción como por los políticos como material de ingeniería, se necesita la normalización para desarrollar el uso generalizado del bambú. Sin una mayor regulación del material, no se logrará el creciente interés y la motivación para crear una infraestructura más sostenible a partir del bambú (Janssen, 2000).

2.3. EL BAMBÚ EN ESPAÑA

El bambú sigue siendo un gran desconocido en España, donde apenas se ofrecen algunos cursos, charlas y talleres teórico-prácticos. No obstante, progresivamente se está convirtiendo en un material formidable para todo tipo de proyectos relacionados con el sector de la construcción gracias a la intervención de técnicos como Jaime Espinosa Benito, Isaac González, Juana Canet Rosselló, José Eduardo Torres Rojas y Eugenia Muscio, entre otros (Baladrón Laborda, 2018).

2.3.1. CULTIVOS DE BAMBÚ EN ESPAÑA

En España hay un gran número de hectáreas de terreno sin utilizar, lo que supone un gran atractivo para la puesta en marcha de plantaciones de bambú a gran escala. Esto permitiría, a largo plazo, desarrollar una producción europea de bambú y una industria para su posterior procesamiento (Volterra, 2020).

En Vilarmaior (A Coruña, España) existe una parcela de 8 hectáreas, de las cuales 5.5 se dedican al cultivo de más de 16 variedades de bambú, casi todas ellas dedicadas a la producción de biomasa. Esta plantación fue creada hace más de 30 años por el belga Jan Oprins, quien se la alquiló hace 4 años a José Baña (Figura 124), ingeniero agrónomo y gerente de la explotación de la finca, de la que se extraen entre 150.000 y 700.000 plantas de bambú cada año, el 90% con destino a Francia, Bélgica y Holanda (Cuba, 2020).



Figura 124. José Baña con una planta de bambú.
Fuente: José Pardo.

En Montesa (Valencia, España), la compañía Bosque de Bambú Group Europe, de Miguel Ángel Fuentes y Gema Albarracín, desarrolló una extensión de 20 hectáreas de bambú destinados a la producción de biomasa para la generación energética o para la producción de *pellets* (Gozzer, 2012).

También en Valencia, en el municipio de Sollana, se puso en marcha una plantación experimental de bambú para su uso como biomasa energética y para la producción de combustible de hidrógeno. Se trata de una plantación de cerca de 800 plantas de una especie de bambú desarrollada en un laboratorio español y analizada por el *Energy & Bioproducts Research Institute* (Instituto de Investigación de Energía y Bioproductos) de Reino Unido (BosqueDeBambú, 2018).

Aprovechando el tirón de la puesta en marcha de dicha plantación, Miguel Ángel Fuentes, aficionado a crear instrumentos musicales a partir de bambú, decidió crear un bosque de bambú en Sollana (Valencia). Para ello, en el año 2020, adquirió y plantó 50 ejemplares de 9 especies diferentes de bambú en unos terrenos junto al parque natural de l'Albufera (Vives, 2020).

Hace unos años, el equipo de Volterra, una empresa española con sede en Barcelona, comenzó un proyecto en colaboración con BambooLogic, una empresa de los Países Bajos cuyo objetivo es realizar plantaciones de bambú en los países del sur de Europa. A finales de febrero de 2020, plantaron las primeras áreas de experimentación en Montado Freixo do Meio, una granja agroecológica en Montemor-o-Novo (un municipio de Portugal). Se eligieron ocho especies diferentes para probar qué variedades son más adecuadas para el clima de la Península Ibérica. En este caso, el bambú es utilizado principalmente como barrera contra el viento y como fuente

de biomasa para crear una cubierta orgánica en el suelo, funciones que van a ser de gran ayuda en el proyecto de restauración que se está llevando a cabo en la zona. Si este ensayo tiene éxito, las plantaciones se expandirán hasta cubrir, aproximadamente, 100 hectáreas (Volterra, 2020).

Volterra, implicada en proyectos de restauración de ecosistemas, pretende plantar bambú en, al menos, otras 5 ubicaciones de la Península Ibérica, para ganar experiencia con esta planta tan prometedora y ofrecer así un cultivo que beneficie económicamente al propietario (Volterra, 2020). Por ello, como demuestra la **Figura 125**, en 2020 plantaron 4 hectáreas de bambú en Ceclavín, un municipio de la provincia de Cáceres (España), eligiendo siete variedades: *Bambusa oldhamii*, *Dendrocalamus asper*, *Phyllostachys atrovaginata*, *Phyllostachys nigra Bory*, *Phyllostachys nigra Nigra*, *Phyllostachys pubescens*, *Pseudosasa japónica*. Las distintas especies fueron plantadas por zonas, facilitando el control y la monitorización del desarrollo de cada una. Además, ya tienen en mente poner en marcha un proyecto de cultivo en Toledo y otro en Almería.



Figura 125. Plantación de Volterra en Ceclavín (Cáceres, España).
Fuente: Volterra.

En Andalucía, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE) de la Universidad de Granada, a través del Grupo de Investigación “Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación (TEP 232)”, en adelante IDIE, puso en funcionamiento en noviembre de 2017 un cultivo experimental en la finca “La Nacla” (Motril, Granada), en la que se sembraron dos especies de bambú: *Bambusa vulgaris Vittata* y *Bambusa vulgaris Vulgaris* (**Figura 126**). Ambas variedades fueron obtenidas en la propia localidad, donde se emplean con fines decorativos.

Posteriormente, gracias a la colaboración con el Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía (IFAPA) y con las empresas Volterra y La Huerta Xpaña S.L., IDIE comenzó el cultivo de seis nuevas especies de bambú (*Bambusa oldhamii*, *Dendrocalamus asper*, *Phyllostachys atrovaginata*, *Phyllostachys nigra Nigra*, *Phyllostachys pubescens* y *Pseudosasa japónica*) en tres ubicaciones distintas: una finca a nivel del mar en la localidad de Motril (Granada, España), una zona situada junto a una chopera en los terrenos del IFAPA y los jardines de la ETSIE. Además, las especies se incorporaron también al cultivo de la finca “La Nacla”.



Figura 126. Planta de *Bambusa vulgaris Vulgaris* en la finca “La Nacla”. Octubre de 2018.

IDIE monitoriza las plantas con el objetivo de estudiar el crecimiento y desarrollo de cada una de las especies de bambú en Granada. Asimismo, realiza ensayos de laboratorio para determinar las características físico-mecánicas de estas y otras especies. El objetivo último de la investigación es contribuir al conocimiento de las propiedades del bambú, colaborando en que sea reconocido como material en España y normalizado para su empleo en la construcción.

Por último, hay que mencionar que en Murcia y en Cádiz existen grupos de agricultores que, en conjunto, disponen de hasta 30 especies diferentes de bambú. Se definen a sí mismos como “amantes del bambú” y dejan claro que no lo cultivan con fines comerciales, sino como afición y con la intención de crear una comunidad en torno al bambú, dándolo a conocer en España.

2.3.2. CONSTRUCCIONES CON BAMBÚ EN ESPAÑA

En España podemos encontrar ejemplos del uso de bambú en acabados, como es el caso de las viviendas sociales de Carabanchel, en el que es usado como cerramiento de celosía exterior, o la Terminal T4 del Aeropuerto de Barajas, donde se usa como techado (Pérez, 2014).

Por otra parte, también ha comenzado a utilizarse con carácter estructural, como demuestra la ya mencionada vivienda ecológica construida por la empresa Econhouse en las afueras de Madrid (España).

2.3.2.1. Viviendas de protección oficial de Alejandro Zaera en Carabanchel

En las viviendas de protección oficial de Carabanchel (distrito situado en el sudoeste de Madrid), diseñadas y construidas en el año 2007 por el arquitecto Alejandro Zaera, se amplía el espacio habitable con un espacio intermedio protegido de la radiación solar con persianas de bambú *Guadua angustifolia* sobre marcos plegables (**Figura 127**). El sentido práctico de la protección permite la adaptación a diferentes orientaciones del sol y vistas abiertas a los jardines circundantes, lo que dota al espacio de gran calidez de la atmósfera como resultado del filtro de bambú. También permite la ventilación incluso cuando está cerrada, permitiendo no sólo el enfriamiento del espacio intermedio, sino también el enfriamiento del elemento de protección, que reduce la radiación al espacio intermedio (Soler Soler, 2017).



Figura 127. Viviendas de protección oficial en Carabanchel (Madrid) del arquitecto Alejandro Zaera.
Fuente: Foreign Office Architects.

El solar es un paralelogramo de 100 metros x 45 metros orientado de norte a sur. La propuesta fue compactar el volumen dentro de la altura dada para que cada unidad tenga doble orientación Este-Oeste. Para ello, las unidades se convierten en una especie de "tubos" de 13.40 metros de longitud que conectan ambas fachadas. Por lo tanto, las unidades residenciales se abren a dos jardines diferentes en cada orientación y están totalmente acristaladas en las fachadas. Cada lado del edificio cuenta con una terraza de 1.5 metros de ancho a lo largo de toda la fachada que posibilitará un uso semi-exterior durante determinadas temporadas. Estas terrazas están cerradas con persianas de bambú montadas en marcos plegables que aportan la protección necesaria contra la fuerte exposición al sol Este-Oeste, brindan seguridad a las viviendas y se abren completamente a los jardines laterales (ArchDaily, 2008).



Figura 128. Pabellón de Madrid en la Exposición Universal de Shanghái 2010.
Fuente: Plataforma Arquitectura.

Empleando como modelo estas viviendas, Alejandro Zaera realizó la ya mencionada Casa de Bambú, uno de los dos edificios que compusieron el Pabellón de Madrid en la Exposición Universal de Shanghái 2010 (**Figura 128**). En aquella ocasión, en apoyo a la construcción con bambú, el arquitecto español comentó: *“Es necesaria la intervención de los gobiernos, para que obliguen a los constructores a que la eficiencia energética y la sostenibilidad no sean extras, sino que estén recogidas en los estándares de construcción”* (Aldama, 2019).

2.3.2.2. Terminal 4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas

En cuanto a la Terminal 4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas (**Figura 129**), para la construcción de su techo se emplearon 2.000.000 de metros cuadrados de bambú ignífugo, convirtiéndose en uno de los más importantes proyectos a nivel mundial que incorpora este material ecológico como una solución 100% natural y sostenible (BIERZO 98 S.L., s.f.).

El proyecto fue encargado al arquitecto británico Richard Rogers en colaboración con el madrileño Estudio Lamela, representado por el arquitecto Antonio Lamela (Impenor Asbitra Asociados S.L., s.f.). La obra fue realizada como parte de la ampliación del aeropuerto de Madrid, que entró en funcionamiento el 5 de febrero de 2006, convirtiéndolo en uno de los más grandes del mundo al contar con 1.000.000 de metros cuadrados de superficie (Jiménez, s.f.).

En el diseño, los autores priorizaron los conceptos de operatividad, sencillez, economía, funcionalidad y, muy especialmente, el confort de los viajeros. La T4 está formada por dos edificios, el principal y su satélite, contando el edificio principal con una longitud total de 1.2 kilómetros, cubiertos por un techo ondulado de bambú que crea el ambiente de aspecto cálido perfecto para los pasajeros que recorren su interior (Impenor Asbitra Asociados S.L., s.f.).

Los arquitectos habían decidido desde el principio utilizar bambú para el revestimiento del techo, que debía cumplir con la norma europea de seguridad contra incendios más alta, M1. Además, contaba con un diseño de olas curvas, lo que suponía grandes exigencias técnicas para el material. Para satisfacer dichas necesidades, se desarrolló un nuevo producto: la chapa de bambú combinada con fibra de vidrio. Dado que, hasta ese momento, sólo se podían impregnar tiras finas de chapa de bambú para garantizar la seguridad contra incendios y ofrecer la flexibilidad necesaria para realizar las formas curvas, fue necesario realizar cambios en el procesamiento de las tiras de bambú y desarrollar una estructura de varias capas de chapa en capa cruzada para satisfacer las necesidades de estabilidad. Estos cambios requirieron dos años de trabajo de desarrollo en estrecha colaboración con el proveedor de bambú, los arquitectos y el especialista en instalaciones Lindner (MOSO, s.f.).



Figura 129. Techo de bambú de la T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.
Fuente: MOSO.



Figura 130. "Bosque" de bambú simulado por el techo la T4 del aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas.
Fuente: Estudio Lamela & Rogers Stirk Harbour.

Finalmente, el techo se realizó con lamas de 100 mm de ancho de chapa de bambú multicapa, lo que, además de ser muy sostenible, le confiere a la T4 un carácter especial. El bambú es el elemento óptico dominante de la terminal. La impresionante construcción del techo recuerda a un dosel de hojas de un bosque y se apoya en «troncos de árboles» de acero de varios colores (**Figura 130**). El bambú, con su carisma de belleza natural, es tradicionalmente sinónimo de paz, tranquilidad y equilibrio interior, y su objetivo es crear una experiencia de viaje positiva en un ambiente relajado (MOSO, s.f.).

2.3.2.3. Vivienda ecológica de Econhouse en las afueras de Madrid

En cuanto a su uso con carácter estructural en España, como ya se mencionó anteriormente, el único edificio en el que se ha aplicado es en la vivienda ecológica construida a primeros de 2021 en las afueras de Madrid por la empresa de bioconstrucción Econhouse (**Figura 131**).



Figura 131. Vivienda ecológica construida por Econhouse en las afueras de Madrid (España).
Fuente: Bambusa Estudio.

La estructura del edificio y sus paredes están hechas con paneles de paja comprimida. Las cañas de bambú, abiertas longitudinalmente para asegurar la perfecta adherencia con el mortero, se emplearon en el armado de la solera de hormigón bastardo de cal y cemento. Este ejemplo demuestra que el bambú es una óptima alternativa ecológica en sustitución del clásico armado con varillas de acero, especialmente al utilizar morteros con cal en los encofrados, en donde se observa un comportamiento excelente sin problemas de corrosión (y con materiales naturales), cumpliendo plenamente con la filosofía de la empresa (Bambusa.es, 2021).

2.3.3. EVENTOS SOBRE EL BAMBÚ EN ESPAÑA

Desde la Universidad de Granada, la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE), junto a la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación, la Facultad de Ciencias y la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos, participaron en el año 2019 en el proyecto Quiero Ser Ingeniera, un proyecto del Instituto de la Mujer y para la Igualdad de Oportunidades con el que se pretende romper con los estereotipos, dar una visión más equitativa y justa socialmente del talento femenino y sus oportunidades de participación en las profesiones del futuro y, fundamentalmente, fomentar y alentar vocaciones en Ingeniería en las chicas preuniversitarias (Quiero ser Ingeniera, 2019).

En concreto, la ETSIE desarrolló el taller “La madera como material de construcción”, donde las alumnas de Educación Secundaria Obligatoria (ESO) pudieron conocer los diferentes materiales naturales que se están estudiando en la ETSIE, entre ellos, el bambú. Tras una conferencia introductoria sobre este material, se les mostraron a las estudiantes los diferentes tipos de uniones que pueden emplearse en las construcciones con bambú, suministrándoles los materiales necesarios para que pusieran en práctica las uniones que acababan de aprender, como puede apreciarse en la **Figura 132**.



Figura 132. Taller de aprendizaje de uniones de bambú

En la última fase del proyecto, que duró una semana, las estudiantes participaron en el diseño y construcción de un modelo experimental fabricado con bambú, que sería ubicado en los jardines de la ETSIE y que debía incluir una pequeña cimentación y una de las uniones que habían aprendido en la fase anterior. La estructura principal estaría compuesta por cañas de *Guadua angustifolia Kunth* y las paredes se fabricarían con latillas de la misma especie, sujetas a la estructura con puntillas y tornillos. Para el suelo se emplearía un tablero de chopo al que se le añadirían latillas de bambú para obtener un acabado homogéneo.

Las estudiantes comenzaron realizando el replanteo y ubicando los enanos que servirían como soporte de la estructura. Luego, mediante sierras de calar y sierras manuales, cortaron las cañas y le realizaron en los extremos un rebaje simple (denominado “pico de flauta”) o doble (“boca de pescado”) que permitían que las cañas encajasen unas en otras. Este paso incluía la complejidad de decidir dónde ubicar cada caña y calcular qué longitud final debían tener para poder componer la estructura exitosamente. Para garantizar la perfección de las uniones, las estudiantes emplearon lijas y escofinas en los rebajes, evitando de paso que quedasen astillas en ellos. Cuando las cañas estuvieron listas, se procedió a montar la estructura, empleando la técnica de unión que habían practicado en la fase anterior, por lo que utilizaron varillas roscadas y pernos para ello. La **Figura 133** muestra esta parte del proceso de construcción del modelo.



Figura 133. Elaboración y montaje de la estructura del modelo experimental

El siguiente paso fue componer las paredes. Para ello, tuvieron que medir la longitud necesaria que debía tener cada latilla en función de la posición en la que ésta fuese a ser colocada. Hecho esto, procedían a cortar la latilla y lijar sus extremos. Mientras un grupo se encargaba de esta tarea, otro las iba fijando en la estructura mediante tornillos y clavos, ubicando un listón en el centro de cada pared como refuerzo. Paralelamente a este proceso, se realizó el diseño y composición del suelo, proceso que consistía en clavar latillas a un tablero de chopo. Las estudiantes optaron por dividir el tablero en 4 cuadrados iguales y hacer en cada uno un diseño diferente, aprovechando los restos de las latillas usadas en las paredes para componerlo, reduciendo así el desperdicio de materiales. En la **Figura 134** se observa el progreso.



Figura 134. Fabricación de las paredes y del suelo del modelo experimental

Una vez listos todos los elementos, se fijó el suelo a la estructura, finalizando así el modelo experimental, como se aprecia en la **Figura 135**. Durante toda la experiencia, las estudiantes realizaron un auténtico y muy destacable trabajo en equipo. Actuaron coordinadamente, intercambiando información constantemente, rotando entre las distintas tareas disponibles y ayudándose las unas a las otras. El desarrollo de este proyecto permitió que, de una forma interesante y entretenida, conocieran el entorno universitario y el ámbito de la ingeniería, así como el bambú y su amplio abanico de posibilidades.



Figura 135. Montaje y finalización del modelo experimental

En el mismo año 2019, mediante su participación en diversos eventos en Europa, INBAR apoyó la inclusión del bambú y el ratán en las políticas de desarrollo social, económico y ambiental en los planos regional, nacional e internacional.

En España, entre los días 1 y 4 de octubre de 2019, en el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja de Madrid, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas del Gobierno de España, tuvo lugar el Primer Simposio Ibérico sobre Bambú y Taller de Bioconstrucción (**Figura 136**). La conferencia fue coorganizada por INBAR y Bambusa Estudio, empresa española especializada en el diseño con bambú, y participaron en ella representantes de varias instituciones europeas. En nombre del Ministerio de Agricultura de España, Dña. Silvia Capdevila dijo que el bambú "ofrece grandes posibilidades" a España, como material con bajas emisiones de carbono y como herramienta para combatir el cambio climático. Representantes de ONU-Hábitat, la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID), y la organización no gubernamental Comercio Para el Desarrollo (COPADE), debatieron sobre el importante papel del bambú como material de construcción, fuente de energía renovable y alternativa al plástico de un solo uso. Luego del simposio se realizó un taller que introdujo los fundamentos de la construcción con bambú (INBAR, 2020b).



Figura 136. Qin Daochun, Director de Ciencia y Tecnología del Centro Internacional para el Bambú y el Ratán (ICBR), realizando su intervención durante el Primer Simposio Ibérico del Bambú.
Fuente: Bambusa Estudio.

A raíz de la celebración del simposio, Jaime Baladrón Laborda, arquitecto especialista en construcción con bambú y sostenibilidad, en colaboración con Isaac González, diseñador y constructor de estructuras en bambú, comenzó la puesta en marcha de un Grupo Operativo (GO) que ayude a desarrollar específicamente el incipiente sector del bambú en España.

Los principales objetivos del grupo operativo son:

- Redactar una metodología de evaluación para poder certificar la gestión agroforestal sostenible de las diferentes especies.
- Redactar una propuesta Normativa y de cálculo estructural/fuego para que el bambú se pueda usar en España.
- Realizar ensayos y test de laboratorio para asignar valores de resistencia nominal para las especies de bambú más utilizadas en construcción: tracción, compresión, flexión, resistencia al fuego, etc. siendo estos valores incluidos en la Normativa propuesta.
- Desarrollo de un catálogo técnico de soluciones constructivas en bambú industrializado.
- Impartición de cursos de formación y talleres prácticos y de capacitación profesional para que los técnicos prescriptores e instaladores sepan utilizar el bambú.
- Divulgación general del uso/aplicaciones del bambú como material, organizando congresos, charlas, seminarios, concursos, etc.
- Investigación sobre la adaptación de las principales especies de bambú (*Guadua angustifolia*, *Phyllostachys edulis*, etc.) a los climas de España y desarrollo de una o varias plantaciones prototipo de pequeño tamaño.
- Mapear/inventariar las plantaciones y bambusales existentes actualmente en España.

El grupo operativo pretende obtener, mediante la consecución de los objetivos indicados anteriormente, la ayuda del Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural (FEADER), de modo que se convierta en un referente europeo en relación al bambú. Para ello, el GO cuenta con el apoyo de los siguientes agentes:

- Asociación Ibérica del Bambú (AsIB).
- Consejo Superior de Investigación Científica (CSIC).
- Fundación de Comercio Para el Desarrollo (COPADE) y su derivada, Madera Justa.
- Certificaciones *Forest Stewardship Council* (FSC®) y *Programme for the Endorsement of Forest Certification* (PEFC™).
- Universidad de Granada, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad de Navarra.
- Bambusa Estudio, empresa de venta de bambú, especializada en diseño de estructuras y decoración con bambú.
- *Egoïn Wood Group*, empresa especializada en el diseño de soluciones estructurales de madera para el sector de la construcción.



Figura 137. Jefes de Estado o de Gobierno y representantes de los principales organismos internacionales en la ceremonia de apertura de la COP25 celebrada en 2019 en Madrid (España).
Fuente: El País.

También en 2019, INBAR promovió el bambú y el ratán en la 25ª Conferencia de las Partes (COP25) de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que se realizó en Madrid (España) entre los días 2 y 13 de diciembre (**Figura 137**). En ella, INBAR copatrocinó una serie de eventos que tuvieron gran acogida, en los que se debatió la bioeconomía del bambú y su papel como instrumento de la cooperación Sur-Sur y como recurso para mitigar el cambio climático. Además, se realizó un evento paralelo llamado "El bambú como sustituto del plástico". En éste, oradores de la Organización Internacional de las Maderas Tropicales

(OIMT), la Oficina de las Naciones Unidas para la Cooperación Sur-Sur, la CMNUCC y varios gobiernos de Estados miembros debatieron sobre la importancia del bambú como un producto con bajas emisiones de CO₂ que puede reemplazar al plástico y otros materiales (INBAR, 2020b).

En 2020, debido a la situación ocasionada por el COVID-19, se cancelaron los eventos previstos, siendo sustituidos por versiones online de los mismos. Entre ellos destaca la serie de *webinars* organizados por INBAR entre el 17 de abril y el 5 de junio en el marco del Proyecto Bambuzonía, financiado por el Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola (FIDA), y del Proyecto Escuela Taller de Manabí, financiado por la Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID). Los títulos de los distintos webinaros desarrollados son:

- Bambúes americanos y claves para un adecuado manejo del bambú
- El acero vegetal. El bambú como mecanismo resiliente y desarrollo de la sustentabilidad
- Experiencias y lecciones aprendidas en proyectos con bambú
- Mujeres emprendedoras con bambú
- Bambú para la alimentación humana
- Equipando ciudades con bambú
- *Green development with bamboo in Europe*
- El bambú para la bioenergía

No obstante, a pesar de la difícil situación que se vivió en 2020, representantes de España fueron invitados a Beijing, donde se reunieron con el Sr. Mchumo (Director General de INBAR) para debatir cómo el bambú y el ratán pueden contribuir a un desarrollo más sostenible del país (INBAR, 2021c). INBAR ofreció a España la oportunidad de colaborar e involucrarse en el trabajo que desarrollan, afianzando la relación existente, con la intención de que, en un futuro, España pase a formar parte de los países miembros de INBAR.

En 2021, INBAR optó por continuar realizando actividades *online*, por lo que el 9 de marzo tuvo lugar un *webinar* titulado "*Bamboo policy: a roadmap for bamboo development*", cuyo objetivo era desarrollar el potencial impulso que una política de bambú podría aportar a un sector que está subdesarrollado. Para ello, se analizaron los principales obstáculos que frenan el desarrollo del sector del bambú, así como las oportunidades económicas, sociales, industriales y tecnológicas que podrían emanar de un desarrollo integral y la adopción de una política de bambú, tanto para los países productores de bambú como para todos los países implicados en su cadena de valor, en términos económicos, ambientales y sociales (INBAR, 2021a).



Figura 138. Cartel del webinar de INBAR del 9 de marzo de 2021

Fuente: INBAR

Entre los objetivos específicos de la conferencia se encontraban:

- Proporcionar a los responsables de la formulación de políticas un mecanismo que pueda gestionar de manera sostenible los recursos de bambú para obtener beneficios económicos, sociales y ambientales.

- Establecer un marco que pueda facilitar el desarrollo de las cadenas de valor del bambú, permitiendo la producción de material de plantación de calidad, aportando valor agregado al desarrollo de productos y creando así una industria sostenible del bambú, que pueda impulsar la comercialización de productos relacionados con este material.
- Fomentar una regulación del bambú que pueda habilitar las condiciones para las inversiones en empresas e industrias del bambú.
- Apoyar la creación de estructuras de coordinación nacionales y regionales que establezcan claramente una estrategia coherente de implementación de la política del bambú, con diferentes actores del gobierno nacional y de la sociedad civil involucrados en la creación de la normativa.

Como ponentes participaron: el Sr. Jules Doret Ndongo, Ministro de Silvicultura y Vida Silvestre de Camerún y presidente del Consejo de INBAR; el Sr. Xavier Lazo, Ministro de Agricultura y Ganadería de Ecuador y expresidente del Consejo de INBAR; el Sr. Suresh Prabhu, Sherpa de la India del G7/G20 y miembro del Parlamento de la India; y el profesor Lu Wenming, Director General Adjunto de INBAR. El webinar fue moderado por el Sr. T.P. Subramony, director de la Oficina Regional de INBAR del Sur de Asia y el Sr. Borja de la Peña, Oficial de Política Global de INBAR.

Siguiendo en la misma línea, el 20 de diciembre de 2021, INBAR organizó un seminario web titulado "El negocio europeo del bambú: un nuevo trato" (**Figura 139**). El tema principal fue el floreciente sector del bambú en Europa y cómo comercializar productos a base de bambú en la Unión Europea, como artículos ecológicos y sostenibles.

Durante el webinar se expuso que, en los últimos años, la Unión Europea ha desarrollado su propio sector del bambú, llegando a exportar 289 millones de dólares estadounidenses en productos de este material durante el año 2019. Partiendo de dicha premisa, se analizó el desarrollo del sector del bambú en la Unión Europea, en particular: las oportunidades y desafíos regulatorios, económicos, ambientales y sociales que este sector está experimentando (INBAR, 2021b).

También se abordaron las nuevas expectativas sobre el consumo y uso de productos de bambú en Europa, analizando su desarrollo empresarial en la Unión Europea y cómo aprovechar el potencial de los productos de bambú para apoyar la implementación del Pacto Verde de la Unión Europea, sus directivas y regulaciones (INBAR, 2021b).

El profesor Lu Wenming, Director General Adjunto de INBAR desde 2018, realizó el discurso de apertura. Como ponentes participaron: la Dra. Luisa Molari, Miembro del Consejo de la Asociación Italiana de Bambú; el Sr. Yves Crouzet, fundador y gerente de Bambuparque (en Portugal); la Sra. Eva Samalea, presidenta de la Asociación Ibérica del Bambú (AsIB) y fundadora de la empresa española MANA bamboo; la Sra. Chiara Maria Perazzi, Gerente de Comunicaciones Estratégicas de Forever Bambù (empresa italiana) y la Sra. Joanna Saavedra, cofundadora y desarrolladora comercial de bam•bu bicycles (en Portugal).



Figura 139. Cartel del webinar de INBAR del 20 de diciembre de 2021
Fuente: INBAR

2.3.4. ESPECIES DE BAMBÚ EN ESTUDIO EN ESPAÑA

Este apartado recoge información sobre los principales géneros y especies de bambú que se encuentran en estudio en España actualmente. Ha de señalarse que las especies descritas no son las únicas que se cultivan, pero sí que son aquellas sobre las que existe mayor información y conocimiento, motivo por el que se han escogido y analizado en esta Tesis Doctoral.

De igual modo, hay que indicar que sólo para tres de los cinco géneros de bambú analizados se ha incluido una tabla con los valores obtenidos por diversos autores para las principales propiedades físico-mecánicas de cada uno de ellos. Esto se debe a que esos géneros (*Guadua*, *Bambusa* y *Dendrocalamus*) son empleados en el ámbito constructivo, mientras que el resto (*Phyllostachys* y *Pseudosasa*), debido a sus características, se usan en edificación únicamente con carácter ornamental.

Entre la información aportada se incluye la procedencia de cada género y especie, su apariencia y características, sus condiciones de cultivo y crecimiento, los métodos por los que puede reproducirse, las ventajas que ofrecen y sus principales usos.

Por último, al final del presente apartado se incluye una tabla-resumen que compara las características de los distintos géneros y especies de bambú estudiados, lo que permite apreciar fácilmente las grandes diferencias que existen entre ellos, demostrando que el bambú, con sus más de 1600 especies catalogadas, es una planta realmente versátil.

2.3.4.1. *Guadua*

La *Guadua* es un género dentro del bambú, conformado por unas 30 especies y caracterizado por tener un tallo de color verde intenso, con nudos blancos y ramas con espinas en la parte baja del culmo (**Figura 140**). Sus hojas tienen forma de lanza y alcanza los 20-25 metros de altura, pudiendo llegar a los 30 m contando las ramas.

Aunque se encuentra en estado natural entre los 0 y los 2000 metros sobre el nivel del mar, el desarrollo óptimo de las plantas se alcanza entre los 500 y los 1500 metros, con temperaturas de 17°C a 26°C, precipitaciones de 1200 a 2500 mm/año, humedad relativa del 80-90% y suelos con fertilidad moderada y buen drenaje (Bambusa.es, s.f.b).



Figura 140. *Guadua verde*.
Fuente: Wikipedia.

La *Guadua* es un material natural con unas características físico-mecánicas aptas para su uso como material estructural en el sector de la construcción. Como demuestra la **Figura 141**, la disposición de sus fibras permite que el comportamiento a fuerzas axiales ejercidas en el sentido de las fibras sea muy bueno, ya que las fibras y los conductos vasculares por los cuales la planta transporta sus nutrientes presentan una alta resistencia mecánica a la tracción. Además, los vasos conductores se encuentran revestidos por un tejido denominado parénquima, que aumenta la resistencia del material (Aristizabal, 2016).

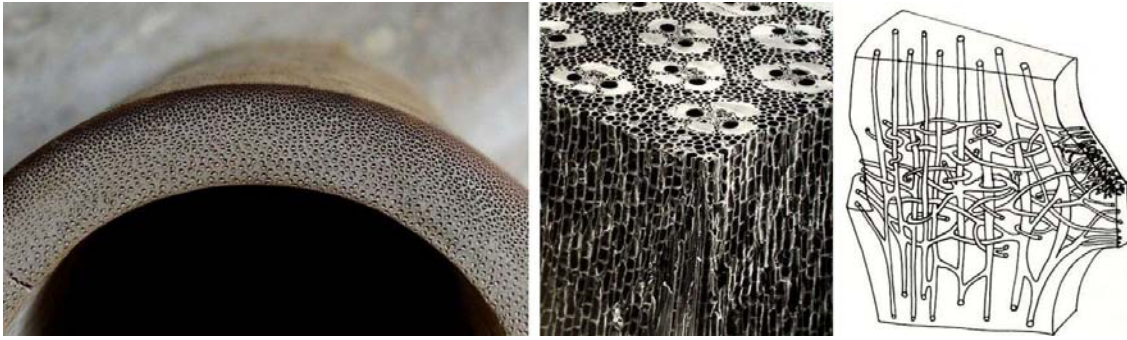


Figura 141. Composición interna de la *Guadua*.
Fuente: Palakas.

Entre las ventajas ecológicas de la *Guadua*, se encuentra el hecho de que su sistema radicular entretrejido y la gran cantidad de rizomas que tiene la *Guadua* (**Figura 142**) contribuyen eficientemente a conservar y recuperar el suelo, pues debajo de la tierra la planta forma un complejo sistema de redes que amarra fuertemente el suelo, evitando de ese modo la erosión en las laderas cercanas a los ríos y otras fuentes de agua (Carmioli Umaña, 2009).

Otra gran ventaja que presenta la *Guadua* es que puede reproducirse y propagarse mediante muchos métodos, siendo los más comunes (debido a su economía, rapidez, masificación y calidad) la reproducción sexual, la propagación asexual y la propagación por chusquines¹², una variante de la propagación asexual característica del bambú.



Figura 142. Rizoma de *Guadua*.
Fuente: *Guadua Bamboo*.

La reproducción sexual consiste en la germinación de la semilla. La *Guadua* es una planta de floración esporádica (ya que sólo algunos especímenes florecen, haciéndolo en periodos irregulares). Además, las semillas tienen un periodo de viabilidad o capacidad de germinación muy corto, por lo que este método es el menos utilizado (Teneche, 2013).



Figura 143. Reproducción asexual mediante chusquines de la *Guadua*.
Fuente: *Guadua Bamboo*.

En la propagación asexual se emplean partes de la planta original para desarrollar nuevas plantas, empleando rizomas, secciones del tallo o chusquines. Sembrar una raíz o rizoma, genera brotes gruesos y vigorosos que crecen rápidamente; pero la extracción de la raíz resulta muy complicada, por lo que el proceso no es muy económico. La siembra de tallo se puede realizar horizontal o verticalmente, pero el culmo siempre debe incluir un nudo con yema activa; el proceso de crecimiento puede acelerarse añadiendo agua en los entrenudos (Botero Cortés, 2001).

¹² Se denomina “chusquín” a las plantas delgadas y pequeñas que generan los rizomas, especialmente en manchas que han sido sobrexplotadas o afectadas por incendios o acción del viento. Un mecanismo de defensa de la planta al no tener follaje que promueva la fotosíntesis, es el de generar este tipo de plantas pequeñas (Teneche, 2013).

La propagación por chusquines es el método más empleado (**Figura 143**). El cultivo de chusquines tiene dos fases. En la primera, se generan brotes igual de delgados y pequeños, pero que colonizan el área donde está plantado. Posteriormente, empiezan a aparecer brotes con el doble del diámetro del que los generó y con altura directamente proporcional al diámetro. En ese momento, se separan los brotes generados por el chusquín original (deshije) y se siembran por separado, para que inicie nuevamente el rebrote y así continuar el proceso de reproducción de chusquines hasta obtener el número de plantas deseado. Normalmente el cultivo de chusquines se hace en un lugar adecuado, que se denomina banco de propagación, con adecuadas fertilizaciones y control de la humedad y las malezas (Botero Cortés, 2001).

La **Tabla 9** recoge los valores de las principales características físico-mecánicas calculados por diferentes autores para distintas especies de *Guadua*.

Tabla 9. Valores de las principales características físico-mecánicas de distintas especies de *Guadua*.

Especie	Mínimo	Máximo	Autor de la investigación
Peso específico del bambú seco (kg/m³)			
<i>Guadua aculeata</i>	370	920	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua angustifolia</i>	620	900	Correal y Arbeláez 2010
Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	47.9	56.6	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	42.3	66.2	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	25.1	41.8	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	29.3	46.6	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia Macana</i>	51.5	67.6	Hidalgo López 1978
<i>Guadua angustifolia Macana</i>	50.6	59.7	Takeuchi y González 2007
<i>Guadua angustifolia</i>	37.6	42.1	Correal y Arbeláez 2010
<i>Guadua angustifolia Atlántica</i>	-	41.8	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia Sur</i>	-	41.2	Sotela 1992
Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	58.5	92.2	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua angustifolia Macana</i>	92.5	162.7	Hidalgo López 1978
<i>Guadua angustifolia Castilla</i>	53.7	153.0	Hidalgo López 1978
<i>Guadua angustifolia</i>	-	190.7	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia</i>	154.8	187.7	González <i>et al.</i> 2006
Resistencia a cortante del bambú seco (MPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	7.70	11.60	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	4.50	7.20	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	4.50	6.80	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia Cebolla</i>	-	5.57	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia</i>	7.10	7.80	Correal y Arbeláez 2010
<i>Guadua angustifolia Atlántica</i>	-	6.18	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia Sur</i>	-	7.35	Sotela 1992
Resistencia a flexión estática del bambú (MPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	62.8	79.6	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	51.9	69.5	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	59.7	89.2	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	77.0	102.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	72.2	93.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	75.6	88.3	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia</i>	54.5	81.7	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994
<i>Guadua angustifolia</i>	86.9	103.8	Correal y Arbeláez 2010

Módulo de elasticidad del bambú en compresión paralela a las fibras (GPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	19.3	20.7	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	13.7	18.0	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	15.1	18.8	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua aculeata</i>	8.7	18.9	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	9.4	14.2	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	8.4	12.3	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	10.1	20.9	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	8.5	12.6	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia Macana</i>	17.4	18.1	Takeuchi y González 2007
<i>Guadua angustifolia Atlántica</i>	-	18.9	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia Sur</i>	-	17.3	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia</i>	14.9	20.0	Correal y Arbeláez 2010
Módulo de elasticidad del bambú en tracción paralela a las fibras (GPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	8.2	9.8	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
Módulo de elasticidad del bambú en flexión estática (GPa)			
<i>Guadua aculeata</i>	20.8	24.1	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	15.1	18.6	Zaragoza-Hernández <i>et al.</i> 2015
<i>Guadua aculeata</i>	13.8	19.5	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua amplexifolia</i>	14.5	22.7	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	14.8	21.1	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua velutina</i>	15.4	19.6	Ordóñez-Candelaria y Bárcenas-Pazos 2014
<i>Guadua angustifolia</i>	17.0	18.3	Correal y Arbeláez 2010
<i>Guadua angustifolia</i>	-	17.6	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994

La **Tabla 9** muestra que, en relación al peso específico, las dos especies analizadas presentan un valor máximo similar, aunque, en comparación con la *Guadua angustifolia*, la *Guadua aculeata* presenta una mayor variación entre el valor mínimo y el valor máximo, pues las condiciones climatológicas y de cultivo afectan más a su desarrollo que al de la *Guadua angustifolia*.

Los valores más altos de resistencia a compresión paralela a las fibras (superiores a 56 MPa) corresponden a las especies *Guadua aculeata* y *Guadua angustifolia Kunth variedad Macana*, mientras que el resto presentan valores situados entre los 41 y los 47 MPa, aproximadamente.

Sin embargo, es precisamente la especie *Guadua angustifolia Kunth variedad macana* la que presenta el menor valor máximo en resistencia a tracción paralela a las fibras (92.2 MPa), si bien hay que tener en cuenta que son menos las especies estudiadas para este tipo de esfuerzo, por lo que se puede suponer que habrá otras especies de *Guadua* con valores inferiores a ella. De nuevo en este caso, diferentes variedades de *Guadua angustifolia* son las que presentan los mayores valores de resistencia, alcanzando 190 MPa.

En el caso del esfuerzo cortante, la *Guadua aculeata* muestra los mayores valores de resistencia, mientras que la *Guadua angustifolia Kunth variedad Cebolla* presenta el menor valor máximo. En comparación al resto de especies analizadas, la *Guadua angustifolia* estudiada por Correal y Arbeláez (2010) presenta valores medios, pero muy estables.

En cambio, en el caso de flexión estática, es precisamente la *Guadua aculeata* del estudio de Zaragoza-Hernández y sus colaboradores (2015) la que menores valores presenta, sin alcanzar los 80 MPa. En cuanto a los valores más altos, son la *Guadua angustifolia* analizada por Correal y Arbeláez (2010) y la *Guadua amplexifolia* las que los presentan, con más de 100 MPa.

El módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras de las diferentes especies del género *Guadua*, muestra una gran variedad de resultados para diferentes estudios realizados a la misma especie, incluso cuando son los mismos autores quienes los han realizados. No obstante, se puede determinar que, en general, es la especie *Guadua amplexifolia* la que menores valores presenta, mientras que la *Guadua aculeata* y la *Guadua angustifolia* del estudio de Correal y Arbeláez (2010) son las variedades que mayores valores muestran (alcanzando los 20 GPa).

Por último, en cuanto al módulo de elasticidad en flexión estática, se observa en primer lugar que los valores son mayores que en el caso del módulo de elasticidad en compresión. Además, es la *Guadua angustifolia* la que menores valores presenta, mientras que las especies *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina* son las que, en promedio, presentan unos valores mayores.

Por lo tanto, se puede determinar que, en general, las especies del género *Guadua* reúnen las características mecánicas necesarias para poder ser empleadas con carácter estructural (y sin él) en el sector de la Construcción, pues presentan unos excelentes valores de resistencia en tracción vertical paralela a las fibras y en flexión estática, siendo este último el esfuerzo más demandado en edificación y obra civil.

A continuación, se analizan detalladamente las características de la especie *Guadua angustifolia Kunth*, por ser ésta la variedad de *Guadua* más utilizada en construcción a lo largo del mundo y por ser la única que se cultiva y estudia en España actualmente.

- ***Guadua angustifolia Kunth***

La especie del género *Guadua* más importante, debido a sus características y propiedades, es la *Guadua angustifolia Kunth*, que se encuentra principalmente en América del Sur, desde Panamá hasta Perú. Es muy abundante y ampliamente utilizada en la construcción de viviendas, especialmente en Colombia y en Ecuador (Londoño, 1989).

La especie *Guadua angustifolia Kunth*, representada en la **Figura 144**, destaca dentro de su género por sus excelentes características físico-mecánicas, ya que presenta mayor resistencia y capacidad para absorber energía que el resto de especies de su género, lo que la hace apta para su uso en estructuras de construcción debido a sus buenas capacidades sismorresistentes. Es por ello que es una de las veinte especies mejor valoradas de bambú. Además, sus culmos pueden alcanzar hasta 30 metros de altura y 25 centímetros de diámetro. Sobresale por ser muy recta y estar provista de espinas y pelos blancos en los nudos basales. Sus entrenudos tienen entre 20 y 45 centímetros de longitud, situándose los de mayor tamaño en la parte intermedia del culmo y los de menor en la parte inferior (Anon., s.f.).



Figura 144. *Guadua angustifolia* Kunth seca.
Izquierda: Culmos cortados y curados. Derecha: Culmo seccionado.
Fuente: Bambusa Estudio (Izquierda) / Palakas (Derecha).

Dentro de la especie se presentan pequeñas variaciones denominadas formas (**Figura 146**). Las más comunes son *Macana*, *Cebolla* y *Castilla*.

La forma *Macana* (**Figura 145**) presenta culmos de paredes gruesas (12 mm) y es muy resistente, con abundantes ramas inferiores espinosas (Saltaren & Montaña, 2000). Esta forma crece con facilidad en terrenos con pendientes pronunciadas y en suelos con pocos nutrientes y baja humedad; además, tiene acanaladura visible y pronunciada hasta la mitad del entrenudo y diámetros exteriores que oscilan entre los 70 mm y los 150 mm, presentando a menudo pequeñas coloraciones blanquecinas (Ordoñez Candelaria & Salomón Quintana, 2009).



Figura 145. Espina de un culmo de *Guadua angustifolia* Kunth forma *Macana*.
Fuente: Guadua y Bambú Colombia.

La forma *Cebolla*, llamada también "*Guadua Balsa*", presenta culmos de paredes más delgadas que las de la forma *Macana* (10 mm), con diámetros externos de alrededor de 100 mm y pocas ramas inferiores espinosas (Saltaren & Montaña, 2000). En corte longitudinal de culmos en estado adulto, la coloración interna es amarillenta, no hay presencia de tejido blanquecino y los nudos son convexos en el sentido del crecimiento del tallo. Presenta acanaladura de la base de la yema hacia arriba apenas perceptible y que se prolonga hasta la mitad del entrenudo. Se desarrolla en suelos ricos en nutrientes con alta humedad y pendientes bajas (Londoño, 1989).

La forma *Castilla* presenta diámetros grandes, de entre 180 mm y 350 mm, con espesores de pared de alrededor de 150 mm. Se desarrolla en suelos húmedos y ricos en nutrientes (Teneche, 2013). Además, existe una forma, la variedad bicolor, que sólo se ha encontrado en Colombia (Londoño, 1989).

En los países de América del Sur, se han generado programas de pequeñas plantaciones que emplean esta especie para la protección de las riberas de los ríos y de taludes, para el embellecimiento del paisaje, como materia prima para la elaboración de productos artesanales, etc. Además, la *Guadua angustifolia* Kunth se ha utilizado también en iniciativas de carácter social, especialmente en el desarrollo y promoción de plantaciones en algunos de los sectores más desfavorecidos, de forma tal que de ellas se pueda generar suficiente materia prima para la construcción de viviendas, muebles y artesanías (Cely Moreno, et al., 2012).



Figura 146. Formas de *Guadua angustifolia* Kunth.

Fuente: INBAR.

2.3.4.2. *Bambusa*

La *Bambusa* (Figura 147) es un género de bambú alto (de hasta 11 m de altura), densamente cespitoso, con rizomas paquimorfos y tallos leñosos, cilíndricos y fistulosos. Habitualmente, cuenta con una rama principal por nudo y varias ramas menores. Este género se caracteriza por no tener espinas y ser, en la mayoría de sus variedades, hermafrodita. Los culmos cuentan con hojas caulinares que los protegen en las primeras etapas, pero que prontamente se caen. Las hojas de sus ramas son láminas pequeñas, erectas y persistentes. En su etapa adulta, este género muestra inflorescencias blanquecinas en los culmos (Espejo Serna, et al., 2000).



Figura 147. *Bambusa ventricosa*.
Fuente: Sistema Nacional de Vigilancia y Monitoreo de Plagas.

Este bambú es originario del sudeste asiático y se encuentra principalmente en China, el Himalaya, Taiwán, Melanesia y el territorio norte de Australia, aunque se ha naturalizado en África, América del Sur y varias islas oceánicas. Pese a que se trata de una planta que se desarrolla naturalmente en climas tropicales, su cultivo se ha podido adaptar a climas templados gracias a una ligera resistencia al frío. En España, la *Bambusa* se puede cultivar perfectamente en zonas costeras o de alta temperatura, gracias a que éstas presentan un clima casi tropical. No es recomendable sembrarla en zonas del interior del país donde las temperaturas puedan bajar por debajo de los 0°C, ya que las heladas pueden detener su crecimiento temporalmente, haciendo que crezca hasta a la mitad de la velocidad de su ritmo normal (Portillo, s.f.).

Este género de bambú es de tipo “clumping”, que en inglés significa agrupamiento y hace referencia a la forma en que crece y se expande cada planta. El rizoma permanece estable y no se expande más allá del punto en que lo plantemos, formando nuevas cañas progresivamente unas pegadas a otras en un grupo muy compacto. Por este motivo se le denomina también como no-invasivo. La *Bambusa* suelen tardar hasta cinco años (en condiciones óptimas de crecimiento) en desarrollarse completamente y llegar a su fase adulta, aunque su madera es

aprovechable a partir del tercer año de crecimiento, como el resto de géneros no invasivos (Bambú Gigante, s.f.a.).

Diversas especies de *Bambusa* suelen venderse en forma de cepas (cañas) enraizadas con una porción de rizoma, facilitando así su adaptación y crecimiento. Todas las variedades de este género pueden cultivarse en macetas grandes o jardineras, aunque su crecimiento se limitará al espacio que se le proporcione. No obstante, el rizoma podría llegar a dañar los contenedores de plástico con el tiempo (Portillo, s.f.).

La *Bambusa* es un género que cuenta con un gran número de especies, cada una con sus propias características y matices. La **Tabla 10** recoge los valores de las principales características físico-mecánicas calculados por diferentes autores para distintas especies de *Bambusa*.

Tabla 10. Valores de las principales características físico-mecánicas de distintas especies de *Bambusa*.

Especie	Mínimo	Máximo	Autor de la investigación
Peso específico del bambú seco (kg/m³)			
<i>Bambusa heterostachya</i>	390	580	Mohmod <i>et al.</i> 1995
<i>Bambusa blumeana</i>	390	590	Espiloy 1986
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	533	799	Ribeiro <i>et al.</i> 2017
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	720	760	Oliveira da Mota <i>et al.</i> 2017
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	680	Sattar <i>et al.</i> 1992
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	630	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	570	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	650	Ghavanni 1988
Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa blumeana</i>	25.3	28.8	Mohmod <i>et al.</i> 1993
<i>Bambusa blumeana</i>	25.3	28.9	Mohmod y Jusuh 1992
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	-	49.4	Oliveira da Mota <i>et al.</i> 2017
Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris</i>	30.4	41.1	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	27.0	Álvarez Vega 2018
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	111.0	141.0	Oliveira da Mota <i>et al.</i> 2017
Resistencia a cortante del bambú seco (MPa)			
<i>Bambusa blumeana</i>	4.61	5.00	Mohmod <i>et al.</i> 1993
Resistencia a flexión estática del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris</i>	85.7	102.2	Valero <i>et al.</i> 2005
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	75.0	Sattar <i>et al.</i> 1992
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	84.0	Prawirohatmodjo 1990
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	39.0	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	78.0	Ghavanni 1988
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	112.0	151.0	Oliveira da Mota <i>et al.</i> 2017
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	48.0	132.0	Ribeiro <i>et al.</i> 2017
Módulo de elasticidad del bambú en flexión estática (GPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	6.1	14.3	Ribeiro <i>et al.</i> 2017
<i>Bambusa vulgaris Vittata</i>	11.3	14.1	Ribeiro <i>et al.</i> 2017
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	14.3	Sattar <i>et al.</i> 1992
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	7.1	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris</i>	-	5.9	Ghavanni 1988

Al igual que con el género *Guadua*, a continuación, se analizan los valores de las principales características recogidas en la **Tabla 10** con respecto a diferentes especies del género *Bambusa*.

En primer lugar, hay que mencionar que, debido a que, en general, el género *Bambusa* presenta valores de resistencia inferiores a otros géneros, como la *Guadua* o la *Dendrocalamus*, y que, por tanto, no se emplea habitualmente en el sector de la Construcción (salvo en viviendas unifamiliares de dimensiones reducidas), son pocas las especies de *Bambusa* que han sido estudiadas por los diversos autores.

Con respecto al peso específico, la especie *Bambusa vulgaris Vittata* es la que mayores valores presenta (casi 800 kg/m³), mientras que el menor peso específico lo presentan varias especies: *Bambusa blumeana*, *Bambusa heterostachya* y la *Bambusa vulgaris* del estudio de Valero y sus colaboradores (1995), con valores inferiores a los 600 kg/m³.

Sólo la resistencia a compresión paralela a las fibras de dos especies ha sido analizada, siendo evidente que la *Bambusa blumeana* muestra los valores más bajos, pues la *Bambusa vulgaris Vittata* presenta un valor máximo un 42% mayor que la *Bambusa blumeana*.

La *Bambusa vulgaris Vittata* es también la especie analizada que mayor resistencia a tracción paralela a las fibras presenta, con un valor máximo un 243% mayor que la *Bambusa vulgaris Vulgaris* y un 522% mayor que la *Bambusa vulgaris* del estudio de Valero y sus colaboradores (2005).

En cuanto a la resistencia a flexión, la *Bambusa vulgaris Vittata* presenta los valores mayores, aunque con grandes diferencias entre el valor mínimo y el máximo en el caso del estudio de Ribeiro y sus colaboradores (2017). El resto de especies analizadas muestran valores inferiores que varían desde 39 a 102 MPa.

La *Bambusa vulgaris Vittata* y la *Bambusa vulgaris* del estudio de Sattar y sus colaboradores (1992) son las especies con mayor módulo de elasticidad en flexión estática, duplicando los valores del resto de especies analizadas.

En resumen, se concluye que, de entre las especies del género *Bambusa* analizadas, la *Bambusa vulgaris Vittata* es la que mejores características físicas y mecánicas presenta, aunque siempre con valores inferiores a los del género *Guadua*, a excepción de la resistencia en flexión estática, donde la *Bambusa vulgaris Vittata* presenta un valor máximo superior.

- ***Bambusa oldhamii***

La *Bambusa oldhamii* (**Figura 148**), llamada en algunas regiones “Bambú Oldham”, “Bambú africano” o “Bambú gigante”, es una de las especies con mayor adaptabilidad, es de rápido crecimiento y no es invasor, ya que se desarrolla en forma simpodial, es decir, en cepa bien definida. Su crecimiento alcanza de 12 a 20 metros de altura (contando el follaje) y sus diámetros oscilan entre los 4 cm y los 10 cm (Bambuerver, s.f.). Sus dimensiones máximas dependen mucho de la temperatura, llegando a tolerar hasta -7°C (Meredith, 2001).

Es uno de los bambúes de crecimiento más recto, sin ramas bajas y con cañas de color verde musgo uniforme. Sus ramas son, por lo general, más cortas que las de otras variedades de bambú y crecen en los meses más calurosos del año. En cambio, sus hojas tienden a ser largas y erectas (Bambú Gigante, s.f.b.). Posee hojas perennes y, de forma natural, se vale de anemofilia para polinizar sus flores, dotadas de unidades reproductivas hermafroditas (Pérez, 2012). La

Bambusa oldhamii es a menudo confundida con el género *Dendrocalamus*, pues su crecimiento y desarrollo es muy similar, aunque su resistencia al frío es superior (Bambú Gigante, s.f.b.).

Fue descrito por primera vez por Munro en 1868, aunque el espécimen tipo fue recolectado en Taiwán por Oldham, de quien tomó el nombre la especie. La *Bambusa oldhamii* es originaria de la isla de Taiwán y del sur de China (Fujian, Guangdong, Guangxi, Hainan, Zhejiang), aunque se ha naturalizado en numerosos lugares, destacando las Islas Ryukyu, Nueva Zelanda, Honduras, Perú, Chiapas, etc. Su cultivo en invernadero se ha introducido en todo el mundo, incluyendo Alemania, Australia y gran parte de Estados Unidos (Ohrnberger, 1999), como demuestra la **Figura 149**.

En España, la *Bambusa oldhamii* está siendo muy demandada principalmente en regiones con climas templados a lo largo del año e inviernos fríos o con posibilidad de heladas que pueden afectar en gran medida al género *Dendrocalamus*, pero no tanto a la *Bambusa oldhamii*. No obstante, hasta ahora su cultivo en las regiones costeras e interiores del norte de España ha dado resultados poco fructíferos, con poco o ningún desarrollo tras el paso de los años, pues los culmos apenas alcanzan 2 o 3 cm de grosor y/o muestran daños severos tras la llegada del invierno. Por ello, en la actualidad sólo se recomienda su cultivo en las regiones del sur, como el litoral de Andalucía, Murcia y Extremadura (Bambú Gigante, s.f.b.).

La *Bambusa oldhamii* se desarrolla mejor en suelos con pH moderadamente ácido (pH 5.5) a neutro (pH 7), siendo óptimos aquellos levemente ácidos (pH 6.5 - 6.8). Los suelos con pH menor a 5.5 (suelos ácidos) son desaconsejables, mientras que los suelos con pH mayor a 7.5 (suelos alcalinos) deben ser acondicionados (Peña & Tokatlian, 2013). Su parte subterránea crece con vigor en suelos con textura franca arenosa o franca arcillosa, ya que éstos mantienen generalmente un equilibrio más o menos constante de humedad (Pérez, 2012). Esta especie no es buena tolerando la salinidad, por lo que los valores de conductividad eléctrica del suelo deben ser menores a 1.25 dS/m. En cambio, debido al sistema radicular superficial del bambú, la profundidad del suelo no suele ser una característica crítica (Peña & Tokatlian, 2013).



Figura 149. *Bambusa oldhamii* cultivada en invernadero.
Fuente: Red Cloud Bamboo.

En cuanto a sus necesidades lumínicas, puede situarse en un lugar con semisombra o con exposición directa al sol indistintamente, no creciendo bien en la sombra (Pérez, 2012). Las precipitaciones son el factor más importante en relación a su cultivo, en cuanto al desarrollo, productividad y rentabilidad. Antes de que aparezcan los primeros brotes, es muy importante asegurarle a la plantación suficiente agua para obtener un rendimiento adecuado, ya que es cuando se activan las yemas subterráneas que establecerán la productividad de la temporada entrante (Peña & Tokatlian, 2013).

Como el resto de especies de bambú, la *Bambusa oldhamii* tiene numerosos usos y aplicaciones. Se emplea en áreas inundadas para recuperar el suelo mediante prácticas agrícolas (Bambú Gigante, s.f.b.), así como para reforestación, captura de dióxido de carbono y creación de cortinas cortaviento o de linderos (Bambuerver, s.f.).



Figura 148. *Bambusa oldhamii*.
Fuente: Bambú Pianta Ornamentali Italia

También se puede usar para crear entornos arbolados con una finalidad puramente estética o para aportar algo de intimidad (Pérez, 2012). Cuando se cultiva con fines comerciales, puede ser empleada para producir madera, papel, carbón, carbón activado, muebles y todo tipo de elementos decorativos (Peña & Tokatlian, 2013). En la construcción, no es adecuada para fines estructurales (Meredith, 2001). Sus ramas y culmos pueden utilizarse como tutores en agricultura (Bambuerver, s.f.) o para fabricar vallados, invernaderos y “chambaos”; mientras que sus hojas se pueden compostar (Maza, 2016). Debido a su textura crujiente y sabor dulce, los brotes jóvenes de *Bambusa oldhamii* son muy apreciados en la cocina de Taiwán y China (Meredith, 2001), como se aprecia en la **Figura 150**. Además, el ganado puede alimentarse de sus hojas, aunque debe tenerse en cuenta que tienen mucha sílice (Maza, 2016).



Figura 150. Hombre cocinando *Bambusa oldhamii*.
Fuente: Canal 2.

- ***Bambusa vulgaris Vittata***

La especie *Bambusa vulgaris Vittata* (**Figura 151**), llamada también “Bambú pintado”, “Bambú dorado hawaiano” o “*Bambusa striata*”, es un bambú tropical y subtropical, de carácter no invasivo, originario de China y Japón, aunque muy cultivado también en India, donde se usa con fines decorativos (Schröder, s.f.a). Es una de las especies de bambú ornamental más cultivadas en el mundo. Sus culmos son brillantes, de color amarillo con estrías anchas o estrechas de color verde oscuro (raramente verde claro) distribuidas de manera aleatoria a lo largo de la caña. Los culmos tienen una longitud de entre 10 y 15 metros, con entrenudos de entre 10 y 15 cm. El espesor de la pared del culmo es grueso y su diámetro externo de entre 5 y 8 cm (Gardenia, s.f.).



Figura 151. *Bambusa vulgaris Vittata* y nuevo brote.
Fuente: Caldwell Nursery and Botanic Gardens.

El color, el ancho y la distribución de las estrías varía en cada planta y en cada entrenudo de un mismo individuo. Ocasionalmente, puede encontrarse un entrenudo verde con estrías amarillas. También los nudos pueden variar de color y presentar estriado (Schröder, s.f.a). Esta especie presenta una rama principal y varias secundarias en cada entrenudo, habitualmente estriadas de igual modo que los culmos. Sus hojas, de hasta 20 cm de largo y 2.5 cm de ancho, son perennes, estrechas y tienen forma de lanza (Gardenia, s.f.). Las hojas caulinares que lo protegen durante su etapa más joven tienen una vellosidad urticante (Bambú Parque, s.f.)

La *Bambusa vulgaris Vittata* crece hasta una altitud de 1000 metros sobre el nivel del mar y puede sobrevivir a temperaturas de hasta -3°C (Schröder, s.f.a). Se desarrolla mejor en suelos fértiles, frescos y húmedos, siendo afectada negativamente por la presencia excesiva de caliza (Planfor, s.f.c). Su propagación más común es mediante esquejes o extrayendo de la planta original secciones de rizomas jóvenes que, posteriormente, se siembran para dar lugar a una nueva planta. Este proceso debe realizarse en primavera (Gardenia, s.f.). No obstante, la *Bambusa vulgaris Vittata* es una de las especies de bambú que mejor toleran la reproducción in vitro (García-Ramírez, et al., 2007) (**Figura 152**).

En cuanto a sus necesidades lumínicas, si bien es cierto que puede crecer en semisombra, prefiere estar a pleno sol (Gardenia, s.f.). Puede ser cultivada sin problema en maceteros o jardineras, siendo aconsejable ponerlo a resguardo cuando las temperaturas disminuyan. Puede emplearse como bambú de interior siempre que esté expuesto a sol directo (Planfor, s.f.c).

El uso más habitual de la *Bambusa vulgaris Vittata* es como elemento ornamental, como seto para terrenos fronterizos o como control de la erosión en laderas o lechos de ríos. Una vez cosechado, los culmos se utilizan como postes en construcciones ligeras o muebles y, en Centroamérica, se suelen emplear para hacer cestas o como postes de antenas de televisión (Schröder, s.f.a). El agua de los brotes hervidos se usa como medicamento, mientras que sus hojas se consumen como alimento y tienen actividad antimicrobiana. El efecto positivo para la salud de su consumo se atribuye a las sustancias bioactivas que posee. Además, la hoja de la *Bambusa vulgaris Vittata* es una fuente potencial de antioxidantes naturales (Goyal, et al., 2013).

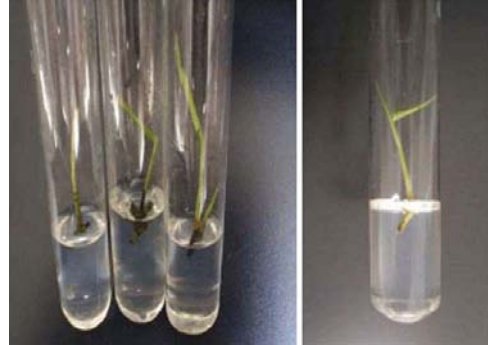


Figura 152. Explantes de *Bambusa vulgaris Vittata* a los 10 días de cultivo durante su reproducción in vitro.

Fuente: García-Ramírez, et al. (2007).

- ***Bambusa vulgaris Vulgaris***

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* (**Figura 153**), conocida como “Bambú verde” o “Bambú común”, es la especie más habitual de bambú. Presenta cortos y espesos rizomas y culmos erectos, ligeramente curvados en la parte superior, que alcanzan los 15 metros de altura y 8-12 cm de diámetro. Es de un intenso color verde oscuro y sus entrenudos tienen 20-45 cm. Los nudos son prominentes, de color blanco o verde y con numerosas raíces aéreas si se encuentran en la parte inferior del culmo. El espesor de la pared suele medir 8-16 mm (Puccio, s.f.).



Figura 153. *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Izquierda: Culmos. Centro: Brote. Derecha: Hojas.
Fuente: Guadua Bamboo (Izquierda) / Exotic Plants (Centro) / Herbarium (Derecha).

A partir de los nudos surgen sus ramas, presentando una principal y varias secundarias en cada nudo. En las ramas desarrolla las hojas y las inflorescencias en grupos compactos de entre 4 y

12 flores hermafroditas. Las hojas son característicamente lanceoladas y glabras¹³, tanto en el haz como en el envés. Tienen entre 10 y 30 cm de longitud y entre 1.3 y 2.5 cm de anchura. Las inflorescencias son pseudoespiguillas lanceoladas y bífidas de entre 2 y 3.5 mm de longitud y entre 0.4 y 0.5 mm de ancho (Nianhe, *et al.*, 2006). La floración sucede raramente y sin formar frutos, por lo que su reproducción suele realizarse mediante esquejes del tallo, empleando porciones con 2 o 3 nudos. El tallo cortado se entierra oblicua o verticalmente sobre un sustrato arenoso a una temperatura de entre 20 y 24°C (Plantukis, s.f.)

Forma matas más bien abiertas, que se expanden velozmente en los primeros años de implantación, luego crece más lentamente. En la fase juvenil, los culmos están protegidos por hojas caulinares de color marrón amarillento, que presentan vellosidades urticantes y cera de color blanquecino en el punto de conexión con el culmo (Puccio, s.f.).



Figura 154. *Bambusa vulgaris vulgaris* en macetero.

Fuente: Flores y Plantas Jocama.

Esta especie se considera originaria de la zona tropical de Asia, posiblemente del sur de China, y de Madagascar. No obstante, se ha naturalizado en zonas tropicales de todo el mundo (Moreno P., *et al.*, 2007).

El clima ideal para su desarrollo es el tropical o subtropical húmedo, pero se adapta también al templado cálido, pudiendo resistir temperaturas de hasta -3°C y, en el caso de matas frondosas, la sequía, aunque con crecimiento menos exuberante y pérdida parcial del follaje. Es preferible su cultivo a pleno sol, con un suelo constantemente húmedo y bien drenado, ya que requiere mucha agua para su crecimiento, pero le perjudican mucho los encharcamientos. Además, puede ser cultivada en maceteros o jardineras (**Figura 154**), así como en interior siempre y cuando tenga mucha luz (Puccio, s.f.).

El uso más habitual de la *Bambusa vulgaris vulgaris* es ornamental, como empalizada, entubamiento para riego, combustible, construcciones rurales, instrumentos y para el control de la erosión (Puccio, s.f.). Pero sus cañas y hojas también pueden emplearse para obtener pasta de papel, para diversas manufacturas de artesanía y para la obtención de fibras de uso textil. Además, los brotes jóvenes pueden emplearse en el ámbito culinario y las hojas sirven como alimento para los animales (Plantas y Hongos, s.f.). Debido a su elevado contenido de azúcar, puede emplearse para producir bebidas alcohólicas.

En etnobotánica¹⁴, se han utilizado diversas partes de la *Bambusa vulgaris vulgaris* por sus supuestas propiedades abortivas, afrodisiacas, anticoagulantes, emenagogas¹⁵, insecticidas y depurativas. De este modo, se conoce su uso en el tratamiento de la malaria, la fiebre palúdica, diversas parasitosis, la disentería, erisipela, ictericia, neumonía, gripe y catarro, entre otras enfermedades (Johnson, 1999). No obstante, presenta bajos niveles de inhibición frente a *Plasmodium falciparum* y *Plasmodium berghei*, parásitos responsables de la malaria, por lo que no se



Figura 155. Extracto de *Bambusa vulgaris vulgaris* alto en sílice, procedente de India. Fuente: Ambe NS Agro Products Pvt. Ltd.

¹³ Que está desprovisto de pelos y glándulas.

¹⁴ Estudio de las relaciones que existen entre las plantas y los grupos locales, cómo se relacionan y cómo influyen las plantas en el desarrollo de las culturas.

¹⁵ Que provoca o favorece la menstruación.

considera especialmente eficaz en el tratamiento de esta enfermedad (Rodríguez-Pérez, *et al.*, 2006). Por el contrario, se ha demostrado su efectividad contra el *Bacillus subtilis*, el *Micrococcus pyogenes*, el *Staphylococcus aureus* y la *Salmonella Typhi*, lo que significa que tiene propiedades ecbólicas¹⁶ y capacidad para acelerar la expulsión del feto en partos. Por otro lado, se ha comprobado una reducción de la fertilidad masculina en ratas al suministrarles extracto de raíz joven de *Bambusa vulgaris Vulgaris* (Das, *et al.*, 2012). Estas capacidades terapéuticas del género *Bambusa* fueron analizadas por Mejía G. y sus colaboradores (2009), junto con otras propiedades y beneficios de aplicación en las industrias cosmética y alimentaria (Mejía G., *et al.*, 2009).

Por último, esta especie es empleada también en el ámbito de la cosmética. La savia obtenida de las hojas tiene propiedades emolientes¹⁷, mientras que el extracto (**Figura 155**) contiene principalmente glucósidos, aminoácidos, ácidos fenólicos y flavonas. Éstas últimas son antioxidantes naturales y ayudan a la piel a recuperarse del estrés oxidativo que sufre a diario. Los glucósidos también son astringentes¹⁸ leves, por lo que ejercen un suave efecto exfoliante. Tiene propiedades calmantes de la piel y mantiene la humedad. Por lo tanto, hace que la piel se vuelva opaca y seca, húmeda y suave (Michalun & Dinardo, 2014).

2.3.4.3. *Phyllostachys*



Figura 156. *Phyllostachys bambusoides*.
Fuente: Naturalista.

El género *Phyllostachys* incluye 50 especies y 200 variedades (**Figura 156**). Es originario de Asia oriental, aunque se encuentra en todos los continentes, siendo el género de bambú más extendido en Europa.

El género fue descrito en 1843 por Philipp Franz von Siebold y Attilio Zuccagni y publicado en *Abhandlungen der Mathematisch-Physikalischen Classe der Königlich Bayerischen Akademie der Wissenschaften*, volumen 3, número 3, página 745 (Watson & Dallwitz, 1994).

Los *Phyllostachys* alcanzan más de 10 metros de altura y son perennifolios¹⁹. Sus culmos son leñosos y muy duros, pese a que sus brotes son comestibles cuando aún es joven. Tienen hojas alargadas lanceoladas que se presentan en tallos flexibles. No suelen florecer y, cuando lo hacen, fallecen al terminar la etapa de floración (Consulta Plantas, s.f.). Este género se caracteriza por generar un único par de ramas en cada nudo (**Figura 157**), aunque, en culmos adultos, a veces surge una tercera rama más delgada entre las dos principales que soportan las hojas. Además, los entrenudos de los *Phyllostachys* suelen presentar acanaladuras o líneas de coloración amarilla o naranja que destacan sobre su habitual color verde oscuro. No obstante, dentro del género existen especies excepcionales que rompen la norma (Bambú Gigante, s.f.e).

¹⁶ Vocablo obsoleto en medicina que hace referencia a cualquier técnica o procedimiento adecuado, que tiene la virtud o eficacia para acelerar la expulsión del feto en los partos laboriosos o complicados y que no representa ningún riesgo.

¹⁷ Que suaviza, ablanda y aumenta el grado de humedad, especialmente en la piel.

¹⁸ Que produce desecación y contracción en los tejidos orgánicos.

¹⁹ Que conserva su follaje todo el año.

Phyllostachys es un género de bambú muy resistente al frío y de crecimiento monopodial²⁰ y estolonífero (“*running*”), es decir, que se propaga por rizomas subterráneos, rápidamente, en todas las direcciones y a una gran distancia. Por este motivo, pueden formar un denso monocultivo de bambú leñoso que puede llegar a asfixiar a las demás plantas (Bambú Gigante, s.f.e). No obstante, no todas las especies del género cuentan con este tipo de propagación, por lo que sólo algunas en concreto (como la *Phyllostachys aurea*, por ejemplo) son consideradas como invasoras en determinados países. En el caso de España, ninguna especie de bambú está incluida en el Catálogo Español de Especies Exóticas Invasoras.

Este género puede prosperar en exposiciones de sombra, semisombra y pleno sol, aunque prefiere lugares frescos. Puede resistir el frío y heladas de hasta -20°C, por lo que son la mejor opción para lugares con inviernos intensos. También es adecuada para jardines costeros, pues tolera los vientos marinos sin problema. El suelo ideal es aquel bien drenado y con abundante materia orgánica. En caso de trasplante desde maceta, es mejor hacerlo en primavera. Los riegos deben ser abundantes en verano, de tal manera que nunca se sequen las raíces, pero sin encharcar. Cada otoño conviene abonarlo con estiércol, humus u otra materia orgánica. No necesitan poda, pero se debe vigilar su crecimiento a partir de los rizomas, pues tienden a extenderse con facilidad. No suelen presentar problemas de plagas, pero pueden ser atacados por hongos si la humedad es excesiva. Con respecto a su reproducción, se pueden propagar fácilmente a partir de los rizomas, preferiblemente hacia principios de la primavera (Consulta Plantas, s.f.).



Figura 157. Par de ramas en un nudo de un culmo de *Phyllostachys aurea*.
Fuente: Naturalista.

El bambú *Phyllostachys* se emplea para fabricar muebles, artesanías, instrumentos musicales, etc. (**Figura 158**). Además, sus brotes se emplean en el ámbito culinario y algunas especies se emplean con fines medicinales. Pero, sin duda alguna, el principal uso de este género es decorativo y como elemento de aislamiento visual y/o acústico. A menudo se emplea en los jardines de las viviendas para crear setos que aporten privacidad y para insonorizar el ruido del tráfico. En estos casos, lo mejor es cultivar el bambú en maceteros que limiten el crecimiento del rizoma o bien emplear barreas anti-rizoma que controlen su propagación. Esta última opción es más económica y versátil, pero hay que asegurarse de colocar bien la barrera y de que su grosor sea suficiente como para que los rizomas no la perforen (Bambú Gigante, s.f.e).



Figura 158. Flauta fabricada con bambú *Phyllostachys*.
Fuente: Un Mundo de Bambú.

²⁰ Crecimiento o ramificación que se compone de un eje principal en cuya zona apical perdura el crecimiento vegetativo y a cuyos lados crecen ramas secundarias.

- ***Phyllostachys atrovaginata***

La especie *Phyllostachys atrovaginata* (**Figura 159**) es también conocida como “Bambú Incienso” o “Bambú de perfume verde” debido a que sus culmos tienen una capa de cera que desprende un agradable aroma similar al sándalo durante las épocas estivales o cuando se frota vigorosamente (Scottish Bamboo, s.f.). Anteriormente esta especie se llamaba *Phyllostachys congesta*, pero la *American Bamboo Society* le cambió el nombre por *atrovaginata* (Lewis Bamboo, s.f.). El epíteto específico *atrovaginata* o “con vaina oscura” se debe al color verde oscuro y rojo vino de las vainas del culmo (Lewis & Miles, 2007), como se aprecia en la **Figura 160**.



Figura 159. *Phyllostachys atrovaginata*.
Fuente: Daniel Sambras.



Figura 160. Brotes de *Phyllostachys atrovaginata* con sus vainas oscuras.
Fuente: I Love Bamboo.

Esta especie es originaria de China y se encuentra sobre todo en las provincias costeras de Zhejiang y Jiangsu. Sus culmos son verdes, crecen erectos y suelen medir entre 5.5 y 10 metros, aunque habitualmente rondan los 7 metros. Su diámetro externo varía entre 2.5 y 7 cm, disminuyendo hacia la parte superior de la caña (Planfor, s.f.a). Crece muy rápido y, aunque es más pequeño que la mayoría de los bambúes leñosos gigantes, alcanza grandes diámetros en proporción a su altura (Maya Garden, s.f.). Sus nudos son muy pronunciados, mientras que sus hojas son pequeñas, de color verde claro (Palma Verde, s.f.). Sus hojas caulinares son cortas y de forma triangular. Las ramas de esta especie crecen de forma muy perpendicular al culmo (Lewis Bamboo, s.f.).

Phyllostachys atrovaginata crece en áreas que van desde subtropicales a templadas, aunque tolera temperaturas invernales de hasta -23°C, siendo una de las especies más resistentes al frío (Lewis & Miles, 2007). Sus rizomas y raíces tienen canales huecos en su interior por los que circula el aire (**Figura 161**), lo que permite que se adapte y sobreviva en suelos húmedos (Scottish Bamboo, s.f.). Puede cultivarse en sombra, semisombra y a pleno sol, pero tolera mal el exceso de caliza en el terreno y crece mejor cuando está resguardado del viento frío (Planfor, s.f.a).

Plantar esta especie es fácil. Basta con cavar un hoyo cuya profundidad sea, aproximadamente, el doble del tamaño del cepellón. En el agujero debe verse estiércol compostado y una buena capa de tierra vegetal. El bambú puede quedar a nivel del suelo o un poco más profundo, ya que no es exigente en ese aspecto. Dado que es una variedad que tiende a expandirse, es aconsejable dejar, como mínimo, una distancia de 1-1.5 metros entre plantas consecutivas, lo que terminará dando lugar a una pantalla vegetal al cabo de 3 años, aproximadamente. Una siembra más cercana, permitirá desarrollar una arboleda más rápidamente (Lewis Bamboo, s.f.). Para evitar que el bambú invada zonas indeseadas, deben emplearse métodos de control de crecimiento, siendo el más empleado las barreras anti-rizoma. Debe tenerse en cuenta



Figura 161. Corte transversal de un rizoma de *Phyllostachys atrovaginata* que muestra los canales huecos por los que circula el aire.
Fuente: Noah Bell.

también que factores como el agua, la luz solar o el clima de la zona acelerarán o ralentizarán el proceso (Palma Verde, s.f.).

En caso de que el pH del terreno no sea adecuado, la *Phyllostachys atrovaginata* puede ser fertilizada siempre y cuando haya pasado al menos un mes desde su siembra. En este caso, es recomendable emplear un fertilizante de liberación prolongada dos veces al año: a principios de primavera para estimular el crecimiento y a mediados de la temporada de crecimiento para reponer los nutrientes que se están agotando (Lewis Bamboo, s.f.).



Figura 162. *Phyllostachys atrovaginata* con uso decorativo.
Fuente: Randijk Bamboe & Hoveniers.

La *Phyllostachys atrovaginata* tiene una madera excelente para su uso en artesanía (Bamboo Garden, 2019). No obstante, el principal uso que se le da es como elemento decorativo en maceteros, jardineras o en el propio suelo (**Figura 162**) y, sobre todo, para la creación de pantallas vegetales gracias a su rápido crecimiento (Palma Verde, s.f.). Además, debido al excelente sabor de sus brotes tiernos, éstos son a menudo empleados en cocina, siendo cosechados en primavera (Maya Garden, s.f.). Por otra parte, debido a su excelente tolerancia a la humedad, se emplea para fijar orillas de ríos y para crear paisajismos en zonas húmedas (Lewis Bamboo, s.f.). Por último, cabe señalar uno de los usos más novedosos de esta especie, que no es otro que la filtración de aguas usadas, proceso conocido como fitorremediación²¹ (Planfor, s.f.a).

- ***Phyllostachys pubescens***

La especie *Phyllostachys pubescens* (también llamada *Phyllostachys edulis* en algunos países) es conocida vulgarmente como “Bambú Moso” o “Bambú de Invierno”, debido a que resiste sin problema las bajas temperaturas invernales (Bambú Gigante, s.f.g). Su etimología “*pubescens*” hace referencia a las finas vellosidades que se observan en los tallos jóvenes y que le dan un tacto aterciopelado, lo que justifica su nombre de pubescente (**Figura 163**). Estas vellosidades suponen un recubrimiento extra que le permite atrapar las pequeñas gotas de humedad del rocío matinal (Cultivos Casaita, s.f.). Fue descrita en 1906 por Jean Houzeau de Lehaie y publicada en la revista belga “*Le Bambou, son etude, sa culture, son emplo*”, volumen 1, número 39 (Flora of China Editorial Committee, 2006).



Figura 163. Vellosidades de un culmo joven de *Phyllostachys pubescens*.
Fuente: Exotic Plants.

Es originaria de China, encontrándose principalmente en el sur del país, al norte de Guangzhou, donde todavía se extiende en grandes selvas vírgenes en las montañas. No obstante, se ha naturalizado también en Corea, Japón y otros países del sudeste asiático (Bambusa.es, s.f.c).

Puede alcanzar los 30 metros de altura en climas con veranos húmedos y cálidos, pero también es capaz de sobrevivir en regiones frías (resistiendo hasta -20°C), aunque en ellas suele presentar

²¹ La fitorremediación (Phytoremediation) es la descontaminación de los suelos, la depuración de las aguas residuales o la limpieza del aire interior, usando vegetales, ya sean plantas vasculares, algas (fitorremediación) u hongos (micorremediación).



Figura 164. Culmos jóvenes de *Phyllostachys pubescens*.
Fuente: Exotic Plants.

menor altura, alcanzando en ocasiones únicamente 3 metros de altura (Rarepalmseeds, s.f.). Las condiciones climáticas y el terreno son parámetros que afectan mucho a sus dimensiones, por lo que, habitualmente, suele medir en torno a 15-28 metros (Cibergarden, s.f.).

Los culmos jóvenes son de color verde azulado y parece como si estuvieran cubiertos de polvo blanco (**Figura 164**). Conforme maduran y por efecto del sol, se oscurecen hasta tomar un color verde intenso (Bambusa.es, s.f.c). Los culmos tienen un diámetro externo de 8-20 cm, con nudos poco marcados y entrenudos cortos. Sus hojas, que habitualmente cuelgan hacia abajo como una cascada, son muy abundantes, estrechas y pequeñas, de 4 a 11 cm de largo, y de 5 a 12 mm de ancho. Las hojas caulinares tienen forma triangular larga o lanceolada, son de color verde o marrón y presentan gruesas vellosidades urticantes (Judziwicz, *et al.*, 2000), como se aprecia en la **Figura 165**.

Debido a que su crecimiento es rizomatoso²², la *Phyllostachys pubescens* presenta un crecimiento lento durante sus 2 primeros años de vida. Sin embargo, a partir de ese momento crece realmente rápido, especialmente en primavera, cuando los nuevos brotes pueden crecer hasta 45 cm al día y, en condiciones óptimas, incluso 1 metro (Cultivos Casaita, s.f.). Mientras los estos nuevos brotes se desarrollan, la planta madre continúa brotando anualmente tallos nuevos. De este modo, aunque los culmos son cortados en torno a los 5 años de edad, la población se mantiene en todo momento constante y sana, pues al retirar los tallos maduros quedan más recursos (como luz, agua y nutrientes) para los nuevos culmos (Bambusa.es, s.f.c).



Figura 165. *Phyllostachys pubescens* jóvenes.
Izquierda: Broto nuevo. Derecha: Hoja caulinar desprendiéndose del culmo.
Fuente: Exotic Plants.



Figura 166. Culmos adultos y semillas de *Phyllostachys pubescens*.
Fuente: The UK Factory.

Esta especie soporta prácticamente todas las condiciones posibles del suelo (a excepción de zonas pantanosas) y es tolerante a la salinidad del aire de las zonas costeras (Cultivos Casaita, s.f.). En general, recibir luz solar directa y un suelo fértil no demasiado seco son fundamentales en su crecimiento. Requiere un riego escaso que debe incrementarse si se encuentra sembrada en una maceta. En cualquier caso, una vez que la planta ha arraigado, soporta bien la sequía (Cibergarden, s.f.).

Como todas las especies de bambú, la *Phyllostachys pubescens* se puede reproducir por rizomas sin problema. Pero lo que sin duda la diferencia del resto es que su propagación por semillas es muy eficiente (**Figura 166**). Para garantizar su germinación,

²² La planta desarrolla primero todo el sistema subterráneo de raíces y rizomas que servirá como sustento de la parte aérea. Posteriormente, el crecimiento subterráneo se ralentiza, produciéndose un gran aumento en la velocidad de desarrollo de la parte aérea de la planta.

se aconseja retirar la cáscara de las semillas, meterlas en un vaso de agua caliente con una gota de lavavajillas y tapar el vaso con papel de aluminio. Se debe inspeccionar el vaso a diario para, conforme vayan germinando, plantarlas en una maceta con sustrato algo arenoso y ubicar el recipiente en un lugar cálido y luminoso, pero sin luz directa del sol (**Figura 167**). Durante esta fase es muy importante que se mantenga siempre húmedas y cálidas (Semillas Únicas, s.f.a). Además, esta especie puede reproducirse mediante trozos de culmo sembrados en la tierra. Esto es posible gracias a que los entrenudos más cercanos al terreno suelen desarrollar raíces aéreas orientadas hacia el suelo. Por lo tanto, basta con cortar varias secciones de culmo que incluyan estas raíces y enterrarlas en el suelo. Al cabo de 2 meses (siempre y cuando el suelo se haya mantenido siempre húmedo), las secciones enterradas habrán desarrollado nuevos brotes. Esta es una de las formas más rápidas de reproducir esta especie (Bambú Gigante, s.f.g).



Figura 167. Semillas germinadas de *Phyllostachys pubescens* plantadas en un semillero.

Fuente: Banggood.



Figura 168. *Phyllostachys pubescens Bicolor*.

Fuente: La Bamboueraie.

Cabe mencionar que la *Phyllostachys pubescens* es una de las especies más extendidas en el mundo debido a su gran capacidad de adaptación al entorno. En China, su país de origen, su área de distribución cubre 2/3 del total del área nacional de bambú (Flora of China Editorial Committee, 2006). En Europa fue introducida a finales del siglo XIX y pronto se comprobó que el clima no le permitía alcanzar dimensiones tan elevadas como en Asia, especialmente al norte de los Alpes. No obstante, alcanza tamaños moderados en Centroeuropa. En Alemania, por ejemplo, suele medir entre 8 y 10 metros de altura (Magic Garden Seeds, s.f.). Sin embargo, en la zona mediterránea de Europa, esta especie es susceptible de tener un buen desarrollo. Sirva como ejemplo la zona sur de Francia, donde llega a alcanzar los 28 metros (Bambú Gigante, s.f.g). En España, esta especie fue introducida a finales de los 90, en concreto, la variedad *Phyllostachys pubescens Bicolor* (**Figura 168**) que, tal y como su nombre indica, se caracteriza por tener el culmo amarillo o dorado con diferentes franjas o rayas finas de color verde. Estos trazos varían de grosor, número y distancia entre sí en cada culmo y, a menudo, entre los propios entrenudos de un mismo culmo (Cultivos Casaita, s.f.).

La *Phyllostachys pubescens* presenta multitud de aplicaciones diferentes. Funciona como regulador hídrico, produce gran cantidad de biomasa y su recolección y uso permite preservar los amenazados y delicados bosques arbóreos (Bambusa.es, s.f.c). Dado que puede cultivarse aislado, en forma de matorral, como bosque e incluso en maceteros y jardineras, es perfecto para el uso ornamental y/o como protección visual en lugar de paredes o vallas (Semillas Únicas, s.f.a). Su madera es muy apreciada en la fabricación de muebles, artesanías y todo tipo de objetos de uso diario (Bambú Gigante, s.f.g), como los posavelas de la **Figura 169**. Alrededor del condado de Anji, en la provincia china de Zhejiang, las laderas están cubiertas de esta especie, que provee de material a cientos de pequeñas y no tan pequeñas fábricas que producen una gran variedad de productos útiles (Bamboo Seeds,



Figura 169. Posavelas fabricados con *Phyllostachys pubescens*.

Fuente: Happyseed.

s.f.). Además, la fibra de esta especie es bastante rígida y se puede emplear en la elaboración de textiles, en la producción de papel y en la fabricación de elementos constructivos de acabado como suelos y falsos techos (Ethnoplants, s.f.). Por último, hay que señalar que las raíces y los brotes jóvenes son carnosos y comestibles (Magic Garden Seeds, s.f.), como refleja la **Figura 170**, siendo considerados un auténtico manjar en China y Japón, donde la *Phyllostachys pubescens* es llamada tradicionalmente “Bambú Noble” (Cibergarden, s.f.). Esta especie se cosecha en China a finales de marzo y principios de abril, y es la especie más importante para la producción de comida. Los brotes se pueden consumir enteros o procesados, mientras que el culmo en tiras frescas es una comida deliciosa que también puede consumirse elaborada como comida enlatada o como comida seca (Bambú Gigante, s.f.g).



Figura 170. Brotes de *Phyllostachys pubescens* listos para su ingesta.

Fuente: Happyseed.

- ***Phyllostachys nigra***

La especie *Phyllostachys nigra*, denominada comúnmente como “Bambú Negro”, es originaria de China (especialmente de la provincia de Hunan, al sur) y de Taiwán (Verdify, s.f.). Ha sido naturalizada en algunas partes del este de Australia (Nueva Gales del Sur y Queensland), en el este de los Estados Unidos (Georgia, Carolina del Sur, Tennessee, Virginia Occidental y Virginia), en Reunión, en Nueva Zelanda y en Hawái (EcuRed, s.f.). El epíteto latino “*nigra*”, que significa “negra”, hace referencia al color oscuro de sus tallos (Coombes, 2012), que se aprecia en la **Figura 171**. Esta especie fue descrita en 1868 por Munro y publicada en *Transactions of the Linnean Society of London*, volumen 26, número 1, páginas 38 y 123 (Darke, 1999).



Figura 171. Culmos adultos de *Phyllostachys nigra*.

Fuente: SVI.

Cuando nacen, sus culmos son verdes y están ligeramente cubiertos de un polvo blanquecino, pero, progresivamente, se van oscureciendo hasta volverse, en un plazo máximo de 2 años, de un profundo y característico color marrón, violeta o negro, sobre todo cuando están expuestos al sol (Planfor, s.f.b). En la **Figura 172** se aprecia su cambio progresivo de color.

En su lugar de origen puede alcanzar entre 10 y 20 metros de altura (Semillas Únicas, s.f.b). En otros entornos suele medir entre 6 y 8 m, con diámetros externos de entre 2 y 5.5 cm (Verdify, s.f.). Sus nudos son prominentes y presentan bandas horizontales, mientras que los entrenudos a veces tienen acanaladuras longitudinales (EcuRed, s.f.).

Fue introducido en Europa en 1827 y se convirtió en el primer bambú oriental rústico. Gracias a su gran capacidad de adaptación, puede cultivarse en cualquier parte de España. En Tomiño (Galicia, España) existe una zona con un microclima muy especial en la que puede llegar a alcanzar 12-15 metros de altura (Verdify, s.f.).



Figura 172. Cambio de color de la *Phyllostachys nigra*. Izquierda: Culmos de 1 año de edad. Centro: Culmos de 2 años de edad. Derecha: Culmos de 3 años de edad.
Fuente: Noah Bell.

Su follaje sempervirente²³ es muy denso y presenta hojas muy finas y brillantes, verdes por arriba y gris azulado por abajo (Plantas & Jardín, 2011). Las hojas están dispuestas alternativamente, pero agrupadas en brotes cortos que crecen desde las ramas. Tienen forma lanceolada y suelen medir 6-12 cm de largo y 9-15 mm de ancho. Las hojas caulinares que rodean el tallo son estrechas y, en su mayoría, no tienen vellosidades, a excepción de ciertas variedades que las presentan en los extremos (EcuRed, s.f.).

Es una especie de crecimiento medio a rápido. Su sistema radicular de rizomas se extiende formando grandes macizos, por lo que tiende a ocupar todo el espacio disponible, como se observa en la **Figura 173**, donde puede apreciarse el contorno de varios rizomas comprimidos a lo largo del interior del macetero. Puede crecer a pleno sol, a medio sombra e incluso a la sombra, llegando a vivir y desarrollarse sin problema en lugares umbríos (Plantas & Jardín, 2011). Se caracteriza por soportar temperaturas de hasta -10°C, pudiendo aguantar hasta -20°C, aunque su follaje se estropea considerablemente (EcuRed, s.f.). No requiere exigencias edáficas²⁴ específicas, adaptándose a prácticamente cualquier condición del suelo, excepto a las zonas pantanosas. No obstante, prefiere un suelo suelto y bien drenado. Requiere poco riego y, una vez arraigado, soporta bien las sequías (Verdify, s.f.).



Figura 173. *Phyllostachys nigra* rompe el macetero tratando de expandirse.
Fuente: Noah Bell.



Figura 174. Semillas germinadas de *Phyllostachys nigra*.
Fuente: Boonthammee Bamboo Garden (BBG).

Puede reproducirse por división de rizomas, por esquejes o por semillas. En el primer caso, basta con cortar los nuevos brotes que nacen de los rizomas en primavera (Plantas & Jardín, 2011). En el caso de semillas (**Figura 174**), debe ser sembrado en primavera u otoño y es recomendable quitarles la cáscara y meterlas en un vaso de agua caliente con una gota de lavavajillas, tapar el vaso con papel de aluminio y,

²³ Dicho de la vegetación, que conserva su follaje verde todo el año.

²⁴ Relativo al suelo, en especial en lo relativo a las plantas.

una vez que las semillas germinen, trasladarlas a un macetero con sustrato algo arenoso que esté ubicado en algún lugar a la sombra. Cuando la planta mida entre 10 y 15 cm de altura, puede ser trasladada a tierra sin problema (Semillas Únicas, s.f.b). Se puede abonar desde primavera hasta finales de verano, lo que hará que crezca y se multiplique más rápido (EcuRed, s.f.).

Como se aprecia en la **Figura 175**, el principal uso que recibe la *Phyllostachys nigra* es ornamental, debido a su característico color y a su capacidad para ser cultivado sin problema en macetas y jardineras. Es ideal para utilizarlo como pantalla vegetal, cortina cortavientos o simplemente como separación física (Plantas & Jardín, 2011). La coloración única de su culmo permite obtener efectos de colores magníficos asociándolo con otras especies de bambú de diversos colores (Planfor, s.f.b). Además, proporciona oxígeno al entorno y ayuda a controlar la erosión del suelo gracias a su extenso sistema de raíces (EcuRed, s.f.). También sirve para obtener leña y para fabricar muebles, instrumentos musicales y todo tipo de artesanías (Semillas Únicas, s.f.b). Dentro de este último sector, cabe mencionar que sus culmos son muy empleados en la fabricación de bastones y cañas de pescar, mientras que sus rizomas se usan para crear mangos de paraguas y bastones, cestería y bolsos de alta gama (Bambú Gigante, s.f.f).



Figura 175. Usos decorativos de la especie *Phyllostachys nigra*.

Izquierda: Como maceta. Centro: Como panel de acabado para paredes y otras superficies. Derecha: Como cañizo.

Fuente: Ned Jaquith (Izquierda) / Noah Bell (Centro) / Caneplex Design.

Los brotes jóvenes de esta especie son comestibles, aunque amargos cuando están crudos. Por ello, deben prepararse hirviéndolos en agua que habrá de ser cambiada tras permanecer 8-10 minutos al fuego. Su sabor y aroma son distintivos y muy valorados, especialmente en China y Japón, donde se consideran un suculento manjar. Los brotes destinados a la alimentación se cosechan en primavera, cuando miden aproximadamente 8 cm por encima de la tierra. Se deben cortar a 5 cm por debajo del nivel del suelo, retorciéndolos sobre la tierra de un lado a otro hasta que se escuche un crujido (Bambú Gigante, s.f.f).

La *Phyllostachys nigra* cuenta con una larga tradición medicinal en China, apareciendo citada por primera vez en un texto médico en torno al año 500 d.C. Sus propiedades terapéuticas se encuentran en las hojas, los tallos, las raíces y la savia que se extrae al prensarla (Iglesias, 2019).

Chang y But, en su libro *“Pharmacology and Applications of Chinese Materia Medica. Volume I”*, recogen una serie de estudios clínicos y farmacológicos modernos sobre las aplicaciones medicinales de algunas especies de bambú, incluida la *Phyllostachys nigra*. Contiene monografías sobre las 127 aplicaciones médicas más comunes del bambú. La información sobre cada especie fue recopilada por un especialista activo en la investigación científica de ese tipo de especie en particular. La descripción de cada fármaco incluye una introducción (origen, carácter y sabor, acciones e indicaciones según la medicina tradicional china, etc.), composición química, farmacología, estudios clínicos, efectos adversos y referencias (Chang & But, 1986).

Del mismo modo, en el año 2012, Miralles García y Campos Vilardebó publicaron el libro “*Materia Médica I: Materiales Académicos de Medicina China*”, que clasifica los componentes naturales medicinales más importantes utilizados en la medicina china tradicional, incluyendo la *Phyllostachys nigra*. El texto contiene una serie de monografías sobre cada componente analizado, detallando su naturaleza, sabor, dosificación, acciones, indicaciones y precauciones de uso. El libro se caracteriza por una precisa secuenciación de los conocimientos, pues los presenta desde la máxima sencillez hasta alcanzar un grado de complejidad considerable (Miralles García & Campos Vilardebó, 2012).



Figura 176. Polvo de extracto de hojas de la *Phyllostachys nigra*.

Las hojas de esta especie (**Figura 176**) son antipiréticas²⁵ y diuréticas²⁶. Se utilizan en el tratamiento de fiebres, para combatir convulsiones infantiles y para detener los vómitos y las hemorragias nasales. Las hojas destinadas a este fin se recogen durante la temporada de crecimiento y se secan para su uso posterior (Bambú Gigante, s.f.f).

En su estudio, Hu y sus colaboradores evaluaron las propiedades antioxidantes y prooxidantes del extracto obtenido a partir de las hojas del bambú *Phyllostachys nigra* var. *Henonis*, determinando que es depurador y que contiene actividad antioxidante (debido a la actividad captadora de los radicales libres) y, en menor medida, prooxidante (a causa del poder reductor de los fenólicos vegetales en presencia de iones de metales en transición) (Hu, *et al.*, 2000).

El jugo de los tallos es antipirético, antitusivo²⁷, expectorante²⁸ y sedante²⁹. Se toma en el tratamiento de infecciones pulmonares que llevan asociadas tos y flema³⁰. Esta savia se obtiene a partir de tallos jóvenes en verano y luego se seca para su posterior uso (Iglesias, 2019).

La epidermis de la corteza del tallo es antiemética³¹, depurativa³² y sedante. Se utiliza en el tratamiento de vómitos, hemorragias nasales, tos, etc. La raíz es astringente³³, antipirética, diurética y estíptica³⁴, siendo utilizada en el tratamiento de la rabia. Las raíces se cosechan en invierno y se secan para su uso posterior (Bambú Gigante, s.f.f).

²⁵ Que disminuye la fiebre.

²⁶ Que ayuda a eliminar la sal (sodio) y el agua del cuerpo.

²⁷ Que sirve para tratar la tos seca irritativa, no productiva.

²⁸ Que provoca o promueve la expulsión de las secreciones bronquiales acumuladas, siendo el tratamiento habitual para la tos productiva.

²⁹ Que sirve para calmar a una persona, aliviar la ansiedad o ayudar a una persona a dormir.

³⁰ Cantidad mayor de la normal del moco espeso que elaboran las células que revisten las vías respiratorias superiores y los pulmones.

³¹ Que impide o controla la emesis (vómito), la náusea y la cinetosis (mareo que aparece en los viajes).

³² Que limpia el cuerpo de todas aquellas sustancias que le resultan extrañas, estableciendo un equilibrio corporal.

³³ Que produce desecación y contracción de los tejidos del vientre y dificulta la evacuación de los excrementos.

³⁴ Que retrae los tejidos y puede producir una acción cicatrizante, antiinflamatoria y antihemorrágica.

2.3.4.4. *Dendrocalamus*

El género de bambú *Dendrocalamus* se caracteriza por su similitud con el género *Bambusa*. Se trata de un género de origen asiático tropical, que se encuentra en el continente indio, China y el sudeste asiático (Watson & Dallwitz, 1994). Pese a que existen 88 nombres científicos asociados a especies de esta familia, sólo 51 de ellas están aceptadas. Además, este género contiene las especies más altas de bambú (**Figura 177**), capaces de alcanzar alturas de hasta 45 metros (Bambú Gigante, s.f.c.).

En general, este género presenta tallos frondosos, con culmos de entre 6 y 40 metros de altura y de entre 3 y 30 cm de diámetro externo. Los tallos presentan entre 4 y 20 ramas principales, situadas siempre en los nudos intermedios y superiores (Watson & Dallwitz, 1994). En dichos nudos presentan una rama principal bastante gruesa y otras dos ramas auxiliares, una a cada lado de la principal. Cuando la caña es muy madura, tiende a generar otras cañas auxiliares de inferior diámetro y muy dispares (Bambú Gigante, s.f.c.). Los nudos están desprovistos de vellosidad y las hojas caulinares presentan, según la especie, forma de lanza, ovalada o triangular. Los entrenudos pueden ser huecos o sólidos. Las hojas son anchas y largas. Raramente se produce inflorescencia, pero, cuando ésta aparece, presenta forma de espiguilla hermafrodita, de 8 a 20 mm de larga, normalmente, elíptica, lanceolada u ovalada (Watson & Dallwitz, 1994).



Figura 177. *Dendrocalamus giganteus*.
Fuente: Bambo Seeds Shop.

El género fue descrito por primera vez por Christian Gottfried Daniel Nees von Esenbeck y publicado en el año 1835 en la revista *Linnaea*, volumen 9, número 4, página 476 (Tropicos, s.f.b).



Figura 178. Brotes nuevos de *Dendrocalamus giganteus*.
Fuente: Mathieu Gilard.

Este género se caracteriza por tener un crecimiento agrupado, ya que el rizoma permanece estable y no se expande lejos de donde fue plantado, sino que da lugar a cañas que crecen pegadas unas a otras conformando un grupo compacto (**Figura 178**). Por ello, se considera un género no invasivo (Bambú Gigante, s.f.c.). En un clima tropical óptimo, los culmos pueden llegar a crecer hasta 24 cm en 24 horas, alcanzando alturas de más de 40 m y diámetros de más de 30 cm (Bibiloni, 2015).

En condiciones óptimas de cultivo, los *Dendrocalamus* suelen tardar 5 años en desarrollarse completamente y alcanzar su fase adulta. No obstante, su madera es aprovechable desde el tercer año. En su época de crecimiento, se puede observar cómo los pinchos que algunas variedades presentan en los nudos se ablandan para convertirse en nuevas ramas. En España, se puede cultivar sin problema en varias regiones de la costa y/o en las que se alcanzan altas temperaturas (Bambú Gigante, s.f.c.).

El *Dendrocalamus*, en comparación con el resto de géneros de bambú, es de los que presentan un mejor cultivo por semillas (Figura 179). Para garantizar una buena germinación es recomendable quitarles la cáscara, meterlas en un vaso de agua caliente con una gota de lavavajillas y tapar el vaso con papel de aluminio. Una vez que las semillas comiencen a germinar, se trasladan a un macetero con sustrato algo arenoso y se sitúa éste en una zona cálida a la sombra, preferiblemente cerca de una fuente constante de calor. Aproximadamente a los 4 meses, las plantas pueden ser sembradas en suelo sin problema (Semillas Únicas, s.f.c). Puede cultivarse de por vida en maceteros o jardineras, pero, al igual que sucede con la *Phyllotachys*, su crecimiento se limitará al espacio disponible. Además, es recomendable emplear recipientes de piedra, ya que sus fuertes rizomas podrían dañar contenedores de plástico o madera (Bambú Gigante, s.f.c.).



Figura 179. Semillas de *Dendrocalamus giganteus*.
Fuente: Bambú Gigante.



Figura 180. Platos biodegradables fabricados con hojas caulinares de *Dendrocalamus*.
Fuente: Argentina Forestal.

A menudo se emplea con finalidad ornamental o como separación física cuando es cultivado en suelo. Además, los brotes de *Dendrocalamus* son comestibles hasta alcanzar una altura de 30 cm. El único inconveniente es su riqueza en compuestos de cianuro altamente tóxicos en crudo, por lo que es necesario cocerlos dos horas para hacerlos desaparecer (Semillas Únicas, s.f.c). Una vez cortado y tratado adecuadamente, puede emplearse en la construcción de casas, andamios y muebles gracias a la extrema

dureza y resistencia que le proporcionan los cristales de sílice que conforman parte de sus tejidos. Dado que presenta nudos de entre 30 y 40 cm, en algunos países incluso se emplea para fabricar cubos con los que transportar agua (Bambú Gigante, s.f.c.).

La Tabla 11 recoge los valores de las principales características físico-mecánicas calculados por diferentes autores para la especie *Dendrocalamus asper*, la más empleada en construcción dentro del género *Dendrocalamus*.

Tabla 11. Valores de las principales características físico-mecánicas de la especie *Dendrocalamus asper*.

Especie	Mínimo	Máximo	Autor de la investigación
Peso específico del bambú seco (kg/m³)			
<i>Dendrocalamus asper</i>	560	700	Surjokusumo y Nugroho 1995
Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Dendrocalamus asper</i>	138.0	220.3	Surjokusumo y Nugroho 1995
Resistencia a cortante del bambú seco (MPa)			
<i>Dendrocalamus asper</i>	11.20	12.52	Surjokusumo y Nugroho 1995
Módulo de elasticidad del bambú en flexión estática (GPa)			
<i>Dendrocalamus asper</i>	3.4	4.6	Subyakto 1995

Comparando estos datos con los de las diferentes especies de los géneros *Guadua* y *Bambusa* (recogidos en la **Tabla 9** y en la **Tabla 10**, respectivamente), se observa que la *Dendrocalamus asper* presenta un peso específico menor que el de las *Guaduas*, pero similar al de las *Bambusas*.

En cuanto a la resistencia a tracción paralela a las fibras, la *Dendrocalamus asper* es la especie que presenta el mayor valor máximo, superando a las especies más resistentes tanto del género *Guadua* (*Guadua angustifolia*, con aproximadamente 190 MPa) como del género *Bambusa* (*Bambusa vulgaris Vittata*, con 141 MPa).

En relación al esfuerzo cortante, la *Dendrocalamus asper* muestra una resistencia superior al resto de especies analizadas, con un valor máximo que duplica al de la *Bambusa blumeana* (5 MPa), pero cercano al de la *Guadua aculeata* (11.60 MPa).

Por último, como ya se comentó anteriormente en esta Tesis Doctoral, el módulo de elasticidad de la *Dendrocalamus asper* es inferior al del resto de especies estudiadas por los distintos autores, ya que las especies del género *Guadua* muestran valores de entre 17 y 24 GPa y las del género *Bambusa* de entre 6 y 14 GPa.

Por lo tanto, se observa que la *Dendrocalamus asper* puede ser empleada en el sector de la Construcción con carácter resistente en determinadas circunstancias, pues tiene una excelente resistencia a tracción, aunque su uso es menos aconsejable que el de la especie *Guadua angustifolia*, pues su módulo de elasticidad es notablemente menor. Además, resulta evidente que es necesario analizar en mayor profundidad este género, evaluando experimentalmente esta y otras especies del mismo.

- ***Dendrocalamus asper***

La especie *Dendrocalamus asper* fue descrita por primera vez en el año 1927 por el biólogo y botánico neerlandés Cornelis Andries Backer, que la publicó en el volumen 1 de *Nuttige Planten van Nederlandsch-Indië*, en la página 301.

Denominado vulgarmente como “Bambú gigante” o “Bambú dulce”, la especie *Dendrocalamus asper* alcanza un tamaño de 15-30 metros de altura, con entrenudos de 20-50 cm de longitud y con diámetros de 8-20 cm (Heyne, 2010). Esta especie se encuentra de forma natural en China, Indonesia, Laos, Malasia, Myanmar, Filipinas y Tailandia, aunque su cultivo se ha en numerosos países africanos como Ghana, Benín, República Democrática del Congo, Kenia y Madagascar (Brink, 2008). Dado que no se extiende más allá de 10 metros respecto al punto en que fue plantada, no se considera una especie invasiva (Montero, 2020). La especie *Dendrocalamus asper* posee un rizoma paquimorfo corto y grueso (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.), mientras que sus culmos son erectos con punta pendular, con un espesor de pared de 5-20 mm y, aunque suelen ser huecos, algunas veces son casi sólidos en la base (Brink, 2008). Como se aprecia en la **Figura 181**, cuando es joven, los culmos son de color verde pálido y sus nudos están cubiertos con vellosidades cortas de color marrón, las cuales pierde al envejecer, adquiriendo las cañas progresivamente un color marrón café (Heyne, 2010).



Figura 181. Bosque de bambú de la especie *Dendrocalamus asper*.

Fuente: Kana Oka.

Habitualmente, presenta ramas a partir del noveno nudo hacia arriba, las ramas de los nudos superiores en ángulos hacia arriba y las de los inferiores en ángulos hacia abajo. Cada nudo cuenta con una rama principal y varias ramas secundarias. Los nudos inferiores presentan además raíces aéreas. Las hojas de sus ramas son alternas, de un intenso color verde oscuro y tienen forma lanceolada, llegando a medir 40 cm x 10 cm (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.).



Figura 182. Hoja caulinar de *Dendrocalamus asper*.

Sus hojas caulinares, que cubren el tercio inferior del culmo, son coriáceas³⁵ y de color verde claro (Heyne, 2010). En la base, la hoja caulinar es ancha y corta, y en el ápice, larga y más delgada, con la punta redondeada. Pueden llegar a presentar superficies de 50 cm x 25 cm, con vellosidades urticantes de color marrón (Brink, 2008). La **Figura 182** muestra una hoja caulinar.

Los brotes de *Dendrocalamus asper* normalmente alcanzan su altura máxima en un año, aunque pueden crecer ligeramente más en temporadas de lluvias posteriores. Una vez que el tallo alcanza su altura máxima, las ramas laterales se desarrollan. Un tallo madura en 3-4 años, pudiendo producir varios brotes nuevos cada año. Los tallos producidos en años posteriores son más grandes que los producidos antes. No obstante, los diámetros máximos de los tallos se alcanzan 5-6 años después de la siembra del brote original (Brink, 2008).

El ciclo de floración de esta especie sucede una vez cada 60-120 años. Además, es mococárpica³⁶ y florece casi simultáneamente en todo el mundo (Montero, 2020). No obstante, esto no significa que todos los especímenes florezcan a la vez, sino que el proceso comienza con una floración esporádica intensiva durante 2-3 años, que aumenta progresivamente, lo que resulta en la floración de todos los grupos en un periodo de 5 años (Bambú Gigante, s.f.d.). Por lo tanto, la multiplicación sexual es rara y la variabilidad genética es escasa, aunque la especie está muy extendida por división vegetativa (Montero, 2020). Como se aprecia en la **Figura 183**, la inflorescencia tiene lugar en ramas sin hojas, con racimos de espiguillas en los nudos. Dichas espiguillas son elipsoides, ligeramente aplanadas lateralmente y con vellosidades cortas. Nunca llega a desarrollar fruto (Brink, 2008).



Figura 183. Floración de la especie *Dendrocalamus asper*.
Fuente: Villa Bamboo Perú.

El proceso de crecimiento total de la planta desde su germinación hasta la cosecha puede durar entre 5 y 7 años, tomando el color marrón que se observa en la **Figura 184** (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). Crece en laderas de colinas, barrancos y llanuras aluviales³⁷ desde 0 hasta 1500 metros sobre el nivel del mar, aunque prospera mejor a 400-500 m de altitud, con una precipitación anual de 2400 mm aproximadamente. Prefiere una humedad relativa baja y temperaturas medias anuales entre 20°C y 30°C, aunque puede soportar temperaturas extremas (tan bajas como -4°C y tan altas como 45°C). La precipitación anual óptima es de 1000 a 3000 mm, con 300 mm por mes durante la temporada de crecimiento (Bambú Gigante, s.f.d.). Durante los dos primeros años, se debe asegurar un abastecimiento constante de agua. Pasado ese tiempo, el agua no es importante durante la época invernal, ya

³⁵ Que tiene el aspecto y el tacto semejantes a los del cuero.

³⁶ Que presenta un único período reproductivo antes de la muerte.

³⁷ Llanuras que se han formado a partir de materiales arrastrados y depositados por corrientes de agua.

que el bambú permanecerá en estado de reposo. La época previa a la brotación es la más importante, ya que es cuando se activan las yemas subterráneas que establecerán la productividad de la temporada entrante y, por lo tanto, hay que proporcionar a la plantación suficiente agua para obtener un rendimiento adecuado. En brotación la falta de agua puede provocar que los brotes se sequen, mientras que en la fase de crecimiento el bambú puede realizar una autorregulación hídrica en épocas de sequía (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). La **Figura 185** muestra un brote joven de *Dendrocalamus asper*.

El *Dendrocalamus asper* prefiere los suelos de texturas franco-arenosas hasta franco-arcillosas, los cuales suministran una aireación y permeabilidad adecuadas para un óptimo crecimiento de las raíces. Suelos con texturas más finas o pesadas, si bien retienen más el agua, presentan las desventajas de un menor drenaje, infiltración lenta y escasa aireación, perjudicando gravemente la brotación, ya que las raíces y rizomas del bambú son sensibles a la falta de oxígeno en el suelo. Sin embargo, la profundidad del suelo no suele ser una característica crítica (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). El *Dendrocalamus asper* no tolera bien la salinidad, por lo que los valores de conductividad eléctrica del suelo deben ser menores a 1.25 dS/m. Los valores de pH de suelo recomendables varían entre moderadamente ácidos (pH 5.5) a neutros (pH 7), siendo óptimos aquellos levemente ácidos (pH 6.5 - 6.8). Los suelos con pH menores a 5.5 (suelos ácidos) son desaconsejables. Suelos con pH mayores a 7.5 (suelos alcalinos) deben ser acondicionados (Bambú Gigante, s.f.d.).



Figura 185. Brote joven de *Dendrocalamus asper*.
Fuente: Steven Starnes.

Los métodos de reproducción asexual más empleados son: por rizomas, por semillas, por esquejes y mediante ramas laterales enterradas en el terreno (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). Para su propagación rápida, se emplean segmentos del culmo que contengan algún nudo con yemas axilares³⁸ (como en el ejemplo mostrado en la **Figura 186**), los cuales se cultivan en vivero hasta que producen raíces, momento en que se plantan en el campo antes o durante la primera mitad de la temporada de lluvias. Es aconsejable plantarlos en huecos que contengan una mezcla de estiércol y fertilizante químico, a distancias de 5-10 m x 5-10 m, con riego y deshierbe regulares durante el período de crecimiento (Brink, 2008). Los brotes jóvenes se recolectan durante la temporada de lluvias, mientras que los culmos se cosechan preferiblemente en la estación seca, ya que presentan menos contenido de humedad. En función de su uso, los culmos pueden ser recolectados con entre 5-8 años de edad (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.).



Figura 184. Culmo adulto de *Dendrocalamus asper*.
Fuente: Bamboo Land Nursery and Parklands.

Una vez cosechadas, las cañas pueden ser almacenadas al aire libre, en almacenes o en agua, aunque no es recomendable dejarlas a la intemperie sin un tratamiento previo (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). Para evitar el ataque de los insectos, las cañas suelen ser sumergidas en agua o barro para disminuir su contenido de

³⁸ Brote embrionario localizado en la axila de una hoja. Tiene el potencial de permitir la reproducción de la planta.

almidón y azúcar. No obstante, la mejor solución es emplear tratamientos con soluciones químicas que reemplazan la savia por productos químicos a base de boro (Brink, 2008).



Figura 186. Reproducción de la especie *Dendrocalamus asper* mediante la siembra de una sección del culmo.
Fuente: Fundación AVSI.

La especie *Dendrocalamus asper* tiene potencial como alternativa a la madera y se utiliza como material de construcción con carácter estructural en casas y puentes (**Figura 187**). Para ello, es necesaria una protección eficaz contra el ataque de insectos xilófagos (Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.). También se usa para hacer tableros



Figura 187. Estructura fabricada con *Dendrocalamus asper*.
Fuente: Forestal Maderero.

laminados, muebles, instrumentos musicales, palillos, utensilios domésticos y artesanías. Los culmos jóvenes sirven como soporte para antenas de TV y como estabilizadores de barcos de pesca, mientras que los entrenudos superiores se emplean como recipientes y ollas para cocinar (Brink, 2008). Además, es utilizado en la industria farmacéutica y puede servir como combustible y para la fabricación de papel. Por último, hay que destacar que, debido a que sus raíces y brotes jóvenes tienen un sabor dulce muy agradable, se emplean en la alimentación humana como un vegetal delicioso (Bambú Gigante, s.f.d.).

2.3.4.5. *Pseudosasa*

El género *Pseudosasa* está conformado por especies pequeñas y medianas de bambú pertenecientes a la familia de las *poáceas* (gramíneas) y que, usualmente, presentan una única rama en cada nudo (Cabi & Doğan, 2012). Su porte es generalmente muy denso y poseen culmos finos y hojas anchas. Dado que tienden a ser erectos y poco rastreros, su crecimiento y expansión son fáciles de controlar.

Este género es originario del este de Asia (principalmente China, Japón, Corea y Vietnam), con unas pocas especies naturalizadas con moderación en Europa occidental, el norte de África, América del Norte y Nueva Zelanda (Makino, 1925).

La *Pseudosasa* comprende 68 especies descritas, de las cuales sólo 20 están aceptadas (Clayton & Renvoize, 1999). La *Pseudosasa* fue descrita por Makino ex Nakai y publicada en el año 1925 en el *Journal of the Arnold Arboretum*, volumen 6, número 3, página 150 (Edgar & Connor, 2000). El género *Pseudosasa* recibió su nombre debido a su parecido con el género *Sasa* (Cabi & Doğan, 2012). La especie más conocida de este género es la *Pseudosasa japónica* (**Figura 188**).



Figura 188. *Pseudosasa japónica*.
Fuente: Wikipedia.

- ***Pseudosasa japónica***

La especie de bambú *Pseudosasa japónica*, llamada también “Bambú japonés”, “Bambú flecha”, “Cebolla verde”, “Bambú metake” o “Bambú yadake”, es una gramínea de la subfamilia de las *Bambusoideae*, originaria del este de Asia, concretamente de las áreas templadas de Corea y Japón (Pérez, 2013).

La *Pseudosasa japónica* fue descrita por primera vez por Makino ex Nakai y publicada en el año 1920 en *Journal of Japanese Botany*, volumen 2, número 4, página 15. Recibe el nombre de *Pseudosasa* por su parecido al género *Sasa*, mientras que el epíteto japónica hace referencia a la localización en la que se descubrió, Japón (Flora of China Editorial Committee, 2006). El nombre común "Bambú flecha" se debe a que los samuráis japoneses empleaban la dura y rígida madera de esta especie para fabricar sus flechas.



Figura 189. Detalle de los culmos.
Fuente: Bambú Parque.



Figura 190. Detalle de las hojas.
Fuente: Wikipedia.

Este bambú vigoroso forma matorrales de hasta 6 m de altura con hojas perennes de un color verde oscuro brillantes de entre 25 y 35 cm de largo (RHS, s.f.). Como se aprecia en la **Figura 189**, los culmos tienen hasta 2 cm de diámetro exterior y presentan una única rama por nudo, sólo en los nudos superiores. Sus hojas caulinares, de 30 cm de largo y 2 cm de ancho, son persistentes, de color amarillo-blancuecinos. La inflorescencia, es decir, la forma en que se presentan sus flores, llega hasta los 45 cm y está compuesta por pseudo espiguillas (Judziewicz, *et al.*, 2000). La *Pseudosasa japónica* se vale de anemofilia para polinizar sus flores dotadas de unidades reproductivas hermafroditas (Pérez, 2013). Como puede observarse en la **Figura 190**, las hojas de la *Pseudosasa japónica* son lanceoladas, de un intenso color verde.

Esta especie de bambú es una de las más cultivadas en el mundo, pues se adapta muy bien a casi cualquier hábitat, es relativamente fácil de propagar por clonación y puede cultivarse sin problema en maceteros y jardineras. Fue introducida en Estados Unidos en 1860, donde se cultivan 4 variedades de la especie. Como la mayoría de las *Pseudosasas*, prefiere los climas

fríos. El lugar donde mejor crece (hasta 4 cm al día) es a lo largo de los ríos de Eslovenia y en los bosques cercanos a estos (Hitchcock, 2003).



Figura 191. Usos de la *Pseudosasa japonica*. Izquierda: Como maceta decorativa. Centro: Para luchar contra la erosión de las riberas de los ríos. Derecha: Como pantalla vegetal.

Fuente: Vivai Decandia Giovanni (Izquierda) / Wikipedia (Centro) / Bambú Parque (Derecha).

La especie *Pseudosasa japonica* se desarrolla mejor en suelos con pH desde moderadamente ácido a neutro, pudiendo soportar terrenos pobres en nutrientes. Su parte subterránea crece mejor en suelos con textura franca arenosa o franca arcillosa, ya que estos tienden a mantenerse húmedos. Dado que no tolera bien los encharcamientos, es importante lograr una humedad constante y un buen drenaje en la plantación (Pérez, 2013). Es una especie resistente al frío, ya que aguanta hasta -17.7°C . Además, crece bien a la sombra, en semisombra y a pleno sol, sin que ello repercuta en su correcto desarrollo, y soporta sin problema los vientos marinos, por lo que puede cultivarse en zonas costeras (Dijardín, s.f.).

Debido a que tiende a ser más tolerante a la sombra que otras especies de bambú y a que puede ser cultivado en maceteros, a menudo se emplea la *Pseudosasa japonica* como seto impenetrable, para crear entornos arbolados con una finalidad puramente estética o para aportar algo de intimidad (Dijardín, s.f.), tal y como muestra la **Figura 191**. Una vez recolectado, en Japón es empleado para fabricar canastos, abanicos y en la construcción de viviendas. Además, también cuenta con aplicaciones medicinales, entre las que destacan su uso como antialcohólico, estimulante, tonificante general y vermífugo³⁹. En el ámbito culinario, las semillas de esta especie (**Figura 192**) pueden emplearse como alimento (Pérez, 2013).



Figura 192. Semillas de *Pseudosasa japonica*.

Fuente: Azura Plants, Flower & Tree Seeds.

³⁹ Que mata o expulsa las lombrices intestinales.

2.3.4.6. Tabla-resumen de los géneros de bambú en estudio en España

La **Tabla 12** muestra un resumen comparativo de los distintos géneros de bambú que se están estudiando, actualmente, en España. Se incluye información sobre el lugar de origen de cada uno de ellos, sus características generales, cultivo, reproducción y principales usos.

	Reproducción					Cultivo					Características														
	Por trozos del culmo	Por rizomas	Por chusquines	Por semillas	Por trozos del culmo	Luminosidad	Drenaje	Humedad del suelo	Temperatura	Raíces	Hojas	Ramas	Nudos	Tallo	Diámetro del culmo	Altura	Lugar de origen								
	GUADUA					BAMBUA					PHYLLOSTACHYS					DENDROCALAMUS					PSEUDOSASA				
	América del Sur					Sureste asiático, África y América del Sur					Este de Asia					Sureste asiático					Este de Asia				
	20-30 m					10-15 m					5-15 m					20-30 m					5-10 m				
	10-20 cm					5-12 cm					2,5-15 cm					15-25 cm					2-4 cm				
	Muy recto					Recto					Recto					Recto					Péndulo				
	Prominentes Con vellosidad Sin raíces aéreas Con espinas					Prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espinas					Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espinas					Prominentes Con vellosidad Con raíces aéreas Sin espinas					Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espinas				
	Varias por nudo					1 principal y varias secundarias por nudo					2 ramas por nudo					1 rama principal y varias secundarias por nudo					Varias por nudo				
	Lanceoladas Largas No alternas					Lanceoladas Largas No alternas					Lanceoladas Pequeñas No alternas					Lanceoladas, elípticas u ovaladas Largas Alternas					Lanceoladas Pequeñas y anchas No alternas				
	Agrupadas					Agrupadas					No agrupadas					Agrupadas					No agrupadas				
	17-26°C					Hasta 0°C					Hasta -20°C					20-30°C					Hasta -15°C				
	Buena					Buena					Indiferente					Indiferente					Buena				
	Bueno					Indiferente					Bueno					Indiferente					Bueno				
	Sol directo					Sol directo					Sol directo					Sol directo					Sol directo				
	Semisombra					Semisombra					Sombra					Semisombra					Semisombra				
	Muy mala					Variable					Buena					Mala					Buena				
	Muy buena					Buena					Regular					Buena					Regular				
	Buena					Buena					Buena					Buena					Regular				
	Buena					Buena					Buena					Buena					Regular				
	Construcción Ornamental Artesanías Mobiliario					Ornamental Artesanías Mobiliario Culinario Medicinal					Ornamental Artesanías Mobiliario Culinario Medicinal					Construcción Ornamental Artesanías Mobiliario Culinario Medicinal					Ornamental Artesanías Mobiliario Culinario Medicinal				
	Mejora de suelos Aplicaciones agrícolas					Papel, textil y biomasa Mejora de suelos Aplicaciones agrícolas					-					Papel, textil y biomasa					-				

Tabla 12. Resumen comparativo de los géneros de bambú en estudio en España

Observando la **Tabla 12**, se aprecia que los géneros que mayor altura y diámetro tienen son *Dendrocalamus* y *Guadua*, presentando además nudos prominentes con vellosidad. En cambio, los géneros *Phyllostachys* y *Pseudosasa* tienen la altura y el diámetro más pequeños, sus nudos son poco prominentes y no tienen vellosidades, raíces aéreas ni espinas.

Pseudosasa es el único género que no tiene un culmo recto, sino pendular. Respecto a las ramas, todos cuentan con, al menos, dos ramas por nudo y sus hojas son lanceoladas. Mientras que los géneros con mayores dimensiones (*Dendrocalamus*, *Guadua* y *Bambusa*) tienen raíces agrupadas y hojas largas, *Phyllostachys* y *Pseudosasa* presentan raíces no agrupadas y hojas pequeñas y anchas.

En cuanto a la temperatura adecuada para su cultivo, *Dendrocalamus* y *Guadua* requieren temperaturas cálidas, mientras que *Bambusa* aguanta climas fríos, siempre que no bajen de los 0°C. Sólo *Phyllostachys* y *Pseudosasa* soportan sin problemas temperaturas negativas.

En general, un suelo con buena humedad y drenaje propicia el desarrollo óptimo del bambú. Todos los géneros analizados crecen bien con sol directo y en semisombra, pero sólo *Phyllostachys*, *Dendrocalamus* y *Pseudosasa* crecen a la sombra.

Menos el género *Pseudosasa*, todos los demás se reproducen bien mediante chusquines, rizomas y trozos del culmo. En cambio, la reproducción por semillas funciona bien para los géneros *Pseudosasa* y *Phyllostachys*, mal para *Dendrocalamus* y *Guadua*, y presenta un funcionamiento variable para el género *Bambusa*, pues depende mucho de la especie en concreto que se esté analizando.

Todos los géneros se emplean con finalidad ornamental, así como en la fabricación de muebles y artesanías. *Guadua* es el único que no se emplea ni en el ámbito culinario ni en el medicinal, dado que sus brotes y rizomas son más duros que los del resto y no presentan tantas propiedades beneficiosas. *Dendrocalamus* y *Guadua* se utilizan para construir edificios y estructuras, mientras que *Dendrocalamus* y *Bambusa*, debido a las características de las fibras que componen sus culmos, son idóneos para la fabricación de papel, textiles y biomasa. Por último, *Guadua* y *Bambusa* son utilizados en el sector agrícola por sus dimensiones, siendo a menudo empleadas como guías de los cultivos y en la fabricación de vallas y refugios para el ganado. Estos dos géneros son empleados además en la mejora y reparación de suelos debido a su capacidad para controlar la erosión gracias a su complejo sistema de raíces, que retiene el suelo y previene que sea arrastrado por las corrientes de agua.

En resumen, en lo que ha dimensiones se refiere, hay dos géneros grandes (*Dendrocalamus* y *Guadua*), uno mediano (*Bambusa*) y dos pequeños (*Phyllostachys* y *Pseudosasa*), todos ellos con culmos rectos, varias ramas por nudo y hojas lanceoladas. En relación a su cultivo, todos se reproducen bien por chusquines, rizomas y trozos del culmo, prefiriendo un clima cálido y un suelo húmedo, bien drenado y situado a pleno sol o en semisombra. Los usos difieren según el género, pero todos pueden emplearse con finalidad ornamental y en la elaboración de muebles y artesanías. Además, excepto la *Guadua*, todos tienen uso culinario y medicinal.

Analizando su posible cultivo en España, se evidencia que es preferible no cultivar los géneros *Guadua*, *Bambusa* y *Dendrocalamus* en zonas en las que la temperatura descienda de los 0°C, lo que hace preferible su cultivo en la costa, donde, además, la humedad ambiental es mayor. En cambio, *Phyllostachys* y *Pseudosasa* pueden ser cultivados sin problema en las zonas del interior del país, siempre y cuando dispongan de un suelo húmedo y bien drenado.

2.3.4.7. Tabla-resumen de las especies de bambú en estudio en España

Reproducción	Cultivo		Características															
	Por semillas	Por rizomas	Lugar de origen	Altura	Diametro del culmo	Tallo	Nudos	Ramas	Hojas	Raíces	Temperatura	Humedad	Drenaje	Sensible a	Tolera	Prefiere un suelo	Luminosidad	Usos
Por trozos del culmo			América del Sur	20-30 m	25 cm	Muy recto	Prominentes Con vellosidad Sin raíces aéreas Con espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Largas No alternas	Agrupadas	17-26°C	Buena	Indiferente	-	Suelos pendientes	Rico en nutrientes	Sol directo Semi-sombra	Construcción Ornamental Artesanías Muebles Muebles
			Taiwán y sur de China	15-20 m	10 cm	Muy recto	Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Largas No alternas	Agrupadas	Hasta -7°C	Indiferente	Indiferente	La salinidad	-	Franco-arenoso y con pH levemente ácido	Sol directo Semi-sombra	Ornamental Artesanías Muebles Culinar
		China y Japón	10-15 m	5,5-8 cm	Ligeramente pendulo	Prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	1 principal y varias secundarias	Lanceoladas Largas No alternas	Agrupadas	Hasta -3°C	Buena	Indiferente	El exceso de caliza	-	Fértil	Sol directo Semi-sombra	Ornamental Artesanías Muebles Culinar Medicinal	
		Sur de China y Madagascar	15 m	8-12 cm	Recto	Prominentes Sin vellosidad Con raíces aéreas	1 principal y varias secundarias	Lanceoladas Largas No alternas	Agrupadas	Hasta -3°C	Buena	Buena	-	-	Muy mala	Sol directo	-	Ornamental Artesanías Muebles Culinar Medicinal
		China	5-10 m	2,5-7 cm	Recto	Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Pequeñas No alternas	No agrupadas	Hasta -23°C	Buena	Indiferente	El exceso de caliza	-	Sol directo Semi-sombra Sombra	-	Ornamental Artesanías Muebles Culinar	
		China	15-28 m	8-20 cm	Recto	Poco prominentes Con vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Pequeñas No alternas	No agrupadas	Hasta -20°C	Indiferente	Indiferente	La salinidad	-	Sol directo	-	Ornamental Artesanías Muebles Culinar	
		China y Taiwán	10-20 m	2,5-5 cm	Pendulo	Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Largas Alternas	No agrupadas	Hasta -20°C	Indiferente	Buena	Los suelos pantanosos	-	Suelto	Sol directo Semi-sombra Sombra	Ornamental Artesanías Muebles Culinar Medicinal	
		Sureste asiático	15-30 m	8-20 cm	Recto	Prominentes Con vellosidad Con raíces aéreas Sin espigas	1 principal y varias secundarias	Lanceoladas Largas Alternas	Agrupadas	20-30°C	Indiferente	Indiferente	La salinidad y la falta de oxígeno	-	Franco-arenoso y con pH levemente ácido	Sol directo Semi-sombra Sombra	Construcción Ornamental Artesanías Muebles Culinar Medicinal	
		Corea y Japón	6 m	2 cm	Pendulo	Poco prominentes Sin vellosidad Sin raíces aéreas Sin espigas	Varias por nudo	Lanceoladas Pequeñas No alternas	No agrupadas	Hasta -17°C	Buena	Buena	-	La salinidad y la falta de nutrientes	Franco-arcilloso y con pH moderadamente ácido	Sol directo Semi-sombra Sombra	Ornamental Artesanías Muebles Culinar Medicinal	

Tabla 13. Resumen comparativo de las especies de bambú en estudio en España

La **Tabla 13** muestra un resumen comparativo de las distintas especies de bambú que se están estudiando, actualmente, en España. Se incluye información sobre el lugar de origen de cada una de ellas, sus características generales, cultivo, reproducción y principales usos.

En primer lugar, se observa que únicamente la *Guadua angustifolia Kunth* es originaria de América del Sur, mientras que el resto de especies en estudio proceden de Asia, lo que, en muchos casos, incluye a China como país de origen.

Por sus dimensiones, las especies pueden clasificarse en tres grupos: grandes (con hasta 30 m de altura y alrededor de 20 cm de diámetro), lo que incluye la *Guadua angustifolia Kunth*, la *Phyllostachys pubescens* y la *Dendrocalamus asper*; pequeñas (con hasta 10 m de altura y diámetro inferiores a 7 cm), donde se incluyen la *Phyllostachys atrovaginata* y la *Pseudosasa japónica*; y medianas (con entre 15 y 20 m de altura), donde se diferencian las de culmo grueso (*Bambusa oldhamii* y *Bambusa vulgaris Vulgaris*, con diámetros de 10-12 cm) de las de culmo delgado (*Bambusa vulgaris Vittata* y *Phyllostachys nigra*, con menos de 8 cm de diámetro).

Todas las especies tienen varias ramas por nudo y presentan hojas lanceoladas que, en el caso de las variedades de *Phyllostachys* y *Pseudosasa*, son pequeñas, mientras que para el resto son largas. Además, únicamente para las especies de estos dos géneros, los nudos son poco prominentes y las raíces no se encuentran agrupadas. Cabe destacar que la *Phyllostachys nigra* y la *Dendrocalamus asper* presentan las hojas en posiciones alternas.

En cuanto a la temperatura adecuada para su cultivo, la *Guadua angustifolia Kunth* y la *Dendrocalamus asper* requieren temperaturas cálidas (17-30°C), mientras que las diferentes especies de *Bambusa* pueden llegar a soportar entre -3 y -7°C y las de *Phyllostachys* y *Pseudosasa* alrededor de -20°C.

Es preferible cultivar el bambú en un suelo con buena humedad y drenaje, aunque la mayoría de ellos pueden crecer en casi cualquier tipo de terreno. No obstante, las condiciones de cultivo afectarán a su desarrollo y rendimiento, por lo que se aconseja plantarlo en suelos fértiles, sueltos y ricos en nutrientes, desde franco-arenosos a franco-arcillosos, con pH levemente ácido. También hay que tener en cuenta que la salinidad del terreno, así como el exceso de caliza o la ausencia de oxígeno en el mismo afectan negativamente al desarrollo de algunas especies de bambú, aunque la *Phyllostachys pubescens* y la *Pseudosasa japónica* soportan bien la salinidad.

La preferencia en cuanto a la exposición solar varía según la especie. La *Bambusa vulgaris Vulgaris* y la *Phyllostachys pubescens* prefieren el sol directo, mientras que la *Bambusa vulgaris Vittata*, la *Bambusa oldhamii* y la *Guadua angustifolia Kunth* pueden cultivarse también en semisombra. El resto de especies estudiadas no tiene problema en crecer incluso a la sombra.

A excepción de la *Pseudosasa japónica*, todas las especies se reproducen bien mediante rizomas y trozos del culmo. La reproducción por chusquines funciona regular para las especies de los géneros *Phyllostachys* y *Pseudosasa*, pero bien para el resto. Por el contrario, la reproducción por semillas funciona bien para las especies de los géneros *Pseudosasa* y *Phyllostachys*, pero mal para el resto, salvo para la *Bambusa vulgaris Vittata*, que es una de las especies de bambú que mejor se reproducen mediante este método.

En relación a los usos del bambú, todas las especies analizadas se emplean con finalidad ornamental y en la fabricación de muebles y artesanías. La *Guadua angustifolia Kunth* es la única que no se utiliza en el ámbito culinario, aunque sí se emplea en el sector de la Construcción, al igual que la *Dendrocalamus asper*. Por sus propiedades beneficiosas para la salud, algunas especies se emplean con fines terapéuticos, mientras que otras se usan en la fabricación de

papel, textiles y biomasa, pues, para estos fines, cuentan con unas fibras y una celulosa de mejor calidad que el resto de especies. Gracias a su capacidad de sujeción del suelo y a sus dimensiones (culmos de hasta 20 m de altura y 10 cm de diámetro), las especies *Guadua angustifolia Kunth* y *Bambusa oldhamii* se utilizan para mejorar y reparar suelos, así como con para distintas finalidades en el sector agrícola: como guía para otros cultivos, para la construcción de vallados y refugios para animales, como tuberías de riego, etc.

Observando en su conjunto todas las propiedades y características de las distintas especies de bambú estudiadas, se comprueba que hay dos grandes grupos: las que pueden cultivarse a la sombra y en zonas donde la temperatura desciende por debajo de los 0°C, y las que no (*Guadua angustifolia Kunth* y *Dendrocalamus asper*), siendo estas últimas las que se utilizan en el sector de la Construcción con finalidad estructural. No obstante, el resto de especies se pueden emplear para fabricar productos derivados aplicables también en edificación, como laminados, composites, tableros de fibras o partículas, etc.

Considerando las características ambientales y climáticas de España, se deduce que las especies de bambú analizadas pueden cultivarse sin problema en el país, siempre y cuando el suelo sea adecuado y dispongan de humedad y sol. Por este motivo, las zonas costeras se presentan como el lugar idóneo donde cultivarlo, especialmente el litoral mediterráneo, pues cuenta con temperaturas medias de alrededor de 22°C en verano e inviernos húmedos y lluviosos con temperaturas suaves.

En el caso de Granada, el clima es aún más adecuado, pues la Costa Tropical de esta provincia cuenta con un microclima subtropical caracterizado por tener una temperatura media de 18°C en invierno y veranos con no más de 25°C y una media de 320 días de sol al año, lo que favorece el crecimiento de numerosas especies tropicales como la papaya, el aguacate, el mango, etc. Además, en la Costa Tropical granadina se cultivaba caña de azúcar (siendo cerrada la última fábrica azucarera del municipio en 2005), cuyas características son muy similares a las del bambú, lo que permite determinar que el cultivo de bambú en la zona sería viable.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

El objetivo del estudio es la determinación de la viabilidad del uso de las especies de bambú *Guadua angustifolia Kunth* y *Bambusa vulgaris Vulgaris* en el sector de la edificación como elementos constructivos de carácter estructural.

Para alcanzar este objetivo, se partió de una búsqueda bibliográfica inicial para conocer mejor el material analizado: el bambú. Conocidas en profundidad las especies objeto de estudio, sus principales usos y sus propiedades particulares, se procedió a realizar ensayos de laboratorio.

En primer lugar, la *Bambusa vulgaris Vulgaris* fue sometida a ensayos de resistencia a tracción paralela a la fibra, acompañados paralelamente de ensayos de emisión acústica.

Posteriormente, se determinaron las características mecánicas de la especie de bambú *Guadua angustifolia Kunth*, realizando para ello ensayos de resistencia a compresión paralela a la fibra, ensayos de resistencia a tracción paralela a la fibra y ensayos de resistencia a flexión.

Se trata por tanto de un estudio de naturaleza intervencionista (es decir, experimental), dado que se han realizado ensayos de laboratorio para evaluar las características del bambú, y comparativo, pues se contrastan los resultados obtenidos para cada especie entre ellos y con respecto a los resultados obtenidos por otros autores. Además, es un estudio prospectivo, puesto que se pretende prever el comportamiento de estas especies de bambú al ser empleadas con carácter estructural en el ámbito constructivo.

Para ello, se elaboraron especímenes normalizados de *Bambusa vulgaris Vulgaris* siguiendo para ello las indicaciones de las normas *ISO 22157-1:2004 - Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Parte 1: Requisitos* e *ISO 22157-2:2004 - Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Parte 2: Manual de Laboratorio*. Estos especímenes fueron sometidos a los ensayos indicados anteriormente, que se describen detalladamente en apartados posteriores de esta Tesis Doctoral.

En el caso de los especímenes de *Guadua angustifolia Kunth*, dado que los ensayos de esta especie fueron realizados en años posteriores a los de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*, la norma utilizada para su elaboración fue la *ISO 22157:2019 – Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los tallos de bambú. Métodos de ensayo*. Esta norma anula a la de 2004 y fue empleada como referencia para la elaboración de los especímenes de *Guadua angustifolia Kunth* ensayados. El proceso se explica con detalle en apartados ulteriores de la presente Tesis Doctoral.

Una vez preparados los especímenes, se realizaron los ensayos indicados, siguiendo para ello las indicaciones de las respectivas normas recién mencionadas. Obtenidos los resultados de los ensayos, estos se procesaron y analizaron, como queda recogido en el apartado 4. RESULTADOS.

Por último, se extrajeron una serie de conclusiones derivadas de la realización de este estudio, las cuales pueden consultarse en el apartado 5. CONCLUSIONES.

3.2. MATERIALES

Según las Naciones Unidas, las ciudades ocupan sólo el 3% de la superficie de la Tierra, pero producen el 75% de las emisiones de carbono, consumen entre el 60% y el 80% de la energía y utilizan más del 60% de los recursos naturales (Naciones Unidas, s.f.). Esta terrible situación exige un cambio de paradigma en el sector de la construcción, aplicando principios de sostenibilidad en los materiales de construcción.

Como ya se ha explicado anteriormente, el bambú es un material renovable, ligero, barato, ampliamente disponible y con excelentes propiedades mecánicas y físicas (Judziewicz, *et al.*, 1999). Además de ser ecológico, este recurso natural crece rápidamente y tiene una alta tasa de secuestro de carbono (Chaowana, *et al.*, 2021). Incluso puede reemplazar algunos materiales convencionales como el acero, el hormigón y la madera en determinadas aplicaciones y circunstancias (Tahmasebinia, *et al.*, 2021).

El bambú en bruto puede considerarse un material compuesto reforzado con fibra, formado por fibras de celulosa longitudinales unidireccionales en el culmo, incrustadas en una matriz de tejido parenquimatoso (lignina) con haces vasculares para el transporte de fluidos. Es decir, el bambú es un compuesto celulósico-fibroso natural cuyas fibras le proporcionan al culmo su fuerza y rigidez. Por lo tanto, la densidad y las propiedades mecánicas mejoran con la edad del culmo, ya que aumenta su contenido de lignina (Li, *et al.*, 2007).

Para la mayoría de las especies, el culmo es hueco y segmentado (Jiang, 2007). En tal caso, los tallos se componen de nudos y entrenudos (espacios huecos) (Parameswaran & Liese, 1976). Los nudos, a su vez, están formados por una cicatriz de la vaina, una cresta nodal y un diafragma (que crece hacia el interior de la caña), que le proporcionan rigidez y protegen los tallos de roturas (Peng, *et al.*, 2014) (Wang, *et al.*, 2013). Los nudos desempeñan un papel en las características mecánicas del bambú (Gauss, *et al.*, 2019), lo que da como resultado un aumento de la rigidez en la ubicación del nudo, sin generar un aumento de la rigidez a nivel global. Además, para ciertos esfuerzos, como las pruebas de tracción paralela a las fibras (Taylor, *et al.*, 2014), la presencia del nudo puede conducir a una disminución de la rigidez global.

Las características físico-mecánicas del bambú son relativamente uniformes a lo largo del culmo (Amada, *et al.*, 1996). Las propiedades mecánicas están muy influenciadas por el contenido de fibra, el diámetro de la fibra y el espesor de la pared del culmo (Janssen, 2000). En particular, la densidad de las fibras aumenta a lo largo de la sección transversal circular del culmo desde la pared interior del mismo (donde las fibras ocupan un volumen de entre el 10% y el 15%, aproximadamente) hasta la pared exterior (donde ocupan alrededor del 60% del volumen). Además, las propiedades mecánicas de la capa exterior son mayores que las de la pared interior, debido a un mayor contenido de sílice. En resumen, la compleja variación de las fibras y vasos en el espesor de la pared del culmo da como resultado una variación significativa de las propiedades mecánicas (Kamruzzaman, *et al.*, 2008).

La **Figura 193**, muestra las partes externas en que se dividen los culmos de bambú (nudos y entrenudos), así como las internas (oquedades y diafragmas). También aparece en ella una sección transversal de bambú, donde se observan las diferencias existentes entre la pared interior y la pared exterior del culmo. Estas diferencias se aprecian aún mejor en la imagen microscópica de la pared del culmo, donde se puede contemplar la diferencia de porcentaje de fibra existente entre la parte externa e interna de la caña, así como los diferentes elementos

que la componen. El detalle exterior del nudo muestra las distintas partes que lo forman (cicatriz de la vaina y cresta nodal).

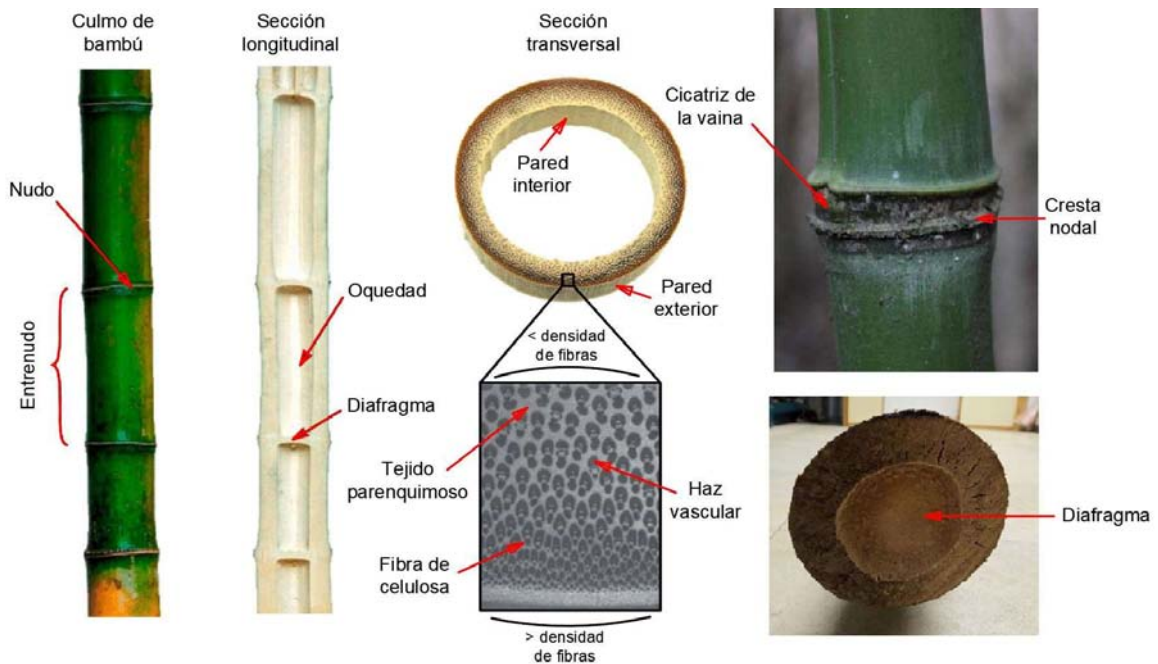


Figura 193. Partes principales del bambú a nivel macroscópico y microscópico.
Fuente: Tarun Gangwar (Culmo y secciones) / Big Plants (Detalle del nudo).

Por último, debe tenerse en cuenta que el bambú es altamente anisotrópico⁴⁰, por lo que su comportamiento mecánico resulta mucho mejor a lo largo de la dirección del culmo que cuando se mide transversalmente (Richard & Harries, 2015).

Para profundizar en el conocimiento de las especies de bambú analizadas y sometidas a ensayos de laboratorio durante el desarrollo de esta Tesis Doctoral, se realiza a continuación un análisis pormenorizado de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* y de la *Guadua angustifolia Kunth*, ampliando así la información aportada hasta ahora sobre ellas y presentando nuevos datos relacionados con su distribución geográfica, sus características generales, su cultivo, sus usos más habituales y sus aplicaciones en el sector de la Construcción, añadiendo además las medidas que deben tomarse para poder emplearlas con seguridad en edificación y obra civil.

Una vez expuesta esta información, se indican los criterios de inclusión y exclusión aplicados en la selección de las muestras, así como las características de las muestras escogidas para cada especie estudiada.

⁴⁰ Dicho de una sustancia o de un cuerpo, que posee propiedades físicas distintas según la dirección en que se mide (RAE, 2014).

3.2.1. *BAMBUSA VULGARIS VULGARIS*

3.2.1.1. Descripción general de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*

- **Definición y distribución**

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* es una especie botánica de la subfamilia de las *Bambusoideae*, perteneciente a la familia de las gramíneas (*Poaceae*) (Nianhe, *et al.*, 2006). Es originaria del sudeste asiático y se encuentra principalmente en China, el Himalaya, Taiwán, Melanesia y el territorio norte de Australia, aunque se ha naturalizado en África, América del Sur y varias islas oceánicas. Pese a que se trata de una planta que se desarrolla naturalmente en climas tropicales, su cultivo se ha podido adaptar a climas templados gracias a una ligera resistencia al frío (Portillo, s.f.). Es una de las especies más expandidas de bambú, como puede apreciarse en la **Figura 194**, que muestra su distribución en el mundo.



Figura 194. Distribución de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* en el mundo.
Fuente: Global Biodiversity Information Facility.

La descripción de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* fue atribuida a Heinrich Adolph Schrader por parte de Johan Wendland en *Collectio Plantarum* 2:26, pl. 47 en 1808 (Tropicos, s.f.a), por lo que esta especie también puede ser denominada *Bambusa vulgaris Schrad. ex J.C. Wendl.*, siendo ambos nombres igual de válidos.

El nombre de esta especie se compone del término "*Bambusa*", que es la forma latinizada del nombre vernáculo malayo "Bambú", y la palabra "*vulgaris*", un epíteto latino que significa "vulgar" o "común" (Watson & Dallwitz, 1994).

- **Características generales**

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* (**Figura 195**) es una planta perenne, rizomatosa, con tallos erectos sutilmente curvados en la parte superior. Sus culmos alcanzan 15 m de altura y 8-12 cm de diámetro externo. Es de un intenso color verde brillante y sus entrenudos tienen 20-45 cm.

Los nudos son prominentes pero estrechos, de color blanco o verde y con numerosas raíces aéreas si se encuentran en la parte inferior del culmo. El espesor de la pared suele medir 8-16 mm (Puccio, s.f.).

A partir de los nudos surgen sus ramas, presentando una principal y varias secundarias en cada nudo. Las ramas son estriadas y en ellas se desarrollan las hojas, que crecen alternas entre sí. Las hojas son lineales-lanceoladas, glabras⁴¹, con un ápice agudo en el extremo y un tacto ligeramente áspero. Habitualmente miden 10-30 cm de longitud y 1.3-2.5 cm de ancho (Plantas y Hongos, s.f.). Las inflorescencias son pseudoespiguillas lanceoladas y bifidas de entre 2 y 3.5 mm de longitud y entre 0.4 y 0.5 mm de ancho, que se presentan en grupos compactos de entre 4 y 12 flores hermafroditas (Nianhe, *et al.*, 2006).



Figura 195. Culmos de *Bambusa vulgaris Vulgaris*.
Fuente: Karl Gercens.

- **Cultivo**

El hábitat de este bambú se encuentra principalmente en las orillas de los ríos, a los lados de las carreteras, tierras baldías y terrenos abiertos, generalmente a bajas altitudes. Crece mejor en condiciones húmedas, pero puede tolerar condiciones desfavorables como bajas temperaturas y sequía (Bissanti, 2020).

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* forma matas más bien abiertas, que se expanden velozmente en los primeros años de implantación, luego crece más lentamente. En la fase juvenil, los culmos están protegidos por hojas caulinares de color marrón amarillento tirando a verde, que presentan vellosidades urticantes y cera de color blanquecino en el punto de conexión con el culmo (Puccio, s.f.), como se aprecia en la **Figura 196**.



Figura 196. Culmo joven aún protegido por las hojas caulinares urticantes que lo envuelven.
Fuente: João Paglione.

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* se adapta a una amplia gama de suelos, aunque crece mejor en suelos y climas húmedos. No obstante, puede resistir hasta -3°C y puede crecer en suelos situados hasta a 1500 msnm, aunque, a mayor altitud, más cortos y delgados se vuelven sus culmos. Además, en caso de sequía extrema, puede llegar a defoliarse por completo (Bissanti, 2020). Por lo tanto, es preferible cultivarla a pleno sol, con un suelo constantemente húmedo y bien drenado, ya que requiere mucha agua para su crecimiento, aunque le perjudican mucho los encharcamientos. Además, puede ser cultivada en maceteros o jardineras, así como en interior siempre y cuando tenga mucha luz (Puccio, s.f.).

Dado que la floración de esta especie sucede raramente y sin formar frutos, su reproducción suele realizarse mediante división de rizomas o por corte de tallos o ramas, siendo la técnica más utilizada la reproducción por esquejes del tallo. Para ello, se emplean porciones del tallo que contengan 2 o 3 nudos, siendo éstas enterradas oblicua o verticalmente sobre un sustrato arenoso a una temperatura de entre 20 y 24°C (Plantukis, s.f.).

⁴¹ Que está desprovisto de pelos y glándulas.

Pese a no ser la forma más sencilla ni habitual, la *Bambusa vulgaris Vulgaris* puede reproducirse de forma sexual. En este caso hay que tener en cuenta que, durante varias décadas, la población completa de un área florecerá simultáneamente, apareciendo más flores en aquellos tallos que crezcan de forma individual alejados del resto de la población (Bissanti, 2020). En la **Figura 197** se aprecian detalladamente las pseudoespiguillas lanceoladas que conforman la inflorescencia de esta especie, las cuales se presentan en grupos compacto de entre 4 y 12 flores.



Figura 197. Flores de *Bambusa vulgaris Vulgaris*.
Fuente: Wendy A. Mustaqim.

- **Usos fuera del sector de la Construcción**



Figura 198. *Bambusa vulgaris Vulgaris* en una jardinera en China.
Fuente: Fuyang Bestop Impex.

El principal uso de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* es ornamental. Ya en el año 1700 se hizo famosa como planta de invernadero, siendo una de las primeras especies de bambú introducidas en Europa y llegando a Hawái en la época del Capitán James Cook⁴² (finales del siglo XVIII), donde se popularizó como planta ornamental. Su cultivo en Estados Unidos y Puerto Rico se debe a que los españoles la introdujeron allí en 1840, siendo posiblemente la primera especie extranjera introducida en los Estados Unidos por los europeos (Bissanti, 2020).

Sus culmos se emplean en la fabricación de empalizadas, instrumentos musicales, artesanías y como entubamientos para el riego. Además, se cultiva en las riberas de los ríos para controlar la erosión y sus tallos pueden ser utilizados como biocombustible (Puccio, s.f.). Además, sus hojas sirven como forraje para los animales, aunque debe evitarse un consumo excesivo de las mismas, ya que se ha comprobado que una gran ingesta de ellas causa trastornos neurológicos en los caballos (Plantas y Hongos, s.f.).

En el sector náutico, los culmos se utilizan para fabricar muchas partes de las embarcaciones, incluidos mástiles, timones, estabilizadores y postes de embarcaciones. En cambio, en el sector de la artesanía (**Figura 199**), se utilizan para fabricar muebles, artículos trenzados (cestos, bolsos y similares), rompevientos, flautas, cañas de pescar, mangos de herramientas, postes, armas, arcos para redes de pesca, chimeneas, barras de destilación, etc. (Bissanti, 2020).



Figura 199. Artesanías realizadas con *Bambusa vulgaris Vulgaris*.
De izquierda a derecha: Bolso. Cestos y canastos. Porta velas y bandeja. Jarra con tapadera.
Fuente: APK Pure.

⁴² James Cook fue un navegante, explorador, cartógrafo y capitán de la Marina Real británica. Cook elaboró mapas detallados de la isla de Terranova antes de realizar tres viajes al Océano Pacífico, durante los cuales estableció el primer contacto registrado de los europeos con la costa oriental de Australia y las islas Hawái, así como la primera circunnavegación de Nueva Zelanda (Villiers, 2021).

Pero sus cañas y hojas también pueden emplearse para obtener fibras de uso textil o pasta de papel, siendo especialmente utilizado para esta finalidad en la India. El papel a base de *Bambusa vulgaris* presenta una resistencia a la rotura excepcional, comparable a la del papel a base de madera blanda (Plantas y Hongos, s.f.). La composición química promedio de la pulpa de papel de esta especie es: celulosa 41-44%, pentosano 21-23%, lignina 26-28%, cenizas 1.7-1.9% y sílice 0.6-0.7%. Además, también puede emplearse para fabricar tableros de partículas y papel de embalaje flexible (Bissanti, 2020).



Figura 200. Brote recién nacido de *B. Vulgaris*.
Fuente: Apuama.

En el sector culinario, los brotes jóvenes (**Figura 200**), cocidos o en salmuera, son considerados una auténtica delicia muy popular en toda Asia (Plantas y Hongos, s.f.). Además, debido a su elevado contenido de azúcar, la *Bambusa vulgaris* puede emplearse para producir bebidas alcohólicas y/o bebidas refrescantes, como la fabricada en Mauricio al mezclar una decocción obtenida de los brotes jóvenes con lágrimas de Job⁴³ (*Coix lacryma-jobi*) (Bissanti, 2020).

La **Figura 201** muestra diferentes preparaciones culinarias de brotes jóvenes de *Bambusa vulgaris* elaboradas y vendidas en las calles de Hanói, la capital de Vietnam.

Una porción de 100 gramos de brotes jóvenes de tallo verde tiene: 90 g de agua, 2.6 g de proteína, 4.1 g de grasa, 0.4 g de carbohidratos digeribles, 1.1 g de fibra dietética insoluble, 22.8 mg de calcio, 37 mg de fósforo, 1 mg de hierro y 3.1 mg de ácido ascórbico. Una porción de 100 gramos de brotes jóvenes de tallo amarillo tiene: 88 g de agua, 1.8 g de proteína, 7.2 g de grasa, 0.0 g de carbohidratos digeribles, 1.2 g de fibra dietética insoluble, 28.6 mg de calcio, 27.5 mg de fósforo y 1.4 mg de hierro (Bissanti, 2020).

Sin embargo, en la *Bambusa vulgaris* (al igual que en el resto de especies *Bambusa vulgaris*) se han identificado glucósidos cianogénicos⁴⁴ y sustancias derivadas de estos que resultan altamente tóxicas para el ser humano cuando se consumen como alimento o como complemento alimenticio, pues funcionan como un inhibidor enzimático según la Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, 2012). La dosis letal para los humanos es de aproximadamente 50-60 mg, pero, afortunadamente, se degrada rápidamente en agua hirviendo. Una dosis de 25 mg de glucósido cianogénico administrado a ratas (100-120 g de peso corporal) causó signos clínicos de toxicidad, incluyendo apnea⁴⁵, ataxia⁴⁶ y



Figura 201. Diferentes preparaciones culinarias de *Bambusa vulgaris*.
Fuente: Herbarium.

⁴³ La lágrima de Job (también llamada lágrima de Moisés, lágrima de San Pedro, adlay o adlai) es una especie de las gramíneas, una planta alta, tropical, de la familia de las *Poaceae*, nativa del Este Asiático y de Malasia, cultivada en jardines como una planta anual y naturalizada en América tropical.

⁴⁴ Los glucósidos cianogénicos son toxinas vegetales derivadas de aminoácidos producidas como metabolitos secundarios de las plantas con función de defensa. La mayoría de las plantas que los producen son consumidas por los humanos y, al ser ingeridas, se hidrolizan liberando dichos glucósidos cianogénicos, liberando a su vez cianuro de hidrógeno, que produce daño tisular (Hegnauer, 1997).

⁴⁵ La apnea se define como una pausa de la respiración de, al menos, 10 segundos.

⁴⁶ La ataxia es un trastorno que consiste en la pérdida o disminución de la capacidad de coordinación de los movimientos de la persona, pero sin llegar a la paralización total de los músculos.

paresia⁴⁷. Del mismo modo, algunos caballos del estado de Pará (Brasil) fueron diagnosticados con signos clínicos de somnolencia y ataxia severa después de haber ingerido *Bambusa vulgaris* (Bissanti, 2020).

Además, este bambú se usa en muchas medicinas tradicionales de toda Asia y otros países. En Java (una isla de Indonesia), el agua almacenada en tubos de bambú se usa como cura para varias enfermedades. En el Congo, sus hojas se usan como parte del tratamiento del sarampión. En Nigeria, se toma una infusión de hojas maceradas contra enfermedades de transmisión sexual y como abortivo, habiéndose demostrado que éste último remedio funciona con conejos (Bissanti, 2020).

Como ya se comentó en apartados anteriores, en etnobotánica⁴⁸, se han utilizado diversas partes de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* por sus supuestas propiedades abortivas, afrodisiacas, anticoagulantes, emenagogas⁴⁹, insecticidas y depurativas. De este modo, se conoce su uso en el tratamiento de la malaria, la fiebre palúdica, diversas parasitosis, la disentería, erisipela, ictericia, neumonía, gripe y catarro, entre otras enfermedades (Johnson, 1999). No obstante, presenta bajos niveles de inhibición frente a los parásitos responsables de la malaria, por lo que no se considera especialmente eficaz en el tratamiento de esta enfermedad (Rodríguez-Pérez, *et al.*, 2006). Por el contrario, se he demostrado su efectividad contra el *Bacillus subtilis*, el *Micrococcus pyogenes*, el *Staphylococcus aureus* y la *Salmonella Typhi*, lo que significa que tiene propiedades ecbólicas⁵⁰ y capacidad para acelerar la salida del feto en partos (Das, *et al.*, 2012).



Figura 202. Suplemento dietético alto en sílice a base de extracto de *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Fuente: Farmacia Serra.

Además, el extracto de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* es alto en sílice, por lo que las farmacéuticas han desarrollado suplementos dietéticos en cápsulas como el mostrado en la **Figura 202**. Este extracto se obtiene a partir del tabashir⁵¹ de los nudos de esta especie y supone un aporte del 70% de la sílice diaria necesaria para el organismo humano (Farmacia Serra Mandri, s.f.).

Por último, esta especie es empleada también en el ámbito de la cosmética. La savia obtenida de las hojas tiene propiedades emolientes⁵², mientras que el extracto contiene principalmente glucósidos, aminoácidos, ácidos fenólicos y flavonas. Éstas últimas son antioxidantes naturales y ayudan a la piel a recuperarse del estrés oxidativo que ha sufre a diario. Los glucósidos también son astringentes⁵³ leves, por lo que ejercen un suave efecto exfoliante. Tiene propiedades calmantes de la piel y mantiene la humedad. Por lo tanto, hace que la piel se vuelva opaca y seca, húmeda y suave (Michalun & Dinardo, 2014).

⁴⁷ La paresia es la disminución de la fuerza en los músculos con limitación del rango de movimientos voluntarios.

⁴⁸ Estudio de las relaciones que existen entre las plantas y los grupos locales, cómo se relacionan y cómo influyen las plantas en el desarrollo de las culturas.

⁴⁹ Que provoca o favorece la menstruación.

⁵⁰ Vocablo obsoleto en medicina que hace referencia a cualquier técnica o procedimiento adecuado, que tiene la virtud o eficacia para acelerar la salida del feto en los partos laboriosos o complicados y que no representa ningún riesgo.

⁵¹ El tabashir, también llamado azúcar de bambú, es una sustancia blanca translúcida, compuesta principalmente de sílice y agua con trazas de cal y potasa, obtenida de las uniones nodales de algunas especies de bambú (Strong, 1907).

⁵² Que suaviza, ablanda y aumenta el grado de humedad, especialmente en la piel.

⁵³ Que produce desecación y contracción en los tejidos orgánicos.

- **Preparación de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* para su uso en construcción**

Hasta hace relativamente poco, la *Bambusa vulgaris Vulgaris* no se consideraba apta para su uso en construcción en su estado natural dada la geometría no regular sus cañas (EcoHabitar, s.f.), ya que no son rectas, no son fáciles de dividir y no son flexibles, pues cuentan con paredes gruesas e inicialmente robustas (Bissanti, 2020), como se aprecia en la **Figura 203**.



Figura 203. Sección de una caña de *Bambusa vulgaris Vulgaris* salvaje donde se aprecia el grosor de sus paredes y la excentricidad de su oquedad

Sin embargo, investigadores de Colombia y Cuba han demostrado que es factible su aplicación para conformar elementos estructurales en edificaciones y otras construcciones (EcoHabitar, s.f.). Además, puede ser procesada y convertida en productos derivados tales como tableros laminados, composites o tableros de fibra o partículas (como los descritos en el apartado 2.2.1 PRODUCTOS DERIVADOS DEL BAMBÚ), que pueden ser empleados en suelos, paredes y techos.

No obstante, debido al alto contenido de carbohidratos que posee, los tallos son sensibles al ataque de hongos e insectos (Bissanti, 2020), como el escarabajo barrenador del bambú (*Dinoderus minutus*). Por esta razón, es necesario que los tallos de *Bambusa vulgaris Vulgaris* sean preparados adecuadamente para su uso en construcciones y estructuras.

Por este motivo, al igual que sucede con la madera, se requiere la aplicación de una serie de procesos en su manejo, lo que incluye: cosecha (corte), transporte, curado, tratamiento, secado, limpieza, almacenamiento, transformación (si es necesaria) y puesta en obra (EcoHabitar, s.f.). Dependiendo del país, la normativa a seguir en relación a estos procesos difiere, aunque las más reconocidas y aceptadas (motivo por el que se usan como referencia en aquellos países que no tienen una normativa propia al respecto), son las Normas Técnicas Colombianas (NTC).

- **La *Bambusa vulgaris Vulgaris* en el sector de la Construcción**

La *Bambusa vulgaris Vulgaris* posee propiedades físicas y mecánicas que le dan potencial para ser usada como material estructural en construcciones de baja complejidad (Eje21, 2019).

Tradicionalmente, el uso de esta especie en su forma natural de caña se ha limitado a su empleo en el sector agropecuario para la fabricación de cercados (**Figura 204**) y pequeños refugios para los animales, así como para refugios temporales para seres humanos (Bissanti, 2020).



Figura 204. Cercado para el ganado caprino fabricado con *Bambusa vulgaris*.
Fuente: Depositphotos.

No obstante, estudios recientes demuestran que esta especie puede emplearse a nivel estructural en edificios permanentes y de mayor envergadura, no sólo en su forma natural de caña, sino también transformada en productos mecanizados que permiten su aplicación según sistemas constructivos similares a los aplicados con la madera (EcoHabitar, s.f.).

En Cuba, por ejemplo, como parte del Proyecto Internacional Bambú-Biomasa, el Grupo Científico-Técnico CASAS (Construcciones y Arquitectura con Soluciones Alternativas Sustentables, de la Facultad de Construcciones de la Universidad de Oriente de Santiago de Cuba), realizó un taller en el que, con la participación de los estudiantes de arquitectura, se produjeron diferentes prototipos que empleaban la *Bambusa vulgaris Vulgaris* como material estructural en el diseño de edificios con distintos usos económicos y sociales. Entre ellos, destacaron los realizados para naves agropecuarias con diferentes finalidades, por lo que se llevó a cabo la construcción de una de las naves diseñadas para ganado porcino. Esta experiencia permitió corregir fallos en los principios, las formas y los procedimientos empleados, pudiendo llevar a una escala más compleja la aplicación de esta especie como material estructural para construcciones agropecuarias (EcoHabitar, s.f.).

En una fase posterior del proyecto, se eligió como reto a resolver (debido a su demanda) el diseño de una nave agropecuaria para ganado vacuno (**Figura 205**), lo que sirvió de base para la elaboración de un manual que posteriormente se distribuyó por todo el país y que obtuvo la mención en el Salón Nacional de Arquitectura Guantánamo-Cuba 2011 en la categoría de “Investigación, teoría y crítica”, y como documentación técnica esencial para la construcción de una nave prototipo en la provincia de Holguín (Pascual Menéndez, 2011). Como conclusión, se establece que es totalmente factible el empleo de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* para soluciones constructivas, pudiéndose emplear con ella soluciones totalmente prefabricadas, con las ventajas que presenta este sistema constructivo. Además, se logran soluciones constructivas y de diseño acordes al carácter económico, ambiental y socio-cultural que demandan los principios de la sustentabilidad aplicados al sector de la construcción (EcoHabitar, s.f.).

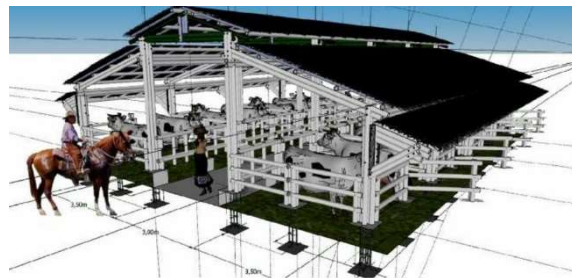


Figura 205. Nave agropecuaria para ganado vacuno diseñada en Cuba (empleando *Bambusa vulgaris Vulgaris* como material estructural y principal) como parte del Proyecto Internacional Bambú-Biomasa.
Fuente: Pascual Menéndez (2011).

Por otro lado, en Colombia, Fabián Leonardo Álvarez Vega, Magíster en Construcción de la Universidad Nacional de Colombia (UNAL), identificó las propiedades físico-mecánicas de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* del municipio de La Mesa (Cundinamarca, Colombia) con el propósito de hallar parámetros de resistencia que permitieran introducir esta especie en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente (NSR-10), que únicamente admite el uso de una especie de bambú: la *Guadua angustifolia Kunth*. Para conseguirlo, Fabián estudió 12 culmos de *Bambusa vulgaris Vulgaris*, a los que realizó ensayos físicos, para determinar el contenido de humedad y la densidad básica, y ensayos mecánicos de compresión paralela a la fibra, compresión perpendicular a la fibra, corte paralelo a la fibra, tracción y flexión, para hallar su elasticidad y resistencia. Para realizar los ensayos siguió los procedimientos descritos en la Norma Técnica Colombiana NTC-5525 “Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la *Guadua angustifolia Kunth*” y en el NSR-10, ambos documentos necesarios para el futuro diseño de estructuras con *Bambusa vulgaris Vulgaris* (Eje21, 2019).

Entre los resultados obtenidos para la *Bambusa vulgaris Vulgaris* que crece en La Mesa, destacan las siguientes resistencias: flexión 19.4 MPa, tracción 27.0 MPa, compresión paralela a la fibra 17.0 MPa, corte paralelo a la fibra 1.8 MPa y compresión perpendicular a la fibra 5.3 MPa. Estos valores son superiores a los registrados para la *Guadua angustifolia Kunth* en el NSR-10, por lo que, en palabras de Fabián, “con esos valores, la planta se podría considerar apta para incluirla en el título G de los próximos códigos colombianos de construcción sismo

resistente, después de realizar estudios complementarios en otros lugares de Colombia donde esta crece” (Álvarez Vega, 2018).

Si bien es cierto que prácticamente no existen estudios sobre esta especie de bambú, investigaciones como la de Fabián Álvarez demuestran que la *Bambusa vulgaris Vulgaris* tiene el potencial necesario para ser considerada una alternativa sostenible, renovable y de bajo costo para la realización de construcciones de baja complejidad. La explotación de este recurso natural, ampliamente disponible en comparación con el resto de especies de bambú, puede ayudar a disminuir el déficit de vivienda e infraestructura de muchos países, teniendo en cuenta que es un material económico y renovable (Figura 206) que, si se acompaña de campañas de explotación responsable, dinamizaría además la economía del sector rural (Eje21, 2019).



Figura 206. Nacimiento de un brote a partir de un trozo de culmo enterrado.
Fuente: Fleitas Díaz et al. (2018).

La **Tabla 14** recoge los valores obtenidos por distintos autores para las principales características físico-mecánicas de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Estos datos fueron expuestos previamente (junto con los de otras especies del género *Bambusa*) en la **Tabla 10**.

Tabla 14. Valores de las principales características físico-mecánicas de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*.

Especie	Mínimo	Máximo	Autor de la investigación
Peso específico del bambú seco (kg/m³)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	570	Valero et al. 2005
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	680	Sattar et al. 1992
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	630	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	650	Ghavanni 1988
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	544	Álvarez Vega 2018
Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	17.3	Álvarez Vega 2018
Resistencia a compresión perpendicular a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	5.3	Álvarez Vega 2018
Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	30.4	41.1	Valero et al. 2005
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	27.0	Álvarez Vega 2018
Resistencia a cortante paralelo a las fibras del bambú (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	1.7	Álvarez Vega 2018
Resistencia a flexión estática del bambú (Resistencia a flexión) (MPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	85.7	102.2	Valero et al. 2005
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	75.0	Sattar et al. 1992
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	84.0	Prawirohatmodjo 1990
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	39.0	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	78.0	Ghavanni 1988
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	19.4	Álvarez Vega 2018
Módulo de elasticidad del bambú en flexión estática (GPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	14.3	Sattar et al. 1992
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	7.1	Palisoc y Bello 1996
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	5.9	Ghavanni 1988
Módulo de elasticidad del bambú en compresión paralela a las fibras (GPa)			
<i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>	-	24.2	Álvarez Vega 2018

Observando la **Tabla 14**, se aprecia que el peso específico de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* se sitúa alrededor de los 600 kg/m³, difiriendo según el lugar de procedencia de las muestras analizadas por los distintos autores.

Comparando el estudio de Valero y sus colaboradores (2005) con el de Álvarez Vega (2018), se aprecia que éste último obtiene valores notablemente más bajos en resistencia a tracción paralela a las fibras y en resistencia a flexión estática, mientras que el primero muestra los valores más altos en ambas resistencias. Estas diferencias pueden deberse a que, mientras que Álvarez Vega ensayó culmos de *Bambusa vulgaris Vulgaris* procedentes de Colombia siguiendo las indicaciones de la NTC 5525 - *Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth* (la adaptación colombiana de la ISO 22157-1:2004 - *Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Parte 1: Requisitos*), Valero y sus colaboradores analizaron culmos procedentes de Venezuela siguiendo las consideraciones técnicas de las normas americanas ASTM y las normas alemanas DIN. Este hecho provoca una gran variación en los resultados de ambos estudios, pues, para el ensayo de flexión estática, la NTC 5525 ensaya culmos completos, mientras que las normas ASTM utilizan probetas mecanizadas de 10 cm de largo x 3 cm de ancho, y con un espesor igual al espesor de la pared del culmo. Del mismo modo, la forma y las dimensiones de las probetas del ensayo de resistencia a tracción paralela a las fibras de la NTC 5525 varían con respecto a las de las normas DIN.

- **Protección de la *Bambusa vulgaris Vulgaris* usada en estructuras**

Cuando la *Bambusa vulgaris Vulgaris* sea empleada con carácter estructural, deben tenerse en cuenta las mismas consideraciones que al emplear *Guadua angustifolia Kunth* (las cuales se recogen en el apartado 3.2.2.1 Descripción general de la *Guadua angustifolia Kunth*), siendo éstas muy similares a las aplicadas al utilizar madera.

3.2.1.2. Criterios de inclusión y exclusión en la selección de muestras

Conforme a lo indicado en las normas ISO 22157-1:2004 e ISO 22157-2:2004 (dado que cuando se realizó el ensayo la norma ISO 22157:2019 aún no se había publicado), el muestreo se realizó de forma que las cañas de bambú seleccionadas resultasen fielmente representativas de la población total objeto de estudio.

Los criterios de inclusión exigían que los culmos fuesen erectos en la base, que tuviesen 5 años de edad y que contasen con un diámetro externo mínimo de 6 cm. Las cañas seleccionadas debían presentar un color verde oscuro brillante en su superficie, sin que hubiese pubescencia ni presencia de hojas caulinares. Los nudos debían ser estrechos, de color blanco y sin que existieran ramas en ellos.

La **Figura 207**, muestra varios culmos de la mancha de Viveros Algaidas (ubicados en Motril, Granada, España) que reúnen los requisitos necesarios para poder ser incluidos en el experimento.



Figura 207. Culmos de la mancha de Viveros Algaidas válidos para el muestreo.
Fuente: Torreón Arquitectura.

Los criterios de exclusión eliminaban del muestreo los culmos dañados o rotos, es decir, los que presentaban fisuras profundas o grietas que atravesaban completamente la caña. También se desecharon los tallos descoloridos en exceso y aquellos completamente cubiertos por manchas blanquecinas de líquenes y musgos. Los tallos con menos de 5 años de edad se desestimaron por considerarse inmaduros y, por tanto, no aptos para su uso en construcción. Aquellos culmos afectados por insectos xilófagos o cualquier otra plaga similar, se excluyeron de la muestra.

Los culmos torcidos, aquellos que se desarrollaron inclinados con respecto al plano del terreno y los que presentaban entrenudos irregulares no fueron desechados de la muestra, puesto que las probetas empleadas en los ensayos podían ser extraídas de partes regulares de dichas cañas.

3.2.1.3. Características de la muestra

Para la realización de los ensayos de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*, ésta fue proporcionada de forma gratuita al grupo de investigación por parte de Viveros Algaidas, una empresa dedicada al cultivo y comercio de todo tipo de plantas, ubicada en Motril (Granada, España). Los culmos fueron extraídos de una mancha salvaje situada en los terrenos de la propia empresa.

Dado que los culmos escogidos debían cumplir los criterios de inclusión descritos en el apartado anterior, todos ellos eran erectos en su base (aunque no en el resto del tallo), de 5 años de edad y con un diámetro externo mínimo de 6 cm. Las cañas seleccionadas presentaban un color verde oscuro brillante en su superficie, sin que hubiese pubescencia ni presencia de hojas caulinares. Los nudos eran estrechos, de color blanco y sin presencia de ramas en ellos.

El grupo de investigación se encargó del corte, almacenado y curado de las 3 cañas elegidas (**Figura 208**). Posteriormente, las cañas fueron cortadas y convertidas en latillas (segmentos longitudinales de la caña de bambú) de entre 2 y 4 cm de ancho. De este modo, finalmente se obtuvieron un total de 44 latillas de *Bambusa vulgaris Vulgaris*.



Figura 208. Culmos elegidos para la realización de los ensayos

Dado que los ensayos no requerían el empleo de todas ellas, se realizó una selección aleatoria representativa para elaborar con ellas los especímenes que fueron ensayados. Al tratarse de ensayos de tracción paralela a la fibra con análisis de emisión acústica, se escogieron 4 latillas al azar de entre las 44 disponibles.

- **Cañas seleccionadas para el ensayo**

La **Tabla 15**, recoge detalladamente las características de cada caña seleccionada para el ensayo.

Tabla 15. Dimensiones de cada caña de *Bambusa vulgaris Vulgaris* seleccionada para el ensayo.

Cañas de <i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>				
Denominación	Longitud (mm)	Diámetro externo promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Ratio espesor ext/int
05	1784	62,1	7,50	0,83
18	1806	76,4	8,75	0,87
19	1877	71,6	9,50	0,75

El diámetro externo promedio se calculó como promedio del diámetro externo de cada caña medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la caña y en el centro de la misma.

El espesor promedio se calculó como promedio del espesor de cada caña medido en 4 puntos: dos puntos opuestos entre sí en un extremo de la caña y dos puntos opuestos entre sí en el otro extremo de la misma caña.

La **Figura 209** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes cañas seleccionadas para el ensayo.

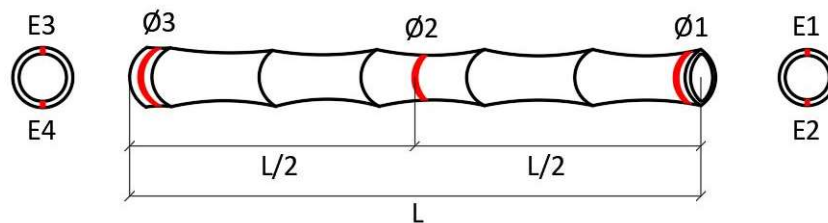


Figura 209. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada caña

- **Latillas para elaborar los especímenes del ensayo**

La **Tabla 16**, recoge detalladamente las características de cada latilla seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo.

Tabla 16. Dimensiones de cada latilla de *Bambusa vulgaris Vulgaris* seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo.

Latillas de <i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>			
Denominación	Longitud (mm)	Ancho promedio (mm)	Espesor promedio (mm)
05.09	240	22	7.04
05.12	241	24	7.02
18.03	258	31	8.00
18.04	261	33	8.04

El ancho promedio se calculó como promedio del ancho de cada latilla medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la latilla y en el centro de la misma.

Dado que todas las latillas tenían nudo, el espesor promedio se calculó como promedio del espesor de cada latilla medido en 4 puntos: en cada uno de los extremos de la latilla, en la zona plana más cercana al nudo a la izquierda del mismo y en la zona plana más cercana al nudo a la derecha del mismo.

La **Figura 210** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes latillas seleccionadas para la elaboración posterior de los especímenes empleados en el ensayo.

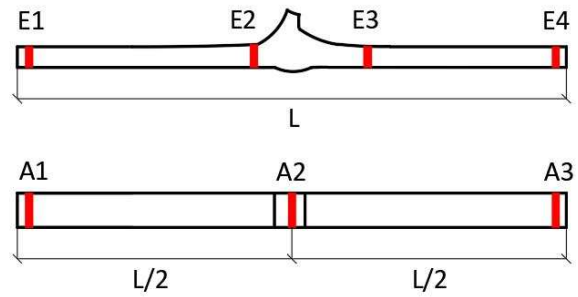


Figura 210. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada latilla

3.2.2. *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

3.2.2.1. Descripción general de la *Guadua angustifolia Kunth*

- **Definición y distribución**

La *Guadua angustifolia Kunth* es una especie botánica de la subfamilia de las gramíneas *Bambusoideae*, que tiene su hábitat natural en la selva tropical húmeda a orillas de los ríos (Clayton, *et al.*, s.f.). Es originaria de Ecuador, Venezuela y Colombia, siendo este último el país donde más extendido está su cultivo, uso y normalización (Schröder, s.f.b). No obstante, ha sido introducida en varios países de América del Sur, América Central, el Caribe y Asia, entre ellos: Guyana, Brasil, Bolivia, Perú, Surinam, México, Costa Rica, Honduras, El Salvador, Guatemala, Nicaragua y Panamá (Clayton, *et al.*, s.f.). La **Figura 211** muestra un mapa de su distribución.



Figura 211. Distribución de la *Guadua angustifolia Kunth* en el mundo.
Fuente: Global Biodiversity Information Facility.

Hasta 1822 el género *Guadua* era considerado como parte del género *Bambusa*, pero, en dicho año, el botánico alemán Karl S. Kunth describió la *Guadua* como un género distinto. En su descripción, Kunth usó la palabra indígena "*Guadua*", que era el nombre que las comunidades nativas de Colombia y Ecuador daban a este bambú, y el epíteto latino "*angustifolia*", que significa "con hojas estrechas" (Schröder, s.f.b).

- **Características generales**

Se trata de una planta rizomatosa, perenne y erecta en la base. Sus culmos suelen medir 15-20 m de altura (raramente 30 m) y 9-13 cm de diámetro exterior (pudiendo llegar a los 20-25 cm) (López Villalba, *et al.*, 2002). Los nudos basales están provistos de espinas y pelos blancos. Sus entrenudos tienen entre 20 y 45 centímetros de longitud, situándose los de mayor tamaño en la parte intermedia del culmo y los de menor en la parte inferior (Anon., s.f.). Sus hojas, de forma lanceolada, tienen un tamaño desigual y su floración no es agrupada (López Villalba, *et al.*, 2002).

La *Guadua* es un material poroso de origen vegetal, cuyas fibras están dispuestas axial y longitudinalmente. Es un material anisotrópico, ya que sus propiedades físicas, mecánicas y de laborabilidad varían según el sentido o plano considerado. Presenta cambios de sus dimensiones debido a la expansión térmica y cambios de volumen a causa de la humedad. Todo esto hace que la *Guadua* se comporte de forma similar a la madera (Cely Moreno, *et al.*, 2012).

- **Cultivo**

Los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth forman colonias conocidas como “manchas”⁵⁴ o “guadales”⁵⁵, como el que aparece en la **Figura 212**. Estos bosques de bambú suelen aparecer cerca de los ríos y en zonas igualmente húmedas, siendo el lugar óptimo para su desarrollo la región central de los Andes (Schröder, s.f.b), zona conocida como el Eje Cafetero. Se trata de espectaculares bosques que dan lugar a ecosistemas muy dinámicos y altamente especializados, pues en su interior se pueden encontrar multitud de plantas, mamíferos, aves y reptiles asociadas a ellos (Bambusa.es, s.f.b).



Figura 212. Guadual.
Fuente: Bambúes de Xalapa.

En función de su estado de maduración, el bambú *Guadua angustifolia* Kunth se aprovecha tras 4 o 5 años plantado. La altitud ideal para su cultivo es entre los 400 y los 1600 msnm, en suelos aluviales y bien drenados, con una temperatura de entre 18°C y 28°C, una precipitación superior a los 1200 mm/año (siendo preferible entre 2000 y 2500 mm/año) y una humedad relativa de, al menos, el 75% (López Villalba, *et al.*, 2002).

La *Guadua* tiene un rápido crecimiento y una mayor productividad en comparación con los árboles. Por lo general, el ciclo de crecimiento del bambú es un tercio del de "un árbol de rápido crecimiento" y tiene el doble de productividad por hectárea ya que, en comparación con el roble, la *Guadua* produce hasta cuatro veces más madera (Schröder, s.f.b). Tiene alta velocidad de crecimiento (casi 11 cm de altura por día en la región cafetera) y en sólo 6 meses puede lograr su altura total, hechos positivos si se tiene en cuenta que uno de los problemas planteados para



Figura 213. Culmos de *Guadua angustifolia* Kunth.
Fuente: Guadua Bambú.

la siembra de especies maderables de reforestación, es el tiempo extremadamente largo para la obtención de resultados. Además, se trata de un recurso renovable que se automultiplica vegetativamente, es decir, que no necesita de semilla para reproducirse como ocurre con algunas especies maderables (Aristizabal, 2016).

Una vez que se haya establecido, si se maneja adecuadamente, la *Guadua* puede tener una producción ilimitada sin requerir mucho cuidado. La composición ideal de los tallos en un bosque de *Guadua* se estima en 10% de brotes, 30% jóvenes y 60% maduros, con una densidad de 3000 a 8000 tallos por hectárea. Esto significa una productividad de 1200-1350 tallos por hectárea en el año, generando una alternativa efectiva a la madera para la producción de madera laminada y aglomerada (Schröder, s.f.b). La **Figura 213** muestra varios tallos jóvenes.

⁵⁴ Agrupación de ejemplares de una misma especie de bambú que crecen cerca los unos de los otros.

⁵⁵ Mancha compuesta por ejemplares del género *Guadua*.

- **Ventajas ambientales**

El bambú *Guadua* tiene un gran impacto ambiental, ya que conserva el suelo, controla la erosión, regula el flujo de ríos y arroyos, suministra material orgánico y actúa como sumidero de CO₂ (Schröder, s.f.b), como puede observarse en la **Figura 214**.

Entre las principales capacidades de esta especie destaca que funciona como reguladora del caudal hídrico, absorbiendo agua cuando hay exceso y soltándola poco a poco limitando así posibles crecidas del caudal. Además, gracias a su rápido crecimiento aéreo y subterráneo, se considera ideal para prevenir la erosión del suelo y conservar así de suelos inestables, ya que los rizomas tienden a ocupar las zonas perturbadas y aportan gran cantidad de biomasa al terreno (Bambusa.es, s.f.b).

Otra gran ventaja que ofrece es su elevada capacidad para capturar CO₂ y convertirlo en oxígeno, siendo ésta un 35% mayor que la de los árboles convencionales. El potencial de fijación de CO₂ atmosférico en los primeros 4-5 años de crecimiento de la *Guadua* a partir de la nueva siembra es de, aproximadamente, 150 toneladas métricas por hectárea, pudiendo llegar (en casos excepcionales) a las 550 toneladas métricas por hectárea tras 7 años de crecimiento. Este descubrimiento resulta fundamental, pues facilita la participación de esta especie en el sistema internacional de comercio de derechos de emisión, ofreciendo beneficios adicionales a los inversores y agricultores que plantan y cultivan *Guadua* y produciendo cero emisiones (Schröder, s.f.b). Por lo tanto, juega un papel vital en un ecosistema saludable.



Figura 214. Bosque de *Guadua angustifolia* Kunth empleado como sumidero de CO₂.
Fuente: Bambusa Estudio.

Por otra parte, dado que la *Guadua angustifolia* Kunth es un excelente recurso sostenible y autorrenovable de rápido crecimiento, versátil, liviano, flexible, resistente y de fácil manejo, se plantea como un material sustituto de la madera. Puesto que tiene una alta densidad por hectárea, rápido crecimiento, rápida explotación y una enorme capacidad de renovación sin reforestar, su uso en procesos industriales reduciría significativamente los impactos ambientales negativos en los bosques al reducir la explotación de otros recursos forestales (principalmente bosques de madera dura) de crecimiento mucho más lento (Aristizabal, 2016).

- **Usos fuera del sector de la Construcción**



Figura 215. Lápiz de bambú.
Fuente: Di Masi Artesanato em Bambus.

La *Guadua angustifolia* Kunth se emplea actualmente para un sinnúmero de usos: fabricación de muebles y artesanías (**Figura 215**), elaboración de paneles para múltiples usos, industria bioenergética (uso como biomasa, *pellets*, etc.), instrumentos musicales, construcción de casas y otras estructuras, etc. (Schröder, s.f.b).

En las comunidades nativas, los trozos con un nudo en la base se emplean como contenedores, pudiendo verter líquidos en su interior sin problema. Además, sus entrenudos contienen agua pura que los agricultores

consumen cuando están trabajando en el bosque. Por otra parte, con las ramas de esta especie se fabrican escobas y mobiliario de interior (INBAR, 2019a).

Gracias a sus enormes ventajas medioambientales, a menudo se planta como protección de las cuencas y riberas de los ríos, así como de quebradas. También se cultiva como fijador de CO₂, aprovechando además sus buenas características estéticas en la elaboración de creaciones paisajísticas con efecto purificador y embellecedor (Aristizabal, 2016).

Además, la *Guadua angustifolia* Kunth se ha utilizado también en iniciativas de carácter social, especialmente en el desarrollo y promoción de plantaciones en algunos de los sectores más desfavorecidos, de forma tal que de ellas se pueda generar suficiente materia prima para la construcción de viviendas, muebles y artesanías (Cely Moreno, *et al.*, 2012).

También es importante la consideración que, desde hace más de 3000 años, tienen en Japón y China por la *Guadua*, donde ha sido fuertemente relacionada con los principios del Feng-Shui (**Figura 216**), que sugieren armonía total en todas las cosas, armonía en el ambiente y el concierto entre el hombre y su medio (Aristizabal, 2016).

Esta visión amplia e inteligente para valorar la *Guadua* les ha permitido encontrar en la especie infinitas posibilidades y ventajas aplicadas al campo industrial, con excelentes resultados económicos, enorme rentabilidad, amplio protagonismo de productos en los mercados internacionales y un desarrollo tecnológico efectivo para su procesamiento, tal vez el mejor del mundo (Aristizabal, 2016).



Figura 216. Campana de viento fabricada con bambú situada en un jardín Zen.
Fuente: Mundo Bambú.

- **Preparación de la *Guadua angustifolia* Kunth para su uso en Construcción**



Figura 217. Líquenes en la superficie de varios culmos de *Guadua angustifolia* Kunth.
Fuente: *Guadua y Bambú Colombia*.

Para obtener una *Guadua angustifolia* Kunth de excelente calidad estructural se debe tener certeza de su edad. Para fines estructurales se aconseja que tenga de 4 a 5 años de edad, presentando un color verde claro opaco, con evidente presencia de líquenes en su corteza exterior (**Figura 217**). El corte debe realizarse con luna menguante, dado que las fuerzas de gravedad lunares disminuyen y se produce un descenso de los líquidos que circulan por el tallo, asentándose en sus raíces, lo cual facilita el secado del culmo (Cely Moreno, *et al.*, 2012).

Si el corte se realiza correctamente en diagonal sobre el primer nudo y sin romperlo, tal y como se muestra en la **Figura 218**, comienza en la planta un mecanismo de transferencia rizomática de energía y un nuevo culmo/rizoma comienza a generarse, por lo que la nueva producción está garantizada. Una explotación regular y controlada favorece el desarrollo del guadual en su conjunto y estimula su regeneración natural (Bambusa.es, s.f.b).

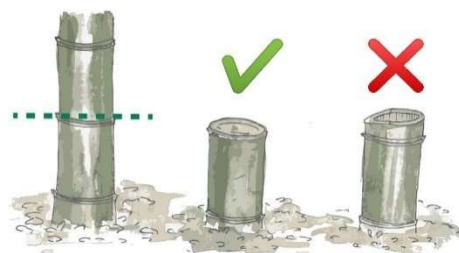


Figura 218. Corte de los culmos.
Fuente: Lucila Aguilar Arquitectos, s.f.

Una vez cortados, los culmos deben permanecer curándose en el propio guadual durante alrededor de 30 días. En ese tiempo, las cañas empiezan a cambiar su color, pasando de un verde claro opaco a un amarillo ocre, lo que indica que en el culmo hay ausencia de líquidos (Cely Moreno, *et al.*, 2012).

Por último, para evitar que el bambú sea atacado por insectos xilófagos y prevenir la aparición de hongos, las cañas son cortadas cada 6 m de longitud y sumergidas durante unos 4-6 días en una solución de bórax y ácido bórico en relación 1:1, con una concentración entre el 4 y el 6 % (**Figura 219**). Para facilitar la inmersión de las cañas y garantizar la entrada de la solución en todas las secciones del culmo (asegurando así una correcta preservación del bambú), los diafragmas de los entrenudos son perforados antes de introducir las cañas en la disolución. Se podría pensar que al perforar los diafragmas se reduce la capacidad de carga de la caña, pero estudios realizados por la Universidad Tecnológica de Pereira en ensayos a tracción con tallos perforados y sin perforar han demostrado que la resistencia sólo disminuye un 2%, una cifra insignificante en comparación con los grandes beneficios que aporta esta técnica de preservación (Bambusa.es, s.f.b).

Esta preservación es considerada sostenible, ya que su funcionalidad no depende de un tóxico sino de unas sales, un producto natural e inocuo a estas concentraciones. La mezcla impide la proliferación de insectos sin utilizar veneno gracias a la estructura intrínseca de las sales de bórax (duras y angulosas). De este modo, si un xilófago ataca la caña, estas pequeñas piedras afiladas perforan su estómago, impidiendo que el insecto continúe con su ciclo de vida. Como ventaja añadida, todos los materiales tratados de este modo poseen características ignífugas gracias al bórax (*Guadua* y *Bambú Colombia*, s.f.).



Figura 219. Tratamiento preventivo de las cañas contra el ataque de xilófago mediante una solución de pentaborato.
Fuente: Bambusa Estudio.

Una vez curadas, las cañas suelen clasificarse en función de la zona del culmo original de la que proceden. Las obtenidas de la sección más alta (Sobrebasa) presentan paredes finas, pero mantienen un alto contenido en fibra, por lo que son usadas para mobiliario auxiliar, viguetas y rastreles. Las procedentes de la sección intermedia (Basa) son esbeltas y muy ligeras en relación a su enorme resistencia, mantienen un diámetro exterior prácticamente constante y son muy fibrosas, por lo que son las piezas más usadas en construcción, especialmente en la fabricación de vigas y cerchas compuestas. Por último, las piezas de la parte inferior (Cepa), presentan un gran espesor de pared, entrenudos cortos y, por su elevada resistencia a compresión, son perfectas para la construcción de columnas (Bambusa.es, s.f.b).

- **La *Guadua angustifolia* Kunth en el sector de la Construcción**

La especie *Guadua angustifolia* Kunth destaca dentro de su género por sus excelentes características físico-mecánicas, ya que presenta mayor resistencia y capacidad para absorber energía que el resto de especies de su género, lo que la hace apta para su uso en estructuras de construcción debido a sus buenas capacidades sismorresistentes. Es por ello que es una de las veinte especies mejor valoradas de bambú (Londoño, 1989).

Como material de construcción, esta especie ofrece gran versatilidad, ligereza, flexibilidad, resistencia, dureza, adaptabilidad climática, fácil manejo y calidez visual (Schröder, s.f.b).

La *Guadua angustifolia* Kunth es un material natural con un comportamiento mecánico favorable para el uso estructural. La disposición de sus fibras permite que el comportamiento a fuerzas axiales ejercidas en el sentido de las fibras sea muy bueno (Aristizabal, 2016). Las fibras y los conductos vasculares por los cuales transporta sus nutrientes, que se aprecian en la **Figura 220**, presentan una alta resistencia mecánica a la tracción. Además, los vasos conductores se encuentran revestidos por un tejido denominado parénquima, que aumenta su resistencia (Montiel, et al., 2006).

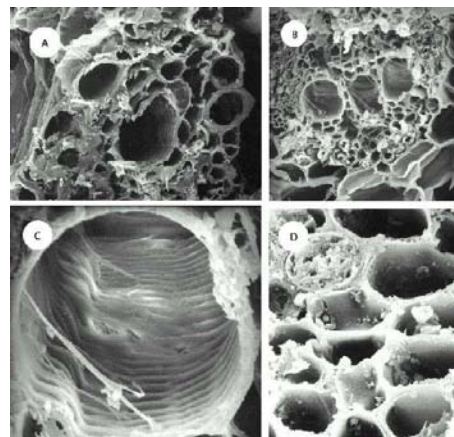


Figura 220. Microscopía de la *Guadua angustifolia* Kunth variedad Bicolor.
Fuente: Montiel, et al. (2006).

Gracias a la morfología propia de esta especie, el diámetro de las cañas es muy constante, con un valor máximo de reducción o conicidad de unos 5 mm/m. En cuanto al espesor de pared, en general es bastante grueso, aunque puede variar entre las distintas secciones elegidas. En las cepas puede llegar a superar los 30 mm (motivo por el que son utilizadas en pilares y lugares donde existen grandes esfuerzos a compresión), mientras que en las basas puede estar entre 8 y 20 mm. En el caso de las basas, como el número interno de fibras es el mismo, estas piezas son perfectas para trabajar en vigas y correas (Bambusa.es, s.f.b).



Figura 221. Técnica de curvado mediante cortes.
Fuente: Jaramillo Koupermann (2018).

En relación a la rectitud o curvatura que presentan los culmos de *Guadua angustifolia* Kunth, cabe mencionar que es posible enderezar o curvas las cañas mediante la aplicación de diversas técnicas (con vapor, con calor y arena, mediante latilla y calor, mediante cortes, durante el crecimiento, etc.), siendo estos métodos (especialmente la rectificación mediante calor) muy empleados en la industria china del bambú (**Figura 221**). No obstante, si las cañas van a ser empleadas con

carácter estructural, es preferible realizar una cuidadosa selección en la propia plantación y evitar así que sean sometidas a un proceso de rectificación (Jaramillo Koupermann, 2018).

Entre las características de la *Guadua angustifolia* Kunth destaca su extraordinaria firmeza a compresión y una buena resistencia al corte paralelo. Esto, sumado a la gran flexibilidad que presenta, convierte la caña de esta especie en una herramienta especialmente interesante para la bioconstrucción, donde está catalogada como material estructural sismorresistente. Estas buenas características se deben al elevado porcentaje de fibra presente en su estructura y al

alto contenido en sílice en su cara exterior, que le otorgan las asombrosas características de resistencia y flexibilidad que la caracterizan (Bambusa.es, s.f.b).

La *Guadua angustifolia Kunth* es un material que alcanza rápidamente la resistencia necesaria para comportarse adecuadamente ante diferentes solicitaciones de carga. Además, a pesar de no ser un material isotrópico, actualmente se conocen las principales características básicas de esta especie, como la resistencia última ante diferentes solicitaciones de carga, el módulo de elasticidad, el módulo de rotura, etc. (Aristizabal, 2016).

La **Tabla 17** recoge los valores obtenidos por distintos autores para las principales características físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia Kunth*. Estos datos fueron expuestos previamente (junto con los de otras especies del género *Guadua*) en la **Tabla 9**.

Tabla 17. Valores de las principales características físico-mecánicas de la *Guadua angustifolia Kunth* (GaK).

Especie	Mínimo	Máximo	Autor de la investigación
Peso específico del bambú seco (kg/m³)			
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	620	900	Correal y Arbeláez 2010
Resistencia a compresión paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>GaK variedad Macana</i>	51.5	67.6	Hidalgo López 1978
<i>GaK variedad Macana</i>	50.6	59.7	Takeuchi y González 2007
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	37.6	42.1	Correal y Arbeláez 2010
<i>GaK variedad Atlántica</i>	-	41.8	Sotela 1992
<i>GaK variedad Sur</i>	-	41.2	Sotela 1992
Resistencia a tracción paralela a las fibras del bambú (MPa)			
<i>GaK variedad Macana</i>	92.5	162.7	Hidalgo López 1978
<i>GaK variedad Castilla</i>	53.7	153.0	Hidalgo López 1978
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	-	190.7	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	154.8	187.7	González <i>et al.</i> 2006
Resistencia a cortante del bambú seco (MPa)			
<i>GaK variedad Cebolla</i>	-	5.57	Ciro <i>et al.</i> 2005
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	7.10	7.80	Correal y Arbeláez 2010
<i>GaK variedad Atlántica</i>	-	6.18	Sotela 1992
<i>GaK variedad Sur</i>	-	7.35	Sotela 1992
Resistencia a flexión estática del bambú (MPa)			
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	54.5	81.7	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	86.9	103.8	Correal y Arbeláez 2010
Módulo de elasticidad del bambú en compresión paralela a las fibras (GPa)			
<i>GaK variedad Macana</i>	17.4	18.1	Takeuchi y González 2007
<i>GaK variedad Atlántica</i>	-	18.9	Sotela 1992
<i>GaK variedad Sur</i>	-	17.3	Sotela 1992
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	14.9	20.0	Correal y Arbeláez 2010
Módulo de elasticidad del bambú en flexión estática (GPa)			
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	17.0	18.3	Correal y Arbeláez 2010
<i>Guadua angustifolia Kunth</i>	-	17.6	Gnanaharan <i>et al.</i> 1994

De las *Guadua angustifolia Kunth* analizadas por los diversos autores, la variedad *Macana* es la que muestra la mayor resistencia a compresión paralela a las fibras (alrededor de 60 MPa), superando al resto de especies por, aproximadamente, 20 MPa.

En cambio, en relación al esfuerzo de tracción paralela a las fibras, las variedades *Macana* y *Castilla* son las que presentan las menores resistencias máximas (30 MPa menos que el resto de variedades estudiadas).

Todas las variedades de *Guadua angustifolia Kunth* de la **Tabla 17** presentan valores similares de resistencia a cortante, módulo de elasticidad en compresión paralela a las fibras y módulo de elasticidad en flexión estática.

Sin embargo, la resistencia en flexión estática difiere mucho entre las dos variedades analizadas. Esto puede deberse a los diferentes orígenes de los culmos y a que los autores de ambos estudios emplearon máquinas y técnicas de ensayo distintas. Por un lado, Correal y Arbeláez (2010) ensayaron culmos procedentes de Colombia, siguiendo las indicaciones de la NTC 5525 y utilizando un actuador hidráulico soportado en un marco de carga de acero, por lo que la carga se aplicó a través de una serie de correas ubicadas en los nudos del culmo y unidas a soportes de acero ajustables que permitían la rotación en los puntos de carga y en los apoyos. Por otro lado, Gnanaharan y sus colaboradores (1994) analizaron culmos procedentes de Costa Rica, empleando rodillos en los apoyos para que las cañas se asentasen, aplicando la carga a través de un cabezal con dos puntos de aplicación de carga (separados entre sí 1000 mm) y realizando una doble carga en la muestra: primero, la carga se aplicó gradualmente hasta alcanzar, aproximadamente, el 40% de la carga máxima; luego, se dejó descender hasta alrededor del 10% y se volvió a cargar hasta la falla de la muestra.

- **Protección de la *Guadua angustifolia Kunth* empleada en estructuras**

Cuando la *Guadua angustifolia Kunth* se emplee en el exterior, al igual que con la madera, es necesario tener en cuenta que la acción directa del sol sobre las cañas es altamente perjudicial, pues reseca y daña la superficie de las mismas, pudiendo llegar a “desescamarlas”. Por lo tanto, siempre que sea posible, se debe evitar que el sol incida directamente sobre las cañas, para lo que pueden emplearse soluciones de diseño como aleros (Bambusa.es, s.f.b).

También es importante evitar el contacto directo de las cañas con fuentes de humedad pues, aunque hayan recibido un tratamiento anti hongos y xilófagos, las grandes variaciones de humedad en su interior pueden acabar produciendo grietas. Esto puede evitarse añadiendo elementos de diseño que impidan el contacto de la estructura de bambú con el suelo (**Figura 222**) y que permitan escurrir el agua de lluvia con facilidad. Además, los extremos de las cañas no deben quedar abiertos o expuestos para proteger el interior de las mismas (DeBambú, 2020).



Figura 222. Detalle del elemento metálico que separa las columnas de *Guadua angustifolia Kunth* del suelo.
Fuente: Carolina Zuluaga.

Independientemente de esta protección, para mantener la *Guadua angustifolia Kunth* nutrida, en buen estado y con un aspecto saludable, se recomienda aplicarle cada 1 o 2 años una capa de aceite como los utilizados para el mobiliario de exterior. Es importante que el producto empleado mantenga los poros del bambú abiertos (al contrario de lo que hacen los barnices y pinturas sintéticas), que ofrezca una alta protección contra los rayos UV, que sea hidrófugo y que mantenga cierta elasticidad para evitar cuarteos (Torres Rojas, 2019).

Resulta habitual que, con el paso de los años, aparezcan algunas fisuras en las cañas. Siempre y cuando sean longitudinales y no atraviesen por completo la caña, no suponen ningún problema estructural, pues las propiedades del bambú se mantienen prácticamente inalteradas. Si es necesario ocultar las fisuras, ya sea por estética o para facilitar la limpieza de la propia estructura, lo ideal es taparlas con las mismas masillas flexibles utilizadas en la madera, pues es habitual que con un aumento de humedad las aberturas se cierren de nuevo (Bambusa.es, s.f.b).

3.2.2.2. Criterios de inclusión y exclusión en la selección de muestras

Conforme a lo indicado en la norma ISO 22157:2019, el muestreo se realizó de forma que las cañas de bambú seleccionadas resultasen fielmente representativas de la población total objeto de estudio para cada especie y ensayo previsto.

Los criterios de inclusión exigían que los culmos fuesen erectos, de 5 años de edad y con un diámetro externo mínimo de 9 cm. Las cañas seleccionadas debían presentar un color verde pálido mate en su superficie, con abundantes manchas blanquecinas de líquenes y musgos, sin que hubiese pubescencia ni presencia de hojas caulinares. Los nudos debían ser anchos, de color blanco, permitiéndose la presencia de espinas, pero sin que existieran ramas en ellos.

Los criterios de exclusión eliminaban del muestreo los culmos dañados o rotos, es decir, los que presentaban fisuras profundas o grietas que atravesaban completamente la caña. También se desecharon los tallos descoloridos en exceso y aquellos completamente cubiertos por manchas blanquecinas de líquenes y musgos. Los tallos con menos de 5 años de edad se desestimaron por considerarse inmaduros y, por tanto, no aptos para su uso en construcción. Aquellos culmos afectados por insectos xilófagos o cualquier otra plaga similar, se excluyeron de la muestra.

Los culmos torcidos, aquellos que se desarrollaron inclinados con respecto al plano del terreno y los que presentaban entrenudos irregulares no fueron desechados de la muestra, puesto que las probetas empleadas en los ensayos podían ser extraídas de partes regulares de dichas cañas.

3.2.2.3. Características de la muestra



Figura 223. Culmos representativos de las cañas seleccionadas para el ensayo.
Fuente: Álvaro Izuzquiza.

Para la realización de los ensayos de la *Guadua angustifolia Kunth*, ésta fue comprada a la empresa Bambusa Estudio, que la extrajo de dos manchas del Eje Cafetero colombiano situadas a 1000-1200 msnm, concretamente de Palmira y Candelaria, dos municipios del área metropolitana de Cali (Departamento del Valle del Cauca, Colombia).

Dado que los culmos escogidos debían cumplir los criterios de inclusión descritos en el apartado anterior, todos ellos eran rectos, de 5 años de edad y con un diámetro externo mínimo de 9 cm. Las cañas seleccionadas presentaban un color verde pálido mate en su superficie, con abundantes manchas blanquecinas de líquenes y musgos, sin que hubiese pubescencia ni presencia de hojas caulinares. Los nudos eran anchos, de color blanco, algunos con espinas, pero sin presencia de ramas en ellos (**Figura 223**).

La empresa Bambusa Estudio se encargó del corte, almacenado y curado de las cañas, así como del posterior tratamiento contra el ataque de xilófagos y prevención de aparición de hongos, que se realizó mediante la técnica tradicional de inmersión en una solución de bórax y ácido bórico en relación 1:1, con una concentración entre el 4 y el 6 %, durante 4-6 días. Para facilitar la inmersión de las cañas y garantizar la entrada de la solución en todas las secciones del culmo (asegurando así una correcta preservación del bambú), los diafragmas de todos los entrenudos fueron perforados antes de introducir las cañas en la disolución. Este es un método de conservación eficaz para prevenir significativamente el ataque de hongos e insectos, al tiempo que aumenta la resistencia al fuego (Yu, *et al.*, 2017).

El diámetro externo promedio de las cañas era 101.7 ± 4.5 mm. El espesor promedio de la pared de las cañas era 9.7 ± 1.7 mm. La densidad del bambú era de 764 kg/m^3 .

Posteriormente, algunas de las cañas fueron cortadas y convertidas en latillas (segmentos longitudinales de la caña de bambú) de entre 4 y 6 cm de ancho. De este modo, finalmente se obtuvieron un total de 19 cañas y 140 latillas de *Guadua angustifolia* Kunth (Figura 224), que fueron transportadas a la Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía, ubicada en la Universidad de Granada, en el sur de España.



Figura 224. *Guadua angustifolia* Kunth del ensayo.
Izquierda: Cañas. Derecha: Latillas.
Fuente: Bambusa Estudio.

El material se dividió aleatoriamente en dos lotes. El primer lote, que sirvió como control, se mantuvo en una cámara climática a $23 \pm 3^\circ\text{C}$ de temperatura y $65 \pm 5\%$ de humedad relativa. El segundo lote se mantuvo en el exterior, formando parte de una pequeña estructura (Figura 225), construida como parte del proyecto “Quiero Ser Ingeniera”, cuyo desarrollo se detalla en el apartado 2.3.3 EVENTOS SOBRE EL BAMBÚ EN ESPAÑA.

Esta construcción se mantuvo a la intemperie durante 2 años, tiempo suficiente para una evidente degradación del material.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ofrece los datos climatológicos de temperatura media, máxima y mínima, humedad relativa y precipitaciones mensuales registrados por la estación meteorológica Granada-Cartuja (5515X) de la Universidad de Granada.



Figura 225. Estructura de bambú en el exterior de la ETSIE de la UGR

La temperatura media durante los 2 años de exposición de la estructura fue de 16.7°C y la humedad relativa del 58.9%, con grandes variaciones estacionales y fuertes amplitudes térmicas diarias. Las precipitaciones fueron muy irregulares, presentando los períodos más secos en verano, con una tendencia general negativa en general.

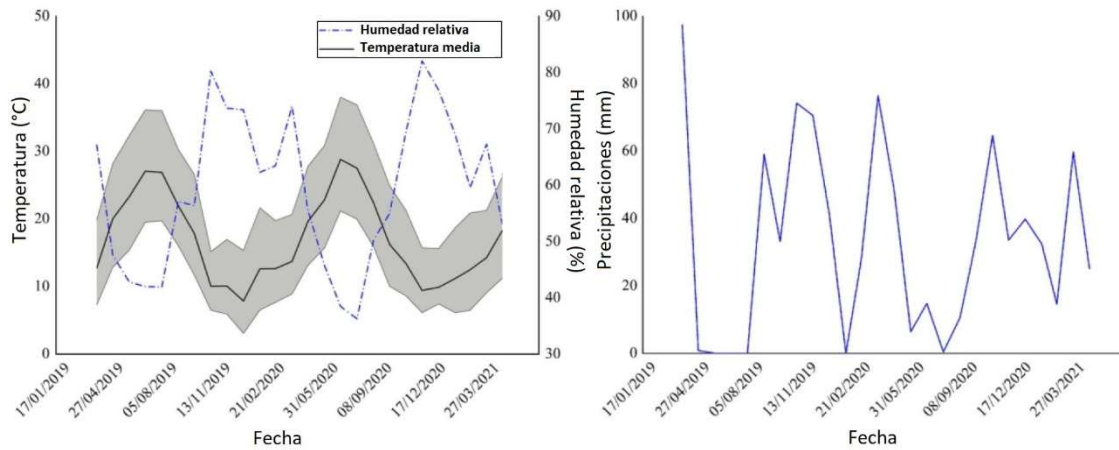


Figura 226. Historial climatológico de Granada registrado por la estación 5515X durante el período de tiempo en que la estructura de bambú estuvo expuesta a la intemperie.
Izquierda: Línea negra – Temperatura media / Área gris – Rango de temperaturas máximas y mínimas / Línea azul punteada – Humedad relativa.
Derecha: Precipitación acumulada mensual.

No se evaluó el contenido de bórax antes y después del acondicionamiento. No obstante, se realizó un ensayo de emisión acústica del material para detectar la existencia de xilófagos activos y no se detectó actividad acústica.

Después de dos años, se desmontó la estructura. Dado que los ensayos no requerían el empleo de todos los elementos de bambú expuestos, se realizó una selección aleatoria representativa para elaborar los especímenes que fueron ensayados.

La especie fue sometida a ensayos de compresión vertical paralela a las fibras (para los que se emplearon 12 cañas), a ensayos de tracción vertical paralela a las fibras (para los que se utilizaron 20 latillas) y a ensayos de flexión (para los que se usaron 30 latillas).

- **Cañas para elaborar los especímenes del ensayo de compresión paralela a la fibra**

La **Tabla 18**, recoge detalladamente las características de cada caña seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo de compresión paralela a la fibra.

Tabla 18. Dimensiones de cada caña de *Guadua angustifolia* Kunth seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo de compresión paralela a la fibra.

Cañas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth				
Denominación	Longitud (mm)	Diámetro externo promedio (mm)	Espesor promedio (mm)	Ratio espesor ext/int
C01	1908	103,7	10,31	1,01
C02	1880	99,8	16,91	0,59
C03	1907	100,4	9,57	1,05
C04	1891	96,0	12,74	0,75
C05	1898	98,8	10,40	0,95
O03	1900	97,5	17,88	0,55
O04	1890	100,9	13,12	0,77
O09	1235	99,4	13,50	0,74
O10	1205	98,5	11,00	0,90
O11	1580	92,4	9,10	1,02
O13	1465	95,0	10,19	0,93
O14	1206	97,5	14,00	0,70

La primera letra de la denominación indica la ubicación donde se situó la caña una vez que fue transportada a la Unidad de Investigación de la Madera de Andalucía. Las cañas almacenadas en la cámara climática comienzan con la letra C (“*Climatic Chamber*”), mientras que las que permanecieron al aire libre comienzan con la letra O (“*Outdoors*”).

El espesor promedio se calculó como promedio del espesor de cada caña medido en 4 puntos: dos puntos opuestos entre sí en un extremo de la caña y dos puntos opuestos entre sí en el otro extremo de la misma caña.

La **Figura 227** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes cañas seleccionadas para la elaboración de los especímenes empleados en el ensayo de compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* Kunth.

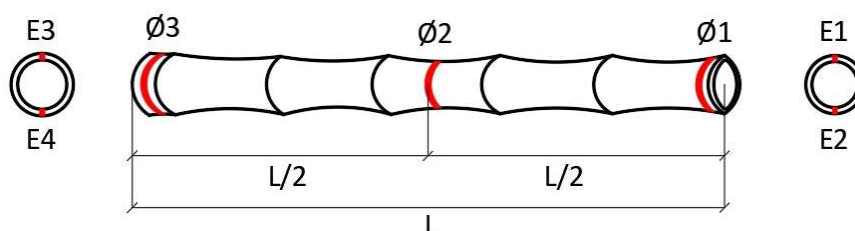


Figura 227. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada caña de GaK.

- **Latillas para elaborar los especímenes del ensayo de tracción paralela a la fibra**

La **Tabla 19**, recoge detalladamente las características de cada latilla seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo de tracción paralela a la fibra.

Tabla 19. Dimensiones de cada latilla de *Guadua angustifolia* Kunth seleccionada para elaborar los especímenes de los ensayos de tracción paralela a la fibra.

Latillas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth			
Denominación	Longitud (mm)	Ancho promedio (mm)	Espesor promedio (mm)
C04	1505	44	8,31
C06	1495	46	7,90
C09	1507	42	7,78
C11	1488	45	8,56
C12	588	59	9,02
C15	1485	55	8,46
C18	1475	54	8,90
C20	1487	47	9,24
C22	1517	54	9,86
C23	1344	46	8,89
C24	1482	49	10,00
O06	1731	49	6,93
O20	1596	50	8,31
O23	1599	51	11,04
O58	1366	45	8,70
O61	1363	50	9,96
O90	1732	47	8,75
O95	1727	50	10,26
O100	1726	60	9,64
O107	1729	57	7,61

Al igual que sucedía con las cañas, en el caso de las latillas de *Guadua angustifolia* Kunth, la primera letra de la denominación significa *Climatic Chamber/Outdoors*, y simboliza exactamente las mismas condiciones que en el caso de las cañas.

En este caso, el ancho promedio se calculó como promedio del ancho de cada latilla medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la latilla y en el centro de la misma.

El espesor promedio se calculó como promedio del espesor de cada latilla medido en 5 puntos: en cada uno de los extremos de la latilla, en su centro y a 1/4 de distancia (con respecto a la longitud de la latilla) de cada extremo.

La **Figura 228** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes latillas seleccionadas para la elaboración de los especímenes empleados en el ensayo de tracción paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* Kunth.

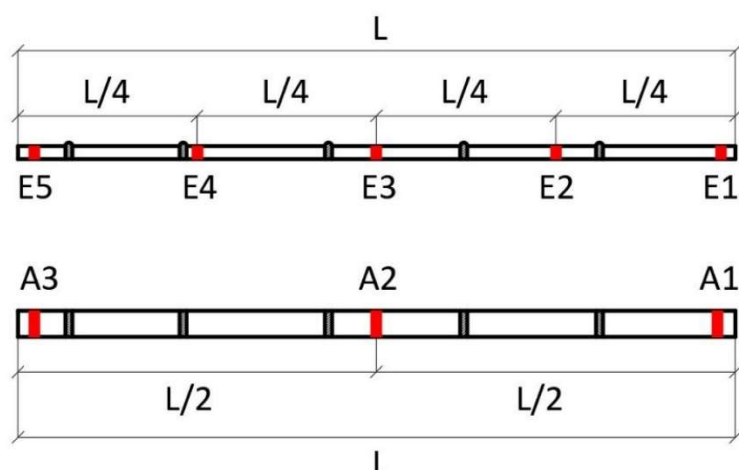


Figura 228. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en cada latilla de GaK.

- **Latillas para elaborar los especímenes del ensayo de flexión**

La **Tabla 20**, recoge detalladamente las características de cada latilla seleccionada para elaborar los especímenes del ensayo de flexión en 4 puntos.

Tabla 20. Dimensiones de cada latilla de *Guadua angustifolia* Kunth seleccionada para elaborar los especímenes de los ensayos de flexión.

Latillas de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth			
Denominación	Longitud (mm)	Ancho promedio (mm)	Espesor promedio (mm)
C01	1513	39	7,51
C02	1481	46	8,28
C03	1467	41	9,68
C05	1445	43	8,19
C07	1515	56	8,90
C08	1502	44	7,66
C10	1506	37	9,11
C13	553	45	7,69
C15	1485	55	8,46
C16	1440	50	7,80
C19	1496	47	8,09
C21	1482	47	7,95
C22	1517	54	9,86
C26	1362	40	7,12
O05	1730	51	8,91
O17	1578	47	9,57
O19	1587	52	6,42
O25	1589	51	7,96
O37	1591	47	8,22
O42	1594	44	8,23
O51	1375	61	8,74
O52	1338	57	8,17
O53	1375	61	8,38

O56	1350	49	11,55
O68	1353	45	7,72
O69	1356	34	8,30
O82	1734	47	7,62
O92	1730	47	8,36
O99	1732	46	7,78
O105	1731	47	8,90

Los criterios de denominación y determinación del ancho promedio y del espesor promedio de las latillas de *Guadua angustifolia Kunth* utilizadas para la elaboración de los especímenes del ensayo de flexión son exactamente los mismos que los empleados en el caso de las latillas empleadas en la elaboración de los especímenes del ensayo de tracción paralela a la fibra.

Por lo tanto, la **Figura 228** también representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes latillas seleccionadas para la elaboración de los especímenes empleados en el ensayo de flexión de la *Guadua angustifolia Kunth*.

3.3. MÉTODOS

La determinación de las propiedades estructurales del bambú es un campo de investigación relativamente reciente, por lo que la literatura al respecto es escasa. No obstante, se puede encontrar un análisis extenso en (Kappel, *et al.*, 2004) y en (Trujillo & López, 2016).

El comportamiento del bambú como material estructural, con su naturaleza biológica inherentemente variable, ha sido estudiado bajo pruebas destructivas de flexión y compresión [(Hamdan, *et al.*, 2009), (Nurmadina, *et al.*, 2017), (Osorio, *et al.*, 2007)], especialmente para propósitos de clasificación de resistencia [(Ribeiro, *et al.*, 2017) (Richard, *et al.*, 2016), (Trujillo, *et al.*, 2016)]. Además, Keogh y sus colaboradores estudiaron recientemente el comportamiento en fatiga de las cañas de bambú en diferentes direcciones de la misma (Keogh, *et al.*, 2015), mientras que algunos artículos describen materiales compuestos de bambú diseñados para aplicaciones estructurales en la construcción y la industria (Sharma, *et al.*, 2015). Sin embargo, pocos artículos abordan el comportamiento a tracción paralela a la fibra de los culmos de bambú (Ye & Fu, 2017).

Como afirma Taylor (Taylor, 1998), se desconoce su resistencia exacta a tracción, ya que la muestra tiende a fallar por delaminación longitudinal, haciendo casi imposible que se rompa a través de la caña siguiendo un camino controlado. Sin embargo, la resistencia a tracción paralela a las fibras puede llegar a ser de 100 MPa, 10 veces más que la perpendicular a las fibras. Algunos trabajos recientes, como los de (Ribeiro, *et al.*, 2017) y (Shukla & Sharma, 2017), también han explorado las propiedades dinámicas elásticas del bambú mediante técnicas vibroacústicas, lo que permite determinar el módulo de elasticidad dinámico promedio de forma no destructiva.

El método de emisión acústica (EA) consiste en la liberación espontánea de energía de un material cualquiera cuando se somete a esfuerzos en forma de ondas elásticas transitorias que se transmiten a través del material hasta su superficie, donde pueden ser detectadas y captadas por medio de dispositivos (sensores) para su análisis y visualización. Estos sensores, habitualmente piezoeléctricos⁵⁶, convierten la onda mecánica en señales eléctricas que son recogidas y almacenadas por otros dispositivos en forma de datos, para que, posteriormente, se interpreten y evalúen, caracterizando las ondas generadas y obteniendo la información necesaria desde el punto de vista de deformación, fisuración, corrosión, etc. En este método no hay que excitar el elemento de ensayo con ninguna onda, sino solamente recibir las ondas de EA que éste emite cuando se somete a esfuerzos, pudiendo monitorizar el daño estructural en tiempo real. La emisión acústica, en definitiva, se genera tras una rápida liberación de energía de origen mecánico, térmico, químico, etc., siendo en la fuente donde se realiza la conversión a energía acústica, originándose en ese mismo instante un evento de EA que inicia todo el proceso (Moreno Bazán, 2015).

El método EA ha sido ampliamente utilizado para la caracterización de fracturas. Como ejemplo de su aplicación, se pueden consultar los estudios de (Grosse & Ohtsu, 2008) y (Mizutani, 2016).

De igual modo, el método de emisión acústica también se ha empleado habitualmente aplicado a materiales compuestos reforzados con fibra para estudiar el agrietamiento de la matriz, el

⁵⁶ El efecto piezoeléctrico (del griego antiguo "*piezein*": presionar) describe la propiedad de determinados sólidos para generar una carga eléctrica al ser sometidos a tensión mecánica. La fuerza de actuación modifica la estructura microscópica del cuerpo; se crean dipolos entre los que se acumula una tensión. Un sensor piezoeléctrico es un dispositivo que utiliza el efecto piezoeléctrico para medir presión, aceleración, tensión o fuerza; transformando las lecturas en señales eléctricas (Kistler Group, s.f.).

despegado de la matriz de fibra y la rotura de la fibra (Sause, 2016). Estas investigaciones han tenido como objetivo caracterizar y clasificar las señales de emisión acústica de cada mecanismo de daño, especialmente utilizando características espectrales de la señal [(Brunner, 2018) (Martínez-Jequier, *et al.*, 2015) (Saidan, *et al.*, 2017) (Yong, *et al.*, 2019)].

El método EA se utilizó en 1989 para caracterizar las propiedades mecánicas y la microestructura de ciertos compuestos bambú-epoxi (Shin, *et al.*, 1989). Además, Tsai y sus colaboradores analizaron la actividad de emisión acústica al romper palillos de bambú (Tsai, *et al.*, 2016). El análisis se basó en las características tradicionales de las señales (energía, conteos, amplitud, etc.) sin caracterizar los mecanismos de daño basados en características espectrales. Más recientemente, Chen y sus colaboradores aplicaron el método EA para caracterizar el proceso de fractura del bambú *Moso* en bruto bajo pruebas de flexión (Chen, *et al.*, 2018a) y tracción (Chen, *et al.*, 2018b), incluidos los efectos del agua sobre los comportamientos de deformación y fractura. Los autores llevaron a cabo un análisis espectral de las señales EA y asociaron las señales a tres mecanismos de daño (agrietamiento de la matriz, desunión de la interfaz y rotura de la fibra) tomando la frecuencia máxima como la característica EA de las señales registradas utilizando sensores resonantes.

En este contexto, la presente Tesis Doctoral propone utilizar el centro de gravedad (CoG) del espectro de las señales como una característica EA más robusta para clasificar las señales en dos rangos de frecuencia: frecuencias bajas, asociadas con agrietamiento de matriz y desunión de interfaces, y altas frecuencias, asociadas con la rotura de fibras. En contraste con los trabajos de Chen mencionados, se propone el uso de sensores multirresonantes para asegurar una mayor sensibilidad en todo el rango de frecuencia (por debajo de 500 kHz) y así dar mayor confiabilidad a los hallazgos.

Así pues, en este apartado se detallan los pasos seguidos para la elaboración de los especímenes de *Bambusa vulgaris Vulgaris* y su posterior ensayo a tracción paralela a las fibras y emisión acústica (EA) con sensores multirresonantes.

Por otra parte, en esta investigación también se ha estudiado la influencia de los nudos y de las condiciones atmosféricas en las características mecánicas del bambú.

Taylor y sus colaboradores afirman que los nudos aportan rigidez al culmo, pero que pueden también convertirse en un punto de debilidad ante ciertos esfuerzos (Taylor, *et al.*, 2014). En este sentido, es importante identificar el tipo de muestra analizada, diferenciando entre muestras redondas largas, muestras redondas cortas y muestras divididas, pues para cada una de ellas se obtienen resultados diferentes (Gnanaharan, *et al.*, 1994).

Con base en las pruebas de flexión realizadas por diversos autores [(Amada, *et al.*, 1997) (Tan, *et al.*, 2011) (Habibi, *et al.*, 2015) (Song, *et al.*, 2017) (Song, *et al.*, 2017) (Chen, *et al.*, 2020)], Shao y sus colaboradores concluyen que el bambú anudado tiene una mayor resistencia a la flexión que el bambú sin nudos (Shao, *et al.*, 2010). En cuanto a las pruebas de tracción [(Chen & Luo, 2020) (Amada & Untao, 2001) (Oka, *et al.*, 2014) (Liu, *et al.*, 2020) (Shao, *et al.*, 2010) (Taylor, *et al.*, 2014)], se encontró que los nudos reducen el límite de rotura debido a la discontinuidad de las fibras. En las pruebas de compresión se obtuvieron resultados similares para muestras con y sin nudo [(Gauss, *et al.*, 2019), (Oka, *et al.*, 2014)]. Algunos autores incluso han analizado la compresión natural que sufren las columnas de bambú (Li, *et al.*, 2021) y las columnas de bambú laminado [(Hong, *et al.*, 2021), (Li, *et al.*, 2020)].

En cuanto a los efectos de las condiciones atmosféricas sobre el bambú, al tratarse este de un material natural, es sensible a los efectos higrótérmicos [(Chen, *et al.*, 2018b) (Xu, *et al.*, 2017)

(Kumar, *et al.*, 2016) (Xu, *et al.*, 2014)]. Cuando los elementos de bambú están expuestos a condiciones ambientales desprotegidas, se produce el deterioro de su superficie, lo que puede afectar a sus propiedades mecánicas. La literatura existente al respecto se centra principalmente en evaluar la degradación estética (Hung, *et al.*, 2012), los cambios en sus propiedades térmicas (Chee, *et al.*, 2019), los cambios en su superficie y los cambios en su capacidad antifúngica (Sánchez, *et al.*, 2020), especialmente en biocompuestos después de la aplicación de diferentes tratamientos [(Sánchez, *et al.*, 2020), (Ogunsona, *et al.*, 2017), (Kallakas, *et al.*, 2015) (Hung, *et al.*, 2012)].

Algunos estudios previos se centran en el comportamiento del bambú bajo diferentes niveles de humedad interna en el momento de la prueba, demostrando que cuando el nivel de humedad aumenta, el esfuerzo de tracción final disminuye [(Tan, *et al.*, 2011) (Xu, *et al.*, 2017) (Xu, *et al.*, 2014)] y el comportamiento cambia de frágil a dúctil (Chen, *et al.*, 2018b). Sin embargo, hasta donde saben la autora de esta Tesis Doctoral y sus supervisores, nadie ha realizado un análisis completo sobre la influencia de las condiciones atmosféricas incontroladas en el bambú natural.

Por este motivo, esta investigación analiza el comportamiento del bambú *Guadua angustifolia Kunth* desde varias perspectivas: se realizan 3 tipos de ensayos para caracterizar sus propiedades mecánicas (compresión, tracción y flexión), empleando en ellos muestras con y sin nudos, así como muestras sometidas al efecto de la exposición atmosférica durante dos años, sin ningún tipo de protección, en la ciudad de Granada (sur de España).

En el presente apartado se detallan los pasos seguidos para la elaboración de los especímenes de *Guadua angustifolia Kunth* y su posterior ensayo.

3.3.1. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE *BAMBUSA VULGARIS VULGARIS*

En este apartado se recoge información sobre la elaboración de los especímenes necesarios de *Bambusa vulgaris Vulgaris* utilizados posteriormente en los ensayos de tracción paralela a las fibras y emisión acústica que se le realizaron a dicha especie, cuyo desarrollo se explica más adelante. Además, se definen los equipos e instrumentos utilizados en la elaboración de los especímenes.

3.3.1.1. Procedimiento

Para la elaboración de los especímenes de *Bambusa vulgaris Vulgaris* sometidos al ensayo de tracción paralela a la fibra (con ensayo paralelo de emisión acústica) se siguieron las indicaciones de las normas ISO 22157-1:2004 - *Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Parte 1: Requisitos* e ISO 22157-2:2004 - *Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas. Parte 2: Manual de Laboratorio*.

La **Figura 229** muestra un ejemplo de probeta para ensayo de tracción paralela a las fibras según la norma ISO 22157-1:2004. Esta imagen se utilizó como referencia para diseñar las probetas.

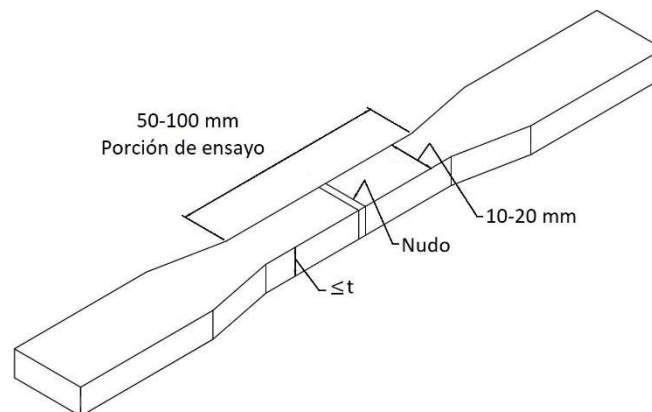


Figura 229. Ejemplo de probeta para ensayo de tracción paralela a las fibras según la norma ISO 22157-1:2004.
Fuente: ISO 22157-1:2004.

En todos los especímenes la dirección general de las fibras era paralela al eje longitudinal de la porción de ensayo de la prueba. Además, para garantizar que la falla de la probeta se produjese en la porción de ensayo y minimizar la concentración del esfuerzo en el área de transición, los extremos de las probetas se entallaron ligeramente conforme a lo indicado en las normativas de referencia.

Las dimensiones de las probetas se ajustaron para alcanzar una longitud total $L = 240$ mm y un ancho $W = 15$ mm, situando el nudo de cada probeta en el punto central de la misma.

A modo de comparación, se dejó una porción de diafragma en el área del nudo en dos de las cuatro probetas (N1 y N2), mientras que en las otras dos se eliminó completamente el diafragma (UN1 y UN2).

La **Tabla 21** recoge la nomenclatura y dimensiones de las probetas elaboradas, en mm. La **Figura 230** muestra un esquema acotado (en mm) de cada una de las probetas.

Tabla 21. Nomenclatura y dimensiones de las probetas de *Bambusa vulgaris Vulgaris* (en mm).

Probetas de <i>Bambusa vulgaris Vulgaris</i>				
Nombre	Diafragma	Espesor (t)	Longitud del nudo (NL)	Latilla de la que procede
UN1	No	7	-	05.09
N1	Sí	7	28	05.12
UN2	No	8	-	18.03
N2	Sí	8	26	18.04

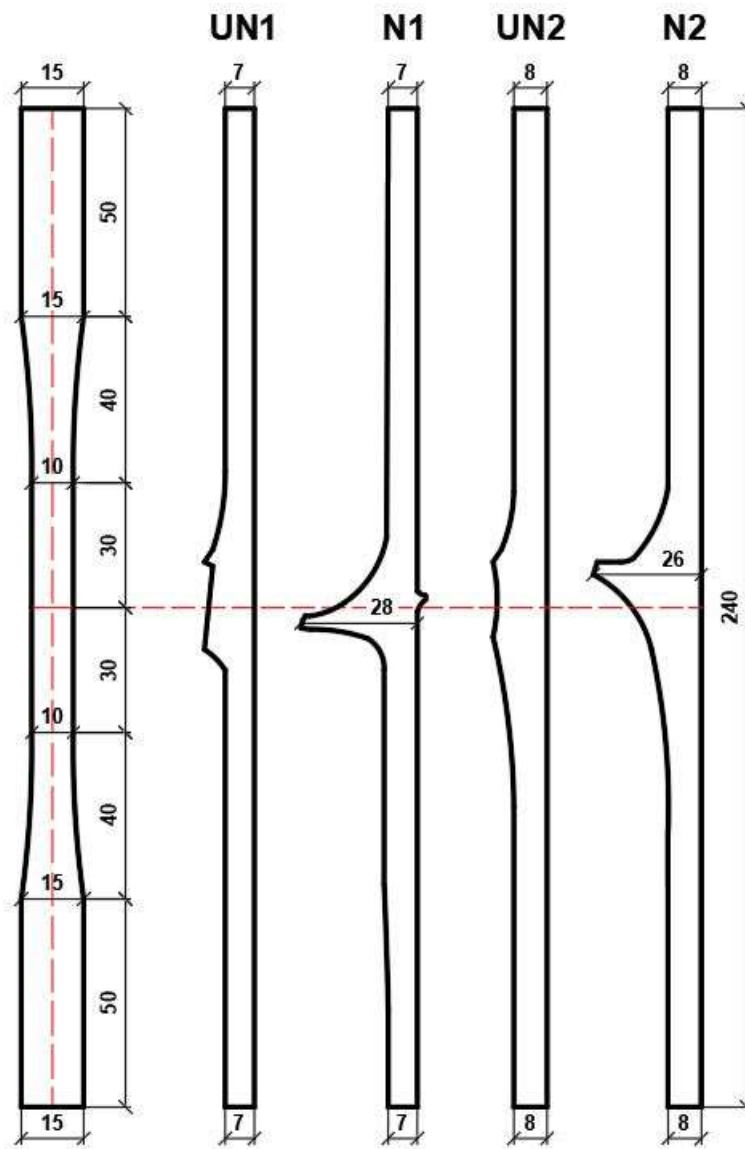


Figura 230. Esquemas de las probetas de *Bambusa vulgaris Vulgaris*. Dimensiones en mm.

3.3.1.2. Equipos e instrumentación

Para elaborar las probetas de *Bambusa vulgaris Vulgaris* se dibujó sobre las latillas el patrón al que estas debían adaptarse, como se aprecia en la **Figura 231**.



Figura 231. Latilla rotulada con el patrón diseñado para las probetas

Después, mediante el uso de una sierra de calar Bosch PST 650 equipada con una hoja para madera blanda y compuestos de madera, se establecieron el largo y ancho de las mismas. Empleando una DREMEL® 3000 equipada con una banda de lija de 13 mm y grano 60 (diseñada para el lijado de madera y plásticos), se terminaron de perfilar las dimensiones centrales de las probetas, ajustándolas a la perfección al patrón diseñado. Las herramientas utilizadas para la elaboración de las probetas se muestran en la **Figura 232**.



Figura 232. Herramientas empleadas para la elaboración de las probetas de *Bambusa vulgaris Vulgaris*.
Izquierda: Sierra de calar Bosch PST 650. Derecha: DREMEL® 3000.
Fuente: Suministros Industriales Pasai (Izquierda) / Arcashop (Derecha).

En la **Figura 233** puede observarse parte del proceso y una comparativa entre el estado inicial, en forma de latilla, y el final, en el que se dispone de una probeta lista para el ensayo de tracción paralela a la fibra con ensayo paralelo de emisión acústica.



Figura 233. Elaboración de probetas de *Bambusa vulgaris Vulgaris*.
Izquierda: Probeta en proceso de lijado. Derecha: Comparativa entre el estado inicial y final de las probetas.



Figura 234. Ejemplo de probeta con y sin diafragma

Como se ha indicado en el apartado anterior, se dejó una porción de diafragma en el área del nudo en dos de las cuatro probetas, mientras que en las otras se eliminó por completo el diafragma. La **Figura 234** muestra un ejemplo de cada uno de los casos.

Para eliminar el diafragma, se empleó una sierra de arco con hoja para madera. Posteriormente, se lijó ligeramente la zona con una esponja abrasiva de grano medio.

3.3.2. ENSAYOS DE TRACCIÓN PARALELA A LAS FIBRAS + EMISIÓN ACÚSTICA DE *BAMBUSA VULGARIS VULGARIS*

3.3.2.1. Procedimiento

Cada probeta se equipó con cuatro sensores piezoeléctricos (sensores de EA) multirresonantes VS45-H, ubicados simétricamente con respecto al punto central de la muestra en las posiciones indicadas en la **Figura 235**.

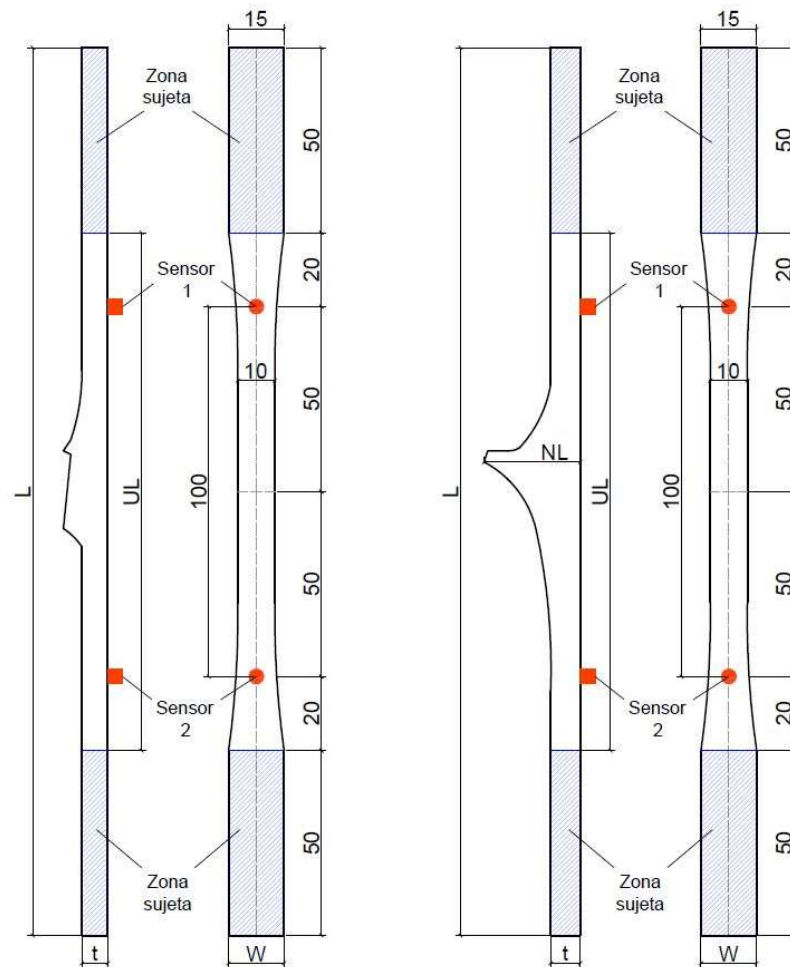


Figura 235. Esquema de las probetas y posiciones de los sensores EA. Izquierda: Probetas sin diafragma (UN1 y UN2). Derecha: Probetas con diafragma (N1 y N2). Dimensiones en mm.

Los sensores 3 y 4 se colocaron en las abrazaderas de la máquina de ensayos para eliminar el ruido generado por la fricción entre la muestra y las pinzas durante la prueba.

Los sensores se acoplaron acústicamente a las muestras mediante grasa de silicona y se fijaron con cinta adhesiva. La calidad del acoplamiento y el adecuado comportamiento de todos los elementos del circuito electrónico de los cuatro canales utilizados se verificaron antes y después de cada prueba mediante la clásica prueba de rotura de mina de lápiz (PLB).

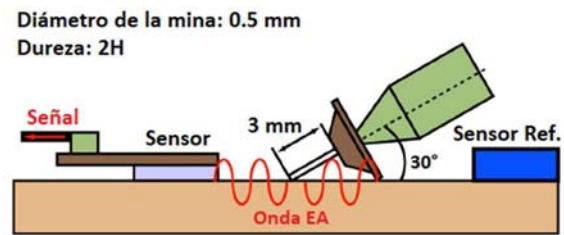


Figura 236. Rotura de mina de lápiz (PLB).
Fuente: Nguyen Minh-Dung.

La rotura de mina de lápiz (también llamada “Fuente Hsu-Nielsen”, debido a los trabajos que estos autores realizaron al respecto) es un estándar establecido desde hace mucho tiempo como fuente de emisión acústica artificial reproducible. Con un portaminas, una mina de lápiz de dureza 2H, 0.5 mm de diámetro y 3 mm de longitud, se presiona firmemente contra la muestra bajo investigación en un ángulo de 30° hasta que se rompe. Durante la aplicación de presión con la mina, la superficie de la muestra se deforma. En el momento de la rotura de la mina, la tensión acumulada se libera repentinamente, lo que provoca un desplazamiento microscópico de la superficie y provoca una onda acústica que se propaga a través de la estructura de la muestra. Dado que este tipo de fuente es fácil de manejar en entornos de laboratorio, así como en pruebas de campo, se convirtió en el tipo de fuente de prueba más común en las pruebas de EA (Sause, 2011). La **Figura 236** representa el proceso de realización de la prueba PLB.

En la **Figura 237** se aprecia la señalización que indica el lugar exacto de la probeta en que debía realizarse la rotura de la mina de lápiz, señalado con una “M” de color verde. También se aprecian las marcas de los lugares exactos en que debían ser colocados los sensores 1 y 2 (señalizados como S₁ y S₂), así como las líneas que indicaban hasta donde debían llegar las mordazas de la máquina de ensayos.



Figura 237. Probetas señalizadas listas para el ensayo

De acuerdo a las indicaciones de las normas *ISO 22157:2004 - Bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas* y *UNE-EN 408:2011+ A1:2012 – Estructuras de madera. Madera aserrada y madera laminada encolada para uso estructural. Determinación de algunas propiedades físicas y mecánicas*, todas las muestras se sometieron a una prueba monótona a una velocidad de desplazamiento constante igual a 0.6 mm/min con una máquina multifunción IBERTEST®.

Durante las pruebas, junto con la carga y el desplazamiento relativo de las pinzas, los cuatro sensores registraron la EA mediante el equipo ANSY-5 de Vallen Systeme. El umbral de adquisición se estableció en 35 dB y los preamplificadores se configuraron con una ganancia de

34 dB. Las señales EA se adquirieron con una frecuencia de muestreo de 5 MS/s (megamuestras por segundo), es decir, una muestra cada 0.2 μ s, una longitud previa al disparo de 200 μ s y una longitud de página resultante (después del disparo) de 819 μ s. Para evitar ruidos mecánicos y electromagnéticos, el rango de frecuencia de las señales se limitó mediante filtros digitales durante la adquisición (entre 50 kHz y 500 kHz).

En la **Figura 239** se observa una probeta en la máquina de ensayos con los cuatro sensores de EA modelo VS45-H colocados en sus respectivas posiciones.



Figura 239. Probeta en la máquina de ensayos con los cuatro sensores VS45-H

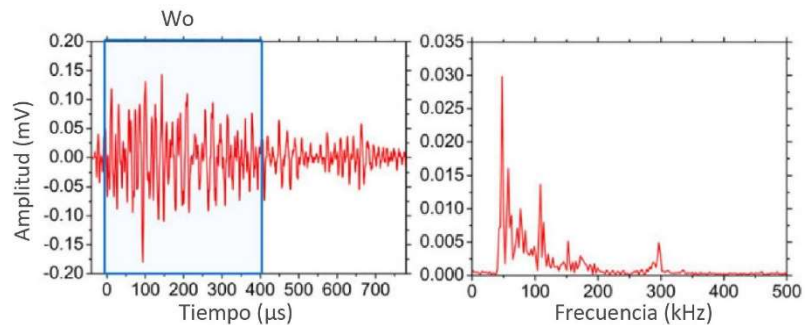


Figura 238. Señal EA registrada durante la prueba en la muestra UN1. Izquierda: Definición de la señal y de la ventana temporal (W_0). Derecha: Magnitud del espectro.

La **Figura 238** muestra, a modo de ejemplo, la señal de emisión acústica registrada durante el ensayo de la probeta UN1 y su espectro.

Para cada señal, se obtuvieron las características tradicionales de EA, incluida la amplitud máxima en dB (A), la duración (Dur) y la energía de la señal (E). Pero también se analizaron otras características. De entre ellas, la que proporcionó los resultados más relevantes fue la frecuencia centroide (también conocida como centro de gravedad del espectro), definida en la **Ecuación 1** como:

$$CoG = \frac{\sum_{[50-500]kHz} S f}{\sum_{[50-500]kHz} S} \quad \text{Ecuación 1}$$

donde f es la frecuencia y S es la magnitud de la FFT (Transformada Rápida de Fourier) de la señal. La suma se extiende a todo el rango de frecuencias limitado por los filtros de adquisición.

Además, para evitar la reverberación de la señal en la muestra, el CoG se calculó exclusivamente para la primera porción temporal de cada señal después del cruce del umbral inicial, con una duración de $W_0 = 400 \mu$ s (2000 muestras), como se muestra en la **Figura 238**.

Para cada muestra, se llevó a cabo la localización lineal de la actividad EA. El origen de las coordenadas ($x = 0$) se ubicó en el centro de la probeta y se utilizó 380 cm/ms como velocidad de propagación. Esta velocidad se determinó experimentalmente mediante PLB antes de las pruebas. Los sensores 3 y 4 se configuraron como sensores guarda.

3.3.2.2. Equipos e instrumentación

Todas las probetas se monitorizaron con Emisión Acústica (EA). El objetivo principal de este proceso fue el de establecer una correlación entre los distintos patrones de rotura y los resultados de EA obtenidos. La **Figura 240** muestra un esquema del funcionamiento del ensayo de EA, cuyo proceso es el siguiente:

- Se produce un esfuerzo que provoca una liberación espontánea de energía elástica en forma de onda.
- La onda elástica se propaga dentro del material y, eventualmente, alcanza la superficie del mismo. Esta onda es captada por los sensores, que la convierten en señal eléctrica, medida en voltios.
- Dado que la señal tiene una amplitud muy baja, se usan preamplificadores para incrementar la intensidad de la señal de EA.
- El sistema de adquisición de datos recibe la señal de EA de los preamplificadores. Este equipo se encarga de filtrar y acondicionar la señal, transformándola en un conjunto de datos electrónicos que transmite al ordenador.
- El ordenador almacena los datos y los procesa por medio de programas para la visualización e interpretación de los resultados.

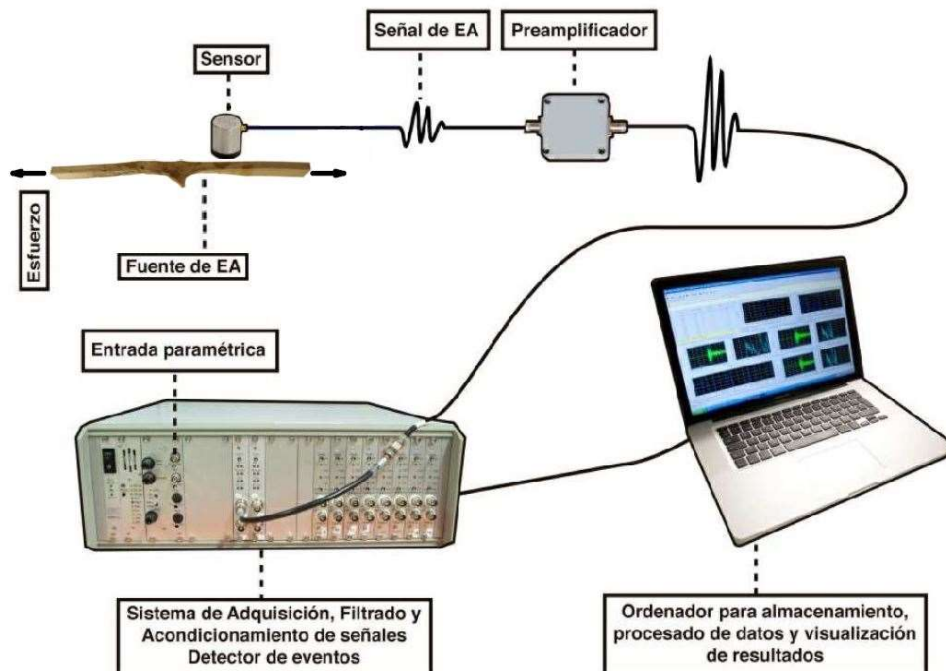


Figura 240. Esquema del ensayo de EA.
Fuente: Adaptada de Moreno Bazán (2015).

Cada probeta se equipó con cuatro sensores piezoeléctricos (sensores de EA) multirresonantes VS45-H de Vallen Systeme. La **Figura 241** muestra la curva de sensibilidad de dichos sensores en función de la frecuencia y la banda de frecuencia digital seleccionada para los filtros de adquisición (entre 50 kHz y 500 kHz). En la imagen se pueden ver tres zonas de alta y máxima sensibilidad alrededor de las frecuencias de 100 kHz, 150 kHz y 300 kHz.

La **Tabla 22** recoge las principales características del sensor VS45-H de Vallen Systeme.

En comparación con los clásicos sensores resonantes de 150 kHz utilizados en los estudios de Chen [(Chen, *et al.*, 2018a) y (Chen, *et al.*, 2018b)], la sensibilidad de los sensores VS45-H es superior o igual a -65 dB re $1 \text{ V}/\mu\text{bar}$ en varios rangos de frecuencias: [70–120] kHz, 150 kHz y [170–330] kHz . Este hecho permite el uso de un análisis basado en la frecuencia para evaluar el proceso de fractura de las probetas.

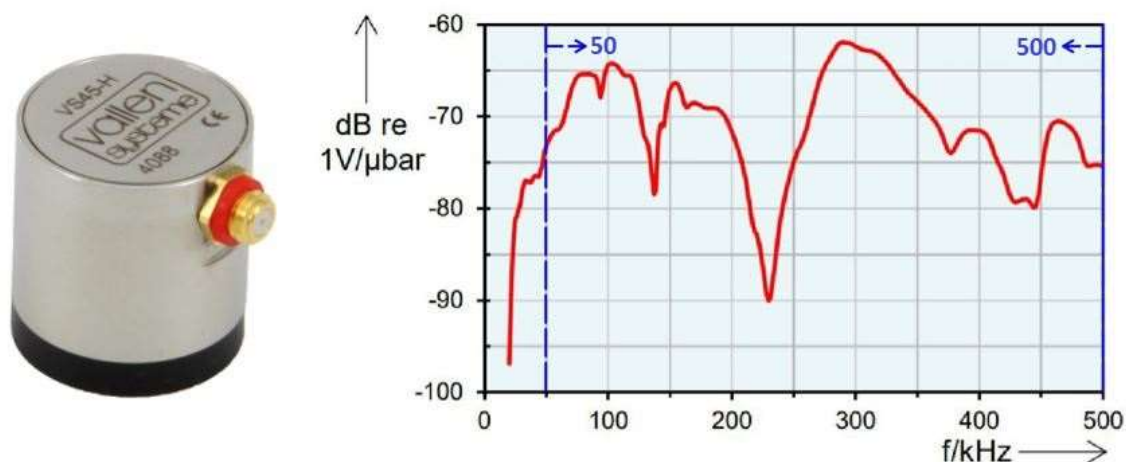


Figura 241. Sensor VS45-H de Vallen Systeme y curva de sensibilidad del mismo.
Líneas azules: Frecuencias de corte de los filtros de adquisición.
Fuente: Adaptada de Vallen Systeme.

Tabla 22. Características del sensor VS45-H de Vallen Systeme.
Fuente: Vallen Systeme.

Características del sensor VS45-H de Vallen Systeme			
Rango de frecuencias [kHz]	20-500	Rango de temperatura [°C]	-20 a +100
Frecuencia pico [kHz]	275	Peso [g]	22
Tamaño [mm]	20.3 x 22	Capacitancia [pF]	270

La **Tabla 23** indica los números de serie correspondientes a los sensores utilizados. La posición de cada uno de ellos se mantuvo en todos los ensayos realizados.

Tabla 23. Números de serie de los sensores VS45-H utilizados en el ensayo.

Sensor	Número de serie
S1	4015
S2	4016
S3	4014
S4	4017

Para garantizar que la sensibilidad del sensor fuese lo más alta posible a la hora de captar la onda EA, se dispuso un acoplante entre el sensor y la muestra, optimizando así la transmisión acústica entre el bambú y el sensor.

Si no se emplease acoplante, podría generarse una capa de aire en la interfase, lo que conllevaría un salto grande en la impedancia acústica⁵⁷. El acoplante actúa adaptando la impedancia acústica entre el sensor y la superficie de material de ensayo (Martínez Jiménez, 2016).

Siempre debe emplearse un acoplante adecuado para los sensores utilizados, que no corra la superficie del elemento y que funcione adecuadamente a la temperatura de trabajo. En este estudio, tras la limpieza de las superficies del espécimen y del sensor, se aplicó como acoplante grasa de silicona Loctite LB 8104 (**Figura 242**).



Figura 242. Grasa de silicona Loctite LB 8104 utilizada como acoplante en los ensayos.

Fuente: Xtrack.

El montaje, al igual que el acoplante, tiene una gran influencia sobre el funcionamiento del sensor, es decir, sobre su sensibilidad y respuesta en frecuencia. Los dos métodos más empleados para su montaje son: mediante el uso de un adhesivo o mediante compresión (Martínez Jiménez, 2016).

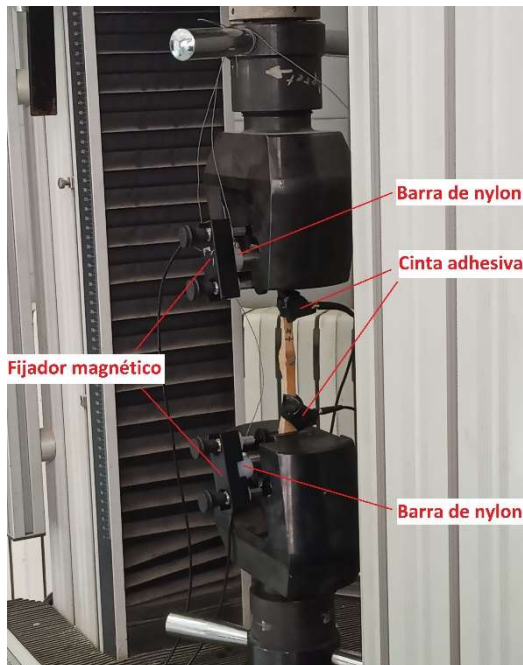


Figura 243. Montaje de los sensores en los ensayos.

Debido al reducido tamaño de las muestras, los sensores S1 y S2 se fijaron a las probetas de bambú (además de con la grasa de silicona ya mencionada) mediante cinta adhesiva. En cambio, los sensores S3 y S4 que actuaban como sensores guarda y que, por tanto, estaban fijados en las mordazas de la máquina de ensayos, se aseguraron mediante compresión, empleando para ello fijadores magnéticos y barras de nylon del mismo diámetro que el sensor.

En la **Figura 243** se muestra el sistema de montaje empleado durante los ensayos, con identificación de los distintos tipos de sujeción que se utilizaron y los elementos que los componen.

La calidad del acoplamiento y el comportamiento adecuado de todos los elementos del circuito electrónico de los 4 canales se verificaron antes y después de cada ensayo mediante pruebas PLB.

Los sensores transmiten la señal eléctrica generada a través de un elemento de conexión que llevan en su carcasa. Dado que dicha señal es muy débil (es decir, tiene poca amplitud y alta impedancia), debe ser transportada hasta un preamplificador. Debido a la vulnerabilidad que presenta la señal frente al ruido, la longitud del cable de conexión entre el sensor y el preamplificador (denominado cable sensor-preamplificador) debe ser relativamente corta. En este ensayo se empleó un cable de 1.20 m de largo (**Figura 244**).

Los preamplificadores transforman las señales de alta impedancia que reciben en señales de baja impedancia, que sólo experimentan pérdidas mínimas al transmitirse por cables largos (coaxiales). Además, amplifican la señal de EA a un rango de voltajes adecuado para su registro y procesado por el equipo de EA, siendo también menos vulnerable al ruido (Martínez Jiménez, 2016).

⁵⁷ Resistencia que opone un medio a las ondas que se propagan sobre éste.



Figura 244. Transmisión de la señal desde el sensor al preamplificador.
Izquierda: Cable sensor-preamplificador de 1.20 m de longitud.
Derecha: Preamplificador AEP4 de Vallen Systeme.
Fuente: Adaptada de Martínez Jiménez (2016).

Los preamplificadores utilizados en los ensayos fueron de tipo externo (es decir, no integrados en el sensor) del modelo AEP4 de Vallen Systeme, con una ganancia de 34 dB (**Figura 244**).

Una vez amplificada, la señal es transmitida desde los preamplificadores hasta el equipo de adquisición de EA a través de cables coaxiales. Este cable, a diferencia del cable que conecta el sensor con el preamplificador, puede tener hasta varios cientos de metros sin que se produzca una pérdida importante en la señal, pero en ningún caso debe tener una impedancia distinta a la del resto del circuito (Moreno Bazán, 2015). En el ensayo se emplearon cables coaxiales BNC (*Bayonet Neill-Concelman*) de 50 Ω de impedancia (**Figura 245**).



Figura 245. Cable coaxial BNC.
Fuente: Martínez Jiménez (2016).

Las señales de EA se adquirieron con el equipo AMSY-5 de Vallen Systeme (**Figura 246**) del grupo de investigación IDIE de la UGR (TEP 232 Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación), que consta de 8 módulos ASIPP (*Acoustic Signal Pre-Processor*) a los que se conectan los cables coaxiales (dos canales por módulo, es decir, 16 canales de entrada en total). En los ensayos se utilizaron sólo 2 módulos ASIPP (4 canales en total). La función del equipo es la de registrar y acondicionar las señales para su posterior visualización en la pantalla de un ordenador.

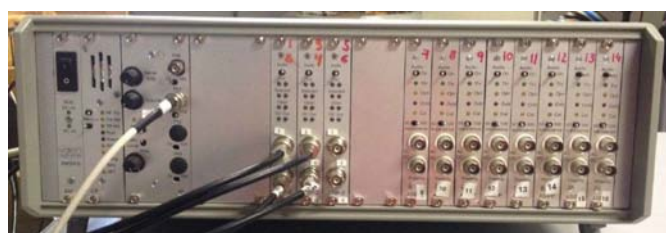


Figura 246. Equipo Vallen Systeme AMSY-5 utilizado para registrar la EA.
Fuente: Moreno Bazán (2015).

Una vez registrada la señal de EA, se procede a su almacenamiento y procesamiento en el ordenador. Cualquier ordenador es válido para realizar este proceso siempre que tenga instalado el *software* Vallen Systeme, de modo que se puedan visualizar los resultados para la extracción de parámetros característicos y su posterior análisis.

La **Figura 247** muestra el ordenador portátil utilizado en los ensayos de EA (Toshiba Harman Kardon) y una ventana del programa empleado para la visualización e interpretación de los datos obtenidos (Vallen VisualAE).

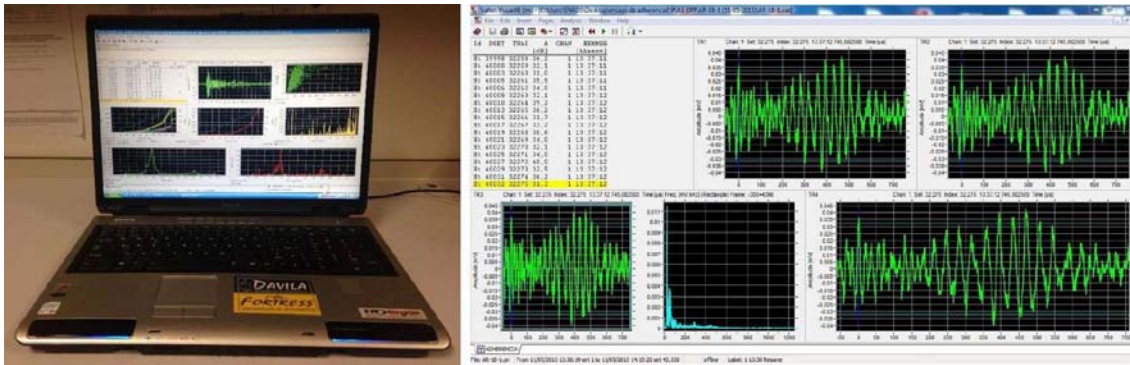


Figura 247. Procesamiento de la señal.

Izquierda: Portátil utilizado en los ensayos de EA.

Derecha: Ventana del programa utilizado para interpretar las señales de EA.

Fuente: Adaptado de Martínez Jiménez (2016) y Moreno Bazán (2015).

El objetivo principal de este proceso fue el de establecer una correlación entre los distintos patrones de rotura y los resultados de EA obtenidos.

Los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras se realizaron en una máquina de ensayos universal electromecánica de la marca IBERTEST®, modelo TESTRONIC-100-MD2, con doble espacio de ensayo y una fuerza máxima de 100 kN, perteneciente a la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de Granada. La configuración de la máquina fue la misma que para un ensayo de tracción de barras de acero, anclándose con mordazas la probeta de bambú en su parte superior e inferior. Todas las probetas se ensayaron mediante control de desplazamiento con una velocidad constante de 0.6 mm/min.

La **Figura 248** muestra la prensa IBERTEST® utilizada, así como una pantalla del *software* para máquinas de ensayo: Zona Testronic-100-MD2 (100kN), empleado para registrar los resultados.



Figura 248. Ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de la *Bambusa vulgaris* Vulgaris

Izquierda: Máquina de ensayos universal electromecánica IBERTEST®, modelo TESTRONIC-100-MD2.

Derecha: Pantalla del *software* para máquinas de ensayo: Zona Testronic-100-MD2 (100kN).

3.3.3. ELABORACIÓN DE ESPECÍMENES DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

En este apartado se recoge información sobre la elaboración de los especímenes necesarios de *Guadua angustifolia Kunth* utilizados posteriormente en los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras, tracción vertical paralela a las fibras y flexión en cuatro puntos que se realizaron a dicha especie, cuyo desarrollo se explica más adelante. También se definen los equipos e instrumentos utilizados en la elaboración de los especímenes.

3.3.3.1. Procedimiento

Para la elaboración de los especímenes de *Guadua angustifolia Kunth* de los ensayos de compresión y tracción se siguieron las indicaciones de la norma *ISO 22157:2019 – Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú. Métodos de ensayo*, mientras que, para los ensayos de flexión, se definieron probetas elaboradas a partir de secciones de la pared del culmo, dado que no se disponía de culmos con longitud suficiente como para seguir las indicaciones de la *ISO 22157:2019*.

Se extrajeron muestras para tres tipos de pruebas: compresión (C), tracción (T) y flexión (F), tanto de los elementos de bambú almacenados en la cámara climática (C) como de los ubicados al aire libre (O). El estudio también incluye como variable de análisis la existencia o no de un nudo en el centro de la muestra.

Aunque se hubiera deseado un mayor número de muestras por su carácter biológico, debido a la limitada disponibilidad de este material, sólo se ensayaron 18 probetas por cada caso, cifra, en principio, suficiente para un estudio comparativo inicial.

La **Tabla 24** recoge los ensayos realizados y la nomenclatura correspondiente a los cuatro tipos de probetas elaboradas para cada uno de ellos.

Tabla 24. Ensayos realizados y nomenclatura de cada tipo de probeta. 18 muestras ensayadas para cada caso.

Ensayo	Exposición	Nudo	Nomenclatura
Compresión	Cámara climática (Control)	No	C_C
	Cámara climática (Control)	Sí	C_C_N
	Aire libre	No	C_O
	Aire libre	Sí	C_O_N
Tracción	Cámara climática (Control)	No	T_C
	Cámara climática (Control)	Sí	T_C_N
	Aire libre	No	T_O
	Aire libre	Sí	T_O_N
Flexión	Cámara climática (Control)	No	F_C
	Cámara climática (Control)	Sí	F_C_N
	Aire libre	No	F_O
	Aire libre	Sí	F_O_N

- **Compresión vertical paralela a las fibras**

De acuerdo con la norma *ISO 22157:2019*, se seleccionaron culmos con un diámetro promedio de 103 ± 3.8 mm y un espesor de pared promedio de 11.2 ± 1.6 mm, siendo el espesor de pared

el parámetro utilizado para determinar la longitud de la muestra. Con el objetivo de tener una mayor homogeneidad en las probetas, la longitud se estableció de acuerdo con la muestra más desfavorable, a partir de la cual se mecanizaron probetas de 110 mm de longitud (**Figura 249**).

Durante el mecanizado se tuvo especial cuidado para asegurar que las caras de aplicación de la carga fuesen paralelas entre sí y perpendiculares a la dirección del culmo. En el caso de muestras anudadas, el mecanizado se realizó asegurando que el nudo estuviera centrado en la longitud de la muestra.

La **Figura 249** las dimensiones (en mm) de las probetas sometidas al ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.



Figura 249. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

Las siguientes tablas recogen la nomenclatura y dimensiones de las probetas elaboradas de *Guadua angustifolia* Kunth para los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras, incluyendo las muestras almacenadas en cámara climática sin nudo (**Tabla 25**) y con nudo (**Tabla 26**) y las expuestas al aire libre sin nudo (**Tabla 27**) y con nudo (**Tabla 28**).

La primera letra del nombre de cada probeta indica el tipo de ensayo (C, compresión) y la segunda la ubicación en la que permaneció el culmo durante el período de 2 años, siendo “C” en cámara climática y “O” al aire libre. El primer número corresponde al número de la caña de la que se extrajo la probeta y el segundo número indica el número de probeta.

El diámetro externo de cada probeta se calculó como promedio del diámetro externo medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la muestra y en el centro de la misma, coincidiendo esta ubicación con el nudo en el caso de las probetas provistas de nudo.



Figura 250. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

El espesor de la pared de la probeta se calculó como promedio del espesor de cada muestra medido en 4 puntos: dos puntos opuestos entre sí en un extremo de la muestra y dos puntos opuestos entre sí en el otro extremo de la misma.

La **Figura 250** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes probetas empleadas en el ensayo de compresión paralela a las fibras de *Guadua angustifolia Kunth*.

Tabla 25. Características de las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

Nombre	Diámetro externo (mm)	Espesor de la pared (mm)	Ratio espesor ext/int	Área de la probeta (mm ²)
C_C_01_01	106,04	10,04	1,06	3026,64
C_C_01_02	107,36	10,36	1,04	3155,58
C_C_01_03	103,25	8,71	1,19	2586,25
C_C_01_04	106,86	10,00	1,07	3043,05
C_C_02_01	99,94	12,84	0,78	3514,16
C_C_02_02	101,55	13,53	0,75	3741,94
C_C_03_01	101,43	9,66	1,05	2784,27
C_C_03_02	104,25	8,85	1,18	2653,00
C_C_03_03	102,65	9,79	1,05	2856,02
C_C_03_04	105,36	9,46	1,11	2848,64
C_C_03_05	103,16	9,16	1,13	2705,80
C_C_04_01	96,40	9,84	0,98	2675,35
C_C_04_02	95,41	10,33	0,92	2759,90
C_C_04_03	97,15	10,33	0,94	2817,65
C_C_05_01	103,14	9,25	1,12	2727,66
C_C_05_02	97,66	8,63	1,13	2414,32
C_C_05_03	100,75	9,41	1,07	2699,49
C_C_05_04	99,00	8,66	1,14	2456,61
Promedio	101,74	9,93	1,04	2859,24

Tabla 26. Características de las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

Nombre	Diámetro externo (mm)	Espesor de la pared (mm)	Ratio espesor ext/int	Área de la probeta (mm ²)
C_C_N_01_01	108,49	10,62	1,02	3263,94
C_C_N_01_02	109,01	10,94	1,00	3371,37
C_C_N_01_03	109,60	10,63	1,03	3305,00
C_C_N_01_04	109,69	11,63	0,94	3582,11
C_C_N_01_05	108,21	11,17	0,97	3404,06
C_C_N_02_01	93,53	11,75	0,80	3019,48
C_C_N_02_02	95,45	12,18	0,78	3185,18
C_C_N_03_01	103,86	10,67	0,97	3123,80
C_C_N_03_02	104,98	10,45	1,00	3103,28
C_C_N_03_03	107,58	9,95	1,08	3052,49
C_C_N_03_04	103,99	9,72	1,07	2877,23
C_C_N_03_05	106,95	9,50	1,13	2909,00
C_C_N_04_01	91,53	10,65	0,86	2705,64
C_C_N_05_01	101,61	9,47	1,07	2739,95
C_C_N_05_02	98,53	9,01	1,09	2533,39
C_C_N_05_03	103,54	9,16	1,13	2716,64
C_C_N_05_04	104,80	9,73	1,08	2905,97
C_C_N_05_05	97,27	9,43	1,03	2601,76
Promedio	103,26	10,37	1,00	3022,24

Tabla 27. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

Nombre	Diámetro externo (mm)	Espesor de la pared (mm)	Ratio espesor ext/int	Área de la probeta (mm ²)
C_O_04_01	105,00	10,88	0,97	3215,65
C_O_04_02	105,68	11,68	0,90	3449,86
C_O_04_03	108,43	13,73	0,79	4085,58
C_O_04_04	104,42	10,97	0,95	3220,06
C_O_04_05	104,39	12,04	0,87	3493,12
C_O_10_01	100,73	9,92	1,02	2829,42
C_O_10_02	100,57	9,65	1,04	2755,19
C_O_10_03	101,25	9,23	1,10	2668,85
C_O_11_01	102,72	8,98	1,14	2643,97
C_O_11_02	100,98	8,69	1,16	2518,81
C_O_11_03	99,36	8,60	1,16	2452,13
C_O_11_04	99,15	8,06	1,23	2305,29
C_O_13_01	94,89	9,70	0,98	2595,34
C_O_13_02	95,59	9,57	1,00	2586,19
C_O_13_03	94,89	9,36	1,01	2515,63
C_O_14_01	99,63	13,97	0,71	3759,03
C_O_14_02	99,45	15,79	0,63	4149,85
C_O_14_03	100,98	14,08	0,72	3843,33
Promedio	101,01	10,83	0,97	3060,41

Tabla 28. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo expuestas al aire libre del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

Nombre	Diámetro externo (mm)	Espesor de la pared (mm)	Ratio espesor ext/int	Área de la probeta (mm ²)
C_O_N_03_01	90,82	14,26	0,64	3429,48
C_O_N_03_02	91,57	13,66	0,67	3343,80
C_O_N_03_03	91,08	14,18	0,64	3425,72
C_O_N_04_01	105,45	11,90	0,89	3497,88
C_O_N_04_02	104,98	11,23	0,93	3307,63
C_O_N_04_03	103,57	11,39	0,91	3298,57
C_O_N_04_04	108,18	12,84	0,84	3846,34
C_O_N_04_05	103,66	11,84	0,88	3414,00
C_O_N_09_01	102,40	11,28	0,91	3228,41
C_O_N_10_01	102,18	10,36	0,99	2987,29
C_O_N_10_02	102,13	9,51	1,07	2766,61
C_O_N_10_03	101,16	9,50	1,06	2736,35
C_O_N_11_01	102,18	10,23	1,00	2954,60
C_O_N_11_02	99,50	8,67	1,15	2473,99
C_O_N_11_03	100,68	9,17	1,10	2635,61
C_O_N_11_04	100,63	8,99	1,12	2587,63
C_O_N_13_01	98,01	10,80	0,91	2957,77
C_O_N_13_02	97,89	10,56	0,93	2896,59
Promedio	100,34	11,13	0,92	3099,35

- **Tracción vertical paralela a las fibras**

El mecanizado de las muestras de tracción se realizó según la norma ISO 22157:2019, que establece que el ancho de la probeta debe ser igual al espesor de la pared del culmo (δ), mientras que el grosor de la probeta debe ser menor que la mitad del espesor de la pared del culmo ($\delta/2$) y, a la vez, menor de 20 mm.

El ancho promedio de las probetas fue de 9.8 ± 1.7 mm. Siguiendo las recomendaciones de la norma ISO 22157: 2019, con el fin de evitar deslizamientos o aplastamientos de la muestra, y para reducir tensiones en la zona de agarre, se dispusieron lengüetas de madera de conífera de 70 mm de longitud en los extremos de las probetas. Las lengüetas de pino se pegaron a las muestras mediante un adhesivo comercial de cianoacrilato⁵⁸. La longitud libre entre lengüetas era de 100 mm, por lo que todas las probetas tenían una longitud total de 240 mm.

Durante el mecanizado se tuvo especial cuidado para asegurar que la orientación general de las fibras fuese paralela al eje longitudinal de la porción libre de la probeta. En el caso de los especímenes anudados, el nudo se ubicó siempre en el centro geométrico de cada probeta.

La **Figura 251** muestra las dimensiones (en mm) de las probetas sometidas al ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

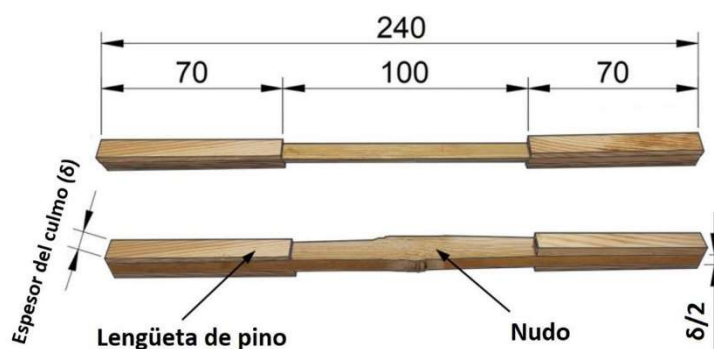


Figura 251. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Las siguientes tablas recogen la nomenclatura y dimensiones de las probetas elaboradas de *Guadua angustifolia* Kunth para los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras, incluyendo las muestras almacenadas en cámara climática sin nudo (**Tabla 29**) y con nudo (**Tabla 30**) y las expuestas al aire libre sin nudo (**Tabla 31**) y con nudo (**Tabla 32**).

La primera letra del nombre de cada probeta indica el tipo de ensayo (T, tracción) y la segunda la ubicación en la que permaneció el culmo durante el período de 2 años, siendo “C” en cámara climática y “O” al aire libre. El primer número corresponde al número de la caña de la que se extrajo la probeta y el segundo número indica el número de probeta.

El ancho de cada probeta se calculó como promedio del ancho medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la muestra y en el centro de la misma, coincidiendo esta ubicación con el

⁵⁸ El cianoacrilato es un adhesivo monocomponente de fraguado rápido, de ahí que también se llamen instantáneos. Su mecanismo de endurecimiento es por absorción de la humedad ambiental, que genera una rápida reacción de curado. Entre sus características destaca una gran adherencia a diferentes materiales y buena resistencia química, térmica y a esfuerzos mecánicos (Ruta 401, 2016).

nudo en el caso de las probetas provistas de nudo. Las medidas se realizaron antes de incorporar las lengüetas de madera de pino a las probetas.

El espesor de la pared de la probeta se calculó como promedio del espesor de cada muestra medido en 3 puntos: en cada uno de los extremos de la muestra y en el centro de la misma, coincidiendo esta ubicación con el nudo en el caso de las probetas provistas de nudo. Las medidas se realizaron antes de incorporar las lengüetas de madera de pino a las probetas.

La **Figura 252** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes probetas empleadas en el ensayo de tracción paralela a las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth.

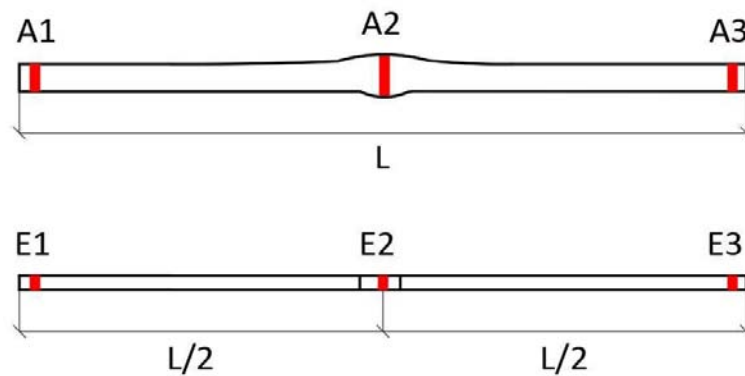


Figura 252. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Tabla 29. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Nombre	Ancho de la probeta (mm)	Espesor de la probeta (mm)	Área de la probeta (mm ²)
T_C_04_04	9,92	5,21	51,68
T_C_12_02	9,88	3,60	35,56
T_C_12_03	9,15	3,76	34,43
T_C_15_01	8,49	7,08	60,11
T_C_20_05	8,65	4,08	35,31
T_C_20_06	8,40	4,16	34,97
T_C_20_07	8,15	4,07	33,20
T_C_20_08	8,42	4,08	34,34
T_C_20_09	8,69	4,11	35,70
T_C_20_11	8,19	3,63	29,72
T_C_22_02	9,13	6,44	58,75
T_C_24_01	10,53	6,17	64,91
T_C_24_03	10,52	5,95	62,54
T_C_24_04	11,26	5,99	67,48
T_C_24_07	10,91	5,87	64,02
T_C_24_08	10,89	6,06	65,96
T_C_24_10	10,16	5,88	59,76
T_C_24_11	10,26	5,98	61,39
Promedio	9,53	5,12	49,44

Tabla 30. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Nombre	Ancho de la probeta (mm)	Espesor de la probeta (mm)	Área de la probeta (mm ²)
T_C_N_06_01	10,06	4,38	44,01
T_C_N_06_02	10,79	4,31	46,54
T_C_N_09_01	9,75	3,30	32,14
T_C_N_11_01	10,48	4,59	48,12
T_C_N_11_03	11,02	4,61	50,75
T_C_N_11_04	11,34	4,39	49,74
T_C_N_11_05	11,12	4,30	47,76
T_C_N_11_06	10,83	4,59	49,69
T_C_N_11_07	11,68	4,20	49,09
T_C_N_12_01	10,11	4,51	45,58
T_C_N_12_02	12,17	4,42	53,79
T_C_N_12_03	13,91	4,22	58,65
T_C_N_12_04	11,87	4,56	54,09
T_C_N_18_01	9,86	6,51	64,20
T_C_N_18_02	10,37	6,83	70,82
T_C_N_23_01	11,88	5,06	60,11
T_C_N_23_02	12,55	5,20	65,28
T_C_N_23_04	11,95	5,01	59,83
Promedio	11,21	4,72	52,79

Tabla 31. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Nombre	Ancho de la probeta (mm)	Espesor de la probeta (mm)	Área de la probeta (mm ²)
T_O_20_01	7,49	6,19	46,34
T_O_20_02	7,87	6,72	52,89
T_O_58_02	7,21	4,48	32,26
T_O_58_03	7,30	4,46	32,60
T_O_58_06	7,77	4,52	35,15
T_O_61_03	8,28	4,22	34,94
T_O_61_04	8,58	4,27	36,67
T_O_95_01	8,79	5,30	46,58
T_O_95_02	9,50	5,37	51,03
T_O_107_02	8,10	3,91	31,66
T_O_107_03	7,48	4,61	34,50
T_O_107_05	7,36	4,64	34,15
T_O_107_06	8,13	4,63	37,64
T_O_107_07	7,60	4,61	35,04
T_O_107_08	7,69	4,64	35,64
T_O_107_10	7,40	3,98	29,49
T_O_107_11	7,13	4,21	29,99
T_O_107_12	7,05	4,20	29,60
Promedio	7,82	4,72	37,01

Tabla 32. Características de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo expuestas al aire libre del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Nombre	Ancho de la probeta (mm)	Espesor de la probeta (mm)	Área de la probeta (mm ²)
T_O_N_06_01	8,70	4,50	39,14
T_O_N_23_03	9,65	4,75	45,79
T_O_N_61_01	10,90	4,91	53,54
T_O_N_61_02	10,88	4,42	48,13
T_O_N_90_01	9,30	6,81	63,28
T_O_N_90_02	8,97	7,30	65,51
T_O_N_95_03	11,90	4,29	51,04
T_O_N_95_04	12,32	4,29	52,85
T_O_N_95_05	12,20	4,17	50,87
T_O_N_100_01	11,68	4,67	54,58
T_O_N_100_02	12,05	4,70	56,59
T_O_N_100_03	12,43	4,76	59,18
T_O_N_100_04	12,57	4,71	59,26
T_O_N_100_05	10,39	4,65	48,33
T_O_N_100_07	12,18	4,57	55,64
T_O_N_100_08	11,85	4,46	52,87
T_O_N_100_09	11,61	4,71	54,67
T_O_N_100_10	12,29	4,77	58,60
Promedio	11,22	4,86	53,88

- **Flexión**

En el ensayo de flexión de 4 puntos, el espesor de las probetas coincidía con el espesor de la pared del culmo (δ), mientras que el ancho se estableció como 2δ . El espesor y la anchura de las muestras mecanizadas fueron respectivamente 8.4 ± 0.9 mm y 16.1 ± 1.6 mm. La longitud total de las probetas fue de 340 mm.

Durante el mecanizado se tuvo especial cuidado para asegurar que la orientación general de las fibras fuese paralela al eje longitudinal de la porción de culmo correspondiente. En el caso de los especímenes anudados, el nudo se ubicó siempre en el centro geométrico de cada probeta.

La **Figura 253** muestra las dimensiones (en mm) de las probetas sometidas al ensayo de flexión.

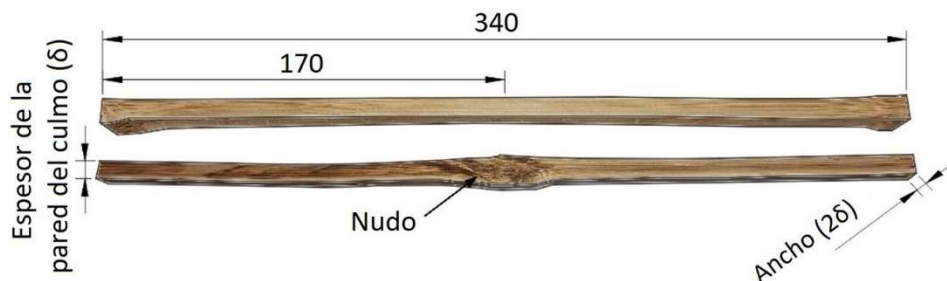


Figura 253. Dimensiones (en mm) de las probetas del ensayo de flexión en 4 puntos.

Las siguientes tablas recogen la nomenclatura y dimensiones de las probetas elaboradas de *Guadua angustifolia* Kunth para los ensayos de flexión, incluyendo las muestras almacenadas en

cámara climática sin nudo (**Tabla 33**) y con nudo (**Tabla 34**) y las expuestas al aire libre sin nudo (**Tabla 35**) y con nudo (**Tabla 36**).

La primera letra del nombre de cada probeta indica el tipo de ensayo (F, flexión) y la segunda la ubicación en la que permaneció el culmo durante el período de 2 años, siendo “C” en cámara climática y “O” al aire libre. El primer número corresponde al número de la caña de la que se extrajo la probeta y el segundo número indica el número de probeta.

Debido a que en las muestras anudadas la sección varía mucho entre los puntos de aplicación de la carga, la distribución de tensiones en el espécimen no es constante. Por este motivo, se calculó la tensión en dos regiones diferentes de las probetas: I) en el área de los puntos de aplicación de la carga; II) en el centro geométrico de la probeta.

Para poder determinar la tensión en los lugares mencionados, el ancho de cada probeta se calculó dos veces:

- Para conocer la tensión en el área de los puntos de aplicación de la carga, el ancho se calculó como promedio del ancho medido en 4 puntos del espécimen: en cada uno de los extremos de la probeta y a 1/4 de distancia (con respecto a la longitud de la muestra) de cada extremo.
- Para conocer la tensión en el centro de la probeta, se midió el ancho de la misma en su centro geométrico, coincidiendo esta ubicación con el nudo en el caso de las probetas anudadas.

De igual modo, también el espesor de cada probeta se calculó dos veces:

- Para conocer la tensión en el área de los puntos de aplicación de la carga, el espesor se calculó como promedio del espesor medido en 4 puntos del espécimen: en cada uno de los extremos de la probeta y a 1/4 de distancia (con respecto a la longitud de la muestra) de cada extremo.
- Para conocer la tensión en el centro de la probeta, se midió el espesor de la misma en su centro geométrico, coincidiendo esta ubicación con el nudo en el caso de las probetas anudadas.

La **Figura 254** representa la ubicación donde fue tomada cada medida en las diferentes probetas empleadas en el ensayo de flexión de *Guadua angustifolia* Kunth.

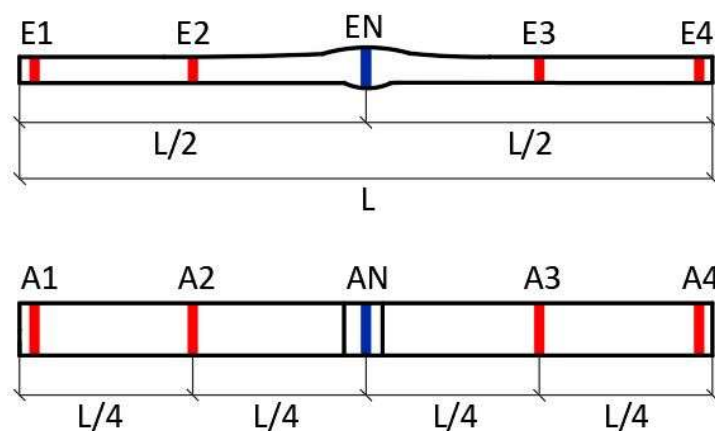


Figura 254. Ubicación de los puntos donde fueron tomadas las medidas en las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth del ensayo de flexión.

Tabla 33. Características de las probetas de GaK sin nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de flexión.

Nombre	Ancho normal de la probeta (mm)	Ancho de la probeta en el centro (mm)	Espesor normal de la probeta (mm)	Espesor de la probeta en el centro (mm)	Área normal de la probeta (mm ²)	Área de la probeta en el centro (mm ²)
F_C_03_01	20,01	22,73	9,68	9,38	193,70	213,21
F_C_03_02	16,00	16,10	9,90	9,57	158,32	154,08
F_C_05_01	17,41	17,12	9,43	9,30	164,09	159,22
F_C_05_02	17,18	16,81	8,14	7,59	139,76	127,59
F_C_08_01	14,31	14,30	8,43	7,66	120,60	109,54
F_C_08_02	13,31	12,89	7,86	8,09	104,60	104,28
F_C_16_01	16,56	17,16	7,08	6,73	117,24	115,49
F_C_19_01	14,86	14,72	7,99	7,94	118,64	116,88
F_C_19_02	18,01	18,19	8,50	7,82	152,97	142,25
F_C_19_03	14,35	13,98	8,34	7,93	119,70	110,86
F_C_21_01	15,96	16,35	7,30	7,04	116,51	115,10
F_C_21_02	14,70	14,26	7,32	6,88	107,60	98,11
F_C_21_03	15,66	15,65	7,69	7,21	120,46	112,84
F_C_21_04	15,75	16,13	8,23	7,32	129,68	118,07
F_C_21_05	17,55	17,52	7,60	7,21	133,34	126,32
F_C_26_01	15,97	16,20	6,62	6,49	105,68	105,14
F_C_26_02	20,08	19,81	7,40	7,40	148,62	146,59
F_C_26_03	18,71	18,35	8,01	6,50	149,84	119,28
Promedio	16,61	16,74	8,22	7,79	136,76	130,72

Tabla 34. Características de las probetas de GaK con nudo almacenadas en cámara climática del ensayo de flexión.

Nombre	Ancho normal de la probeta (mm)	Ancho de la probeta en el centro (mm)	Espesor normal de la probeta (mm)	Espesor de la probeta en el centro (mm)	Área normal de la probeta (mm ²)	Área de la probeta en el centro (mm ²)
F_C_N_01_01	18,44	19,10	7,58	10,79	139,75	205,994
F_C_N_01_02	17,10	17,27	9,20	11,31	157,36	195,324
F_C_N_02_01	14,75	14,37	8,07	11,49	118,98	165,111
F_C_N_05_01	15,32	15,13	9,38	14,42	143,65	218,099
F_C_N_05_02	19,41	22,35	9,54	13,68	185,15	305,748
F_C_N_07_01	13,74	13,69	8,69	13,58	119,38	185,910
F_C_N_07_02	13,96	14,20	8,50	11,75	118,68	166,85
F_C_N_07_03	13,77	13,52	8,84	14,45	121,72	195,364
F_C_N_07_04	17,01	16,90	9,26	15,32	157,56	258,824
F_C_N_10_01	18,93	19,51	10,50	15,10	198,67	294,601
F_C_N_10_02	13,75	14,32	8,65	14,06	118,86	201,339
F_C_N_10_03	14,55	14,55	8,45	15,33	122,87	222,979
F_C_N_13_01	17,15	16,94	7,58	13,42	130,00	227,335
F_C_N_15_01	16,33	16,25	9,11	16,04	148,66	260,569
F_C_N_15_02	18,59	19,19	9,02	13,16	167,66	252,540
F_C_N_21_01	14,72	14,65	8,47	12,92	124,68	189,278
F_C_N_21_02	14,72	14,30	8,60	12,62	126,59	180,466
F_C_N_22_01	17,08	17,57	9,76	17,80	166,69	312,746
Promedio	16,07	16,32	8,84	13,73	142,61	224,39

Tabla 35. Características de las probetas de GaK sin nudo expuestas al aire libre del ensayo de flexión.

Nombre	Ancho normal de la probeta (mm)	Ancho de la probeta en el centro (mm)	Espesor normal de la probeta (mm)	Espesor de la probeta en el centro (mm)	Área normal de la probeta (mm ²)	Área de la probeta en el centro (mm ²)
F_O_05_01	16,29	17,41	8,06	7,22	131,36	125,70
F_O_17_01	15,45	15,47	9,14	8,98	141,23	138,92
F_O_17_02	15,96	16,35	7,30	7,60	116,51	124,26
F_O_25_01	15,11	15,02	7,70	7,73	116,31	116,10
F_O_25_02	14,49	14,38	7,40	6,76	107,23	97,21
F_O_37_01	15,66	16,05	7,97	7,94	124,87	127,44
F_O_37_02	15,11	14,94	8,61	8,37	130,02	125,05
F_O_37_03	16,01	15,86	8,75	8,53	140,03	135,29
F_O_37_04	16,37	17,73	8,42	8,39	137,86	148,75
F_O_42_01	19,00	18,27	8,50	8,39	161,50	153,29
F_O_52_01	16,33	17,08	9,18	8,80	149,82	150,30
F_O_52_02	15,61	16,27	9,35	9,49	146,02	154,40
F_O_68_01	16,08	16,21	8,92	8,55	143,45	138,60
F_O_68_02	15,77	15,49	8,77	8,82	138,24	136,62
F_O_69_01	18,97	19,32	9,02	8,61	171,13	166,35
F_O_92_01	14,73	15,49	9,59	8,13	141,26	125,93
F_O_92_02	15,57	15,46	8,97	8,34	139,62	128,94
F_O_105_01	15,16	15,03	9,44	9,23	143,15	138,73
Promedio	15,81	16,03	8,59	8,31	135,79	133,27

Tabla 36. Características de las probetas de GaK con nudo expuestas al aire libre del ensayo de flexión.

Nombre	Ancho normal de la probeta (mm)	Ancho de la probeta en el centro (mm)	Espesor normal de la probeta (mm)	Espesor de la probeta en el centro (mm)	Área normal de la probeta (mm ²)	Área de la probeta en el centro (mm ²)
F_O_N_19_01	14,82	14,45	8,09	12,73	119,84	183,88
F_O_N_19_02	13,50	13,10	8,71	13,07	117,51	171,15
F_O_N_19_03	14,76	14,57	8,16	11,30	120,36	164,57
F_O_N_51_01	17,00	16,91	8,43	11,61	143,23	196,24
F_O_N_51_02	15,88	15,32	8,03	11,76	127,50	180,09
F_O_N_51_03	15,99	15,80	8,35	13,09	133,54	206,74
F_O_N_51_04	16,57	16,46	8,26	16,54	136,87	272,17
F_O_N_53_01	14,68	14,87	8,77	11,22	128,70	166,77
F_O_N_53_02	16,32	16,48	8,71	14,27	142,21	235,17
F_O_N_53_03	14,10	14,01	8,45	11,60	119,20	162,45
F_O_N_56_01	15,54	16,45	10,96	16,52	170,21	271,67
F_O_N_82_01	19,16	18,52	8,97	11,99	171,94	222,05
F_O_N_82_02	17,94	17,29	8,80	12,92	157,83	223,30
F_O_N_82_03	15,36	15,77	7,81	11,23	119,90	177,02
F_O_N_99_01	15,96	15,92	6,89	13,28	109,95	211,34
F_O_N_99_02	15,74	15,97	6,85	10,34	107,78	165,05
F_O_N_99_03	16,48	16,27	7,18	10,09	118,25	164,08
F_O_N_99_04	14,60	13,87	7,84	11,23	114,35	155,69
Promedio	15,80	15,67	8,29	12,48	131,06	196,08

3.3.3.2. Equipos e instrumentación

En este apartado se indican los equipos e instrumentos empleados en la elaboración de las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* sometidos a los distintos ensayos.

- **Compresión vertical paralela a las fibras**

Para elaborar las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras se señalaron sobre las cañas las dimensiones que debían tener los especímenes una vez mecanizados.

Después, mediante el uso de una combinada multifunción ROBLAND NX 310 Pro y una lijadora combinada de banda/disco de la marca JET, modelo JSG-96CS, las probetas se cortaron según el tamaño determinado (110 mm de longitud), garantizando que los planos de ambos extremos fuesen paralelos entre sí y, a su vez, perpendiculares con respecto al eje longitudinal del culmo. Ambas máquinas se muestran en la **Figura 255**.



Figura 255. Máquinas empleadas en la elaboración de las probetas de compresión.
Izquierda: Combinada multifunción ROBLAND NX 310 Pro.
Derecha: Lijadora combinada de banda/disco de la marca JET, modelo JSG-96CS.

En la **Figura 256** se observan algunas de las probetas mecanizadas para el ensayo. En la imagen se aprecia que en las muestras anudadas se conservó el diafragma.



Figura 256. Probetas mecanizadas de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras.

- **Tracción vertical paralela a las fibras**

Para elaborar las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras se señalaron sobre las latillas las dimensiones que debían tener los especímenes una vez mecanizados.

Después, mediante el uso de la combinada multifunción ROBLAND NX 310 Pro ya mencionada (**Figura 255**), las probetas se cortaron según el tamaño determinado (240 mm de longitud).

Las lengüetas de madera de pino se fabricaron utilizando una sierra de calar Bosch PST 650 equipada con una hoja para madera blanda y compuestos de madera (**Figura 232**).

Las lengüetas se unieron a las “probetas base” de bambú mediante la aplicación de adhesivo Loctite Super Glue-3. Se utilizó una esponja abrasiva de grano medio para terminar de perfilar todas las piezas. La **Figura 257** muestra ambos elementos.



Figura 257. Elementos utilizados en la fabricación de las probetas de tracción.
Izquierda: Adhesivo Loctite Super Glue-3.
Derecha: Esponja abrasiva de grano medio.
Fuente: Deskidea (Izquierda) / Almacenes de Ferretería San Rafael S.L. (Derecha)

En la **Figura 258** se observan algunas de las probetas mecanizadas para el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de *Guadua angustifolia Kunth*.



Figura 258. Probetas mecanizadas de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras.

- **Flexión**

Para elaborar las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth del ensayo de flexión se señalaron sobre las latillas las dimensiones que debían tener los especímenes una vez mecanizados.

Después, mediante el uso de la combinada multifunción ROBLAND NX 310 Pro ya mencionada (**Figura 255**), las probetas se cortaron según el tamaño determinado (340 mm de longitud). Utilizando una esponja abrasiva de grano medio (**Figura 257**) se terminaron de perfilar todos los especímenes.

En la **Figura 259** se observan algunas de las probetas mecanizadas para el ensayo de flexión.



Figura 259. Probetas mecanizadas de los ensayos de flexión.

Arriba: Probetas de la cámara climática con nudo.

Abajo: Probetas expuestas al aire libre sin nudo.

3.3.4. ENSAYOS DE COMPRESIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

3.3.4.1. Procedimiento

Una vez elaboradas los especímenes de *Guadua angustifolia Kunth* del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras, se puso en marcha el ensayo, que se realizó en una prensa hidráulica con una capacidad máxima de 2000 kN, conectada a un ordenador que registró los datos.

Se ubicó una capa intermedia entre el plato superior de la prensa y el plano superior de las probetas para minimizar la fricción y la restricción radial de los extremos de las muestras.

Siguiendo las indicaciones de la norma *ISO 22157:2019 – Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú. Métodos de ensayo*, se estableció una velocidad de control de carga de 700 N/s, asegurando que la duración del ensayo fuera de 300 ± 120 s.

La **Figura 260** muestra las probetas con nudo expuestas al aire libre del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras de la *Guadua angustifolia Kunth*.



Figura 260. Probetas del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.
Izquierda: Probetas con nudo expuestas al aire libre listas para ser ensayadas.
Derecha: Probeta con nudo expuesta al aire libre siendo ensayada.

Para todas las probetas, la tensión máxima de compresión en la dirección de la fibra $f_{c,0}$ se calculó de acuerdo con la **Ecuación 2**:

$$f_{c,0} = \frac{F_{ult}}{A} \quad \text{Ecuación 2}$$

donde F_{ult} es la carga máxima alcanzada durante la prueba y A es el área de la sección donde se aplica la carga.

3.3.4.2. Equipos e instrumentación

Los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de la *Guadua angustifolia Kunth* se realizaron en una prensa hidráulica modelo IC-200-CO del Grupo EP INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL S.A., con una capacidad máxima de 2000 kN (**Figura 261**), conectada a un ordenador que registró los datos de fuerza, tiempo y desplazamiento usando el software específico PA/EH-3, de ICC S.A. Tanto la prensa como el ordenador utilizados son propiedad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.

Todas las probetas se ensayaron con una velocidad de control de carga de 700 N/s, asegurando que la duración del ensayo fuera de 300 ± 120 s, cumpliendo así las indicaciones de la norma ISO 22157:2019.



Figura 261. Prensa hidráulica de la marca IIC grupo EP, modelo IC-200-CO con una probeta lista para ser ensayada.

Para minimizar la fricción y la restricción radial de los extremos de la muestra, se ubicó una capa intermedia entre el plato superior de la máquina de ensayos y la probeta. Se utilizó una lámina de caucho como capa intermedia (**Figura 262**).



Figura 262. Lámina de caucho utilizada como capa intermedia.
Fuente: SoloStocks (Izquierda).

3.3.5. ENSAYOS DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

3.3.5.1. Procedimiento

Una vez listas, las probetas de tracción vertical paralela a las fibras se ensayaron en una prensa eléctrica multiensayos con una capacidad máxima de 100 kN, conectada a un ordenador que registró los datos.

Siguiendo las indicaciones de la norma *ISO 22157:2019 – Estructuras de bambú. Determinación de las propiedades físicas y mecánicas de los culmos de bambú. Métodos de ensayo*, los ensayos se realizaron por control de posición, con una velocidad de 5 mm/min, asegurando así que la rotura final tuviese lugar en un tiempo de ensayo de 300 ± 120 s.

La **Figura 263** muestra una selección de las probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de la *Guadua angustifolia Kunth*.



Figura 263. Probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.
Izquierda y centro: Probetas sin nudo expuestas al aire libre colocadas en la prensa.
Derecha: Probetas con y sin nudo procedentes de la cámara climática listas para ser ensayadas.

Para todas las probetas, la tensión máxima de tracción en la dirección de la fibra $f_{t,0}$ se calculó de acuerdo con la **Ecuación 3**:

$$f_{t,0} = \frac{F_{ult}}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$

donde F_{ult} es la carga máxima alcanzada durante la prueba y A es el área de la sección donde se aplica la carga.

Además, se colocaron dos galgas extensiométricas en algunas de las muestras ensayadas para medir las deformaciones. Una de las galgas se ubicó en el centro geométrico de la probeta, mientras que la otra se situó a 30 mm del centro geométrico de la probeta en dirección a la mordaza superior de la prensa.

La **Figura 264** representa las ubicaciones en las que las galgas extensiométricas fueron colocadas en las probetas del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

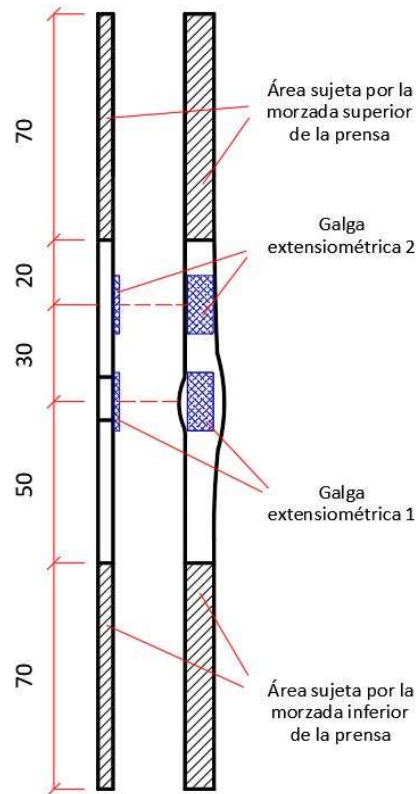


Figura 264. Ubicación de las galgas extensiométricas en las probetas del ensayo de tracción.
Dimensiones en mm.

A través de la relación tensión-deformación, se puede obtener el módulo de elasticidad de tracción en la dirección de la fibra, $E_{t,0}$. En este ensayo, se calculó entre el 20% y el 40% de la tensión máxima de tracción vertical paralela a las fibras, según la **Ecuación 4**:

$$E_{t,0} = \frac{f_{t,40} - f_{t,20}}{\varepsilon_{t,40} - \varepsilon_{t,20}} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde $f_{t,20}$ y $f_{t,40}$ son los esfuerzos de tracción al 20% y al 40% con respecto a la carga máxima; y $\varepsilon_{t,20}$ y $\varepsilon_{t,40}$ son sus respectivas deformaciones por tracción.

3.3.5.2. Equipos e instrumentación

Los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de *Guadua angustifolia Kunth* se realizaron en una prensa eléctrica multiensayos modelo S-110 del Grupo EP INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL S.A. (**Figura 265**), con una capacidad máxima de 100 kN y un límite de desplazamiento vertical de 650 mm, conectada a un ordenador que registró los datos de carga, tiempo y desplazamiento usando el software específico PA/MPC-2, de ICC S.A. Tanto la prensa como el ordenador utilizados son propiedad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada.

Todas las probetas se ensayaron con carga continua hasta el fallo final, mediante control de desplazamiento con una velocidad de 5 mm/min, asegurando que la duración del ensayo fuera de 300 ± 120 s, cumpliendo así las indicaciones de la norma ISO 22157:2019.



Figura 265. Prensa eléctrica multiensayos modelo S-110 del Grupo EP INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL S.A.

El equipo de extensometría utilizado para obtener los datos de las deformaciones de las probetas durante el ensayo fue el amplificador de medida universal modelo QuantumX MX840B de la empresa HBM (**Figura 266**).



Figura 266. Amplificador de medida universal modelo QuantumX MX840B de HBM.
Fuente: HBM

Las galgas extensiométricas son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada, es decir, convierten la fuerza, presión, tensión, peso, etc. en un cambio de la resistencia eléctrica, que puede ser medido. En el sector de la construcción, a menudo se emplean para medir tensiones, entendiéndose como “tensión” la deformación causada por un esfuerzo de compresión o tracción. Por lo tanto, las galgas extensiométricas se pueden utilizar para medir la contracción y la expansión de los cuerpos (Omega Engineering, s.f.).

Para el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras se usaron galgas extensométricas precableadas configurables modelo K-CLY4x-10/120 de HBM (**Figura 267**), formadas por un circuito metálico y una pieza plástica denominada soporte. La deformación del circuito provoca un cambio en la longitud y la sección del mismo, lo que crea una variación en la resistencia total del sensor, que es lo que registra el aparato de extensometría, traduciéndolo en deformaciones.

Se trata de galgas extensométricas lineales con 1 rejilla de medición orientada en la dirección del cable y resistencia nominal de 120 Ω , un modelo de gran utilidad cuando se ensayan probetas de dimensiones reducidas.

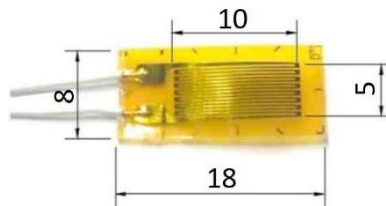


Figura 267. Galga extensométrica modelo K-CLY4x-10/120 de HBM.
Dimensiones en mm.

Para fijar las galgas extensométricas a las probetas de bambú se empleó el adhesivo rápido X60 de HBM (**Figura 268**), un adhesivo de polimerización en frío a base de metilmetacrilato ideal para ensayos experimentales donde las galgas deban ser fijadas a materiales porosos.



Figura 268. Adhesivo rápido X60 de HBM.
Fuente: HBM.

La **Figura 264** muestra las ubicaciones en las que las galgas extensométricas fueron colocadas en las probetas.

3.3.6. ENSAYOS DE FLEXIÓN DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

3.3.6.1. Procedimiento

Los ensayos de flexión en 4 puntos se realizaron aplicando un método de ensayo similar al descrito en la *ASTM D6272 (2020): Método de ensayo para propiedades de flexión de plásticos reforzados y no reforzados y materiales aislantes eléctricos mediante flexión en cuatro puntos*, pero adaptado al bambú, ya que se emplearon probetas rectangulares extraídas de la pared del culmo y se respetó que la distancia entre los puntos de aplicación de la carga fuese igual a 1/3 de la distancia entre los apoyos inferiores de la máquina de ensayos. Para ello, se utilizó una prensa eléctrica multiensayos con una capacidad máxima de 100 kN, conectada a un ordenador que registró los datos. En este caso, no se pudieron seguir las indicaciones de la norma *ISO 22157:2019*, dado que sólo contempla el ensayo a flexión de culmos completos de bambú y no se disponía de cañas que cumpliesen los requisitos de longitud necesarios.

Los ensayos se realizaron por control de desplazamiento, con una velocidad de 8 mm/min, asegurando así que la rotura final tuviese lugar en un tiempo de ensayo de 300 ± 120 s.

Se estableció una distancia entre puntos de aplicación de la carga de 10δ y una distancia entre apoyos inferiores de 30δ , correspondientes a 100 y 300 mm, respectivamente.

La **Figura 269** muestra una selección de probetas del ensayo de flexión en 4 puntos de la *Guadua angustifolia Kunth*.



Figura 269. *Probetas del ensayo de flexión en 4 puntos.*
Izquierda: *Probeta siendo ensayada.*
Derecha: *Probetas listas para ser ensayadas.*

Debido a que en las muestras anudadas la sección varía mucho entre los puntos de aplicación de la carga, la distribución de tensiones en el espécimen no es constante. Por este motivo, se calculó la tensión en dos regiones diferentes de las probetas:

- En el área de los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$), según la **Ecuación 5**.
- En el centro geométrico de la probeta ($f_{b,ms}$), según la **Ecuación 6**.

$$f_{b,la} = \frac{PL}{b\delta_{la}^2} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$f_{b,ms} = \frac{PL}{b\delta_{ms}^2} \quad \text{Ecuación 6}$$

donde P es la carga máxima en flexión, L es la distancia entre soportes, b es el ancho de la probeta, δ_{la} es el espesor medio en los dos puntos de aplicación de la carga y δ_{ms} es el espesor en el centro geométrico de la probeta.

La **Figura 270** muestra las distancias y ubicaciones de los puntos de carga y de apoyo, así como una probeta durante un ensayo de flexión.

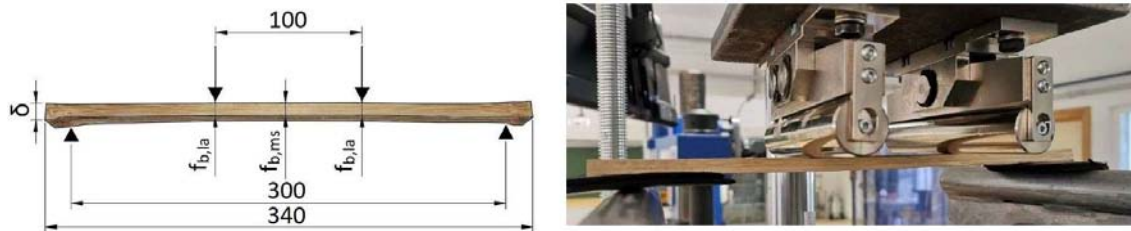


Figura 270. Ubicación de las probetas durante el ensayo de flexión.

Izquierda: Dimensiones (en mm) de las probetas utilizadas en el ensayo de flexión. δ es el espesor de la probeta, $f_{b,la}$ es el esfuerzo de flexión en el punto de aplicación de la carga. $f_{b,ms}$ es el esfuerzo de flexión en el centro geométrico.

Derecha: Probeta durante un ensayo de flexión.

Además, se colocaron dos galgas extensiométricas en algunas de las probetas ensayadas para medir las deformaciones. Ambas galgas se ubicaron en el centro geométrico de la pieza, una a cada lado de la probeta, es decir, una en la zona comprimida y otra en la zona traccionada.

La **Figura 271** representa las ubicaciones en las que las galgas extensiométricas fueron colocadas en las probetas del ensayo de flexión en 4 puntos.

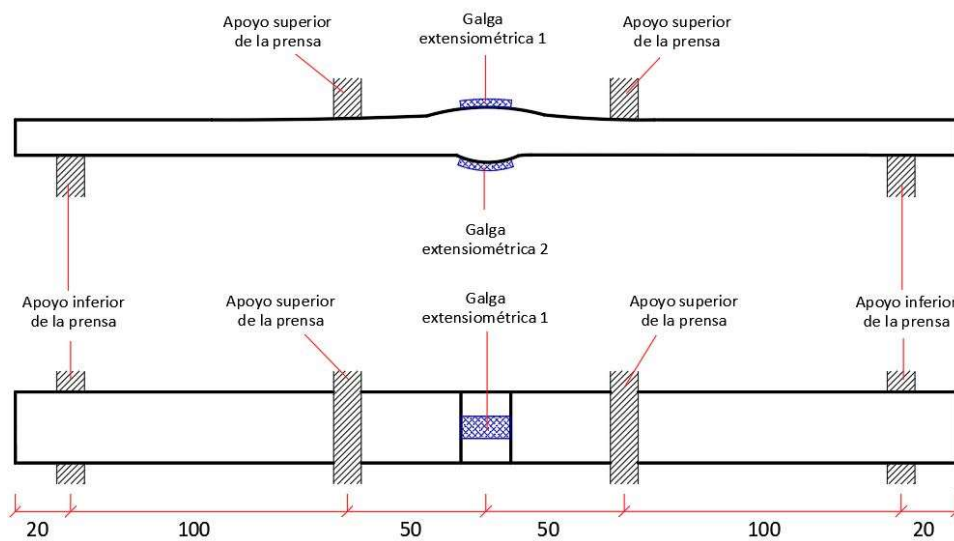


Figura 271. Ubicación de las galgas extensiométricas en las probetas del ensayo de flexión. Dimensiones en mm.

El módulo de elasticidad a flexión (E_b) se obtuvo mediante la relación tensión-deformación, calculando entre el 20% y el 40% del esfuerzo máximo de flexión:

- En el área de los puntos de aplicación de la carga ($E_{b,la}$), según la **Ecuación 7**.
- En el centro geométrico de la probeta ($E_{b,ms}$), según la **Ecuación 8**.

$$E_{b,la} = \frac{f_{b,la,40} - f_{b,la,20}}{\varepsilon_{b,la,40} - \varepsilon_{b,la,20}} \quad \text{Ecuación 7}$$

$$E_{b,ms} = \frac{f_{b,ms,40} - f_{b,ms,20}}{\varepsilon_{b,ms,40} - \varepsilon_{b,ms,20}} \quad \text{Ecuación 8}$$

donde $f_{b,la,20}$ y $f_{b,la,40}$ son los esfuerzos de flexión al 20% y al 40% con respecto al esfuerzo máximo en los puntos de aplicación de la carga, $\varepsilon_{b,la,20}$ y $\varepsilon_{b,la,40}$ son sus respectivas deformaciones para el mismo estado de tensión, $f_{b,ms,20}$ y $f_{b,ms,40}$ son las tensiones de flexión al 20% y al 40% con respecto al esfuerzo máximo en el centro de la probeta, y $\varepsilon_{b,ms,20}$ y $\varepsilon_{b,ms,40}$ son sus respectivas deformaciones para el mismo estado de tensión.

3.3.6.2. Equipos e instrumentación

Los ensayos de flexión en 4 puntos de *Guadua angustifolia Kunth* se realizaron en una prensa eléctrica multiensayos modelo S-110 del Grupo EP INGENIERÍA DE INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL S.A., con una capacidad máxima de 100 kN y un límite de desplazamiento vertical de 650 mm, conectada a un ordenador que registró los datos de carga, tiempo y desplazamiento usando el software específico PA/MPC-2, de ICC S.A. Tanto la prensa como el ordenador utilizados son propiedad de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada y son los mismos que se emplearon en el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de *Guadua angustifolia Kunth* (**Figura 265**).

Como ya se ha indicado, todas las probetas se ensayaron con carga continua hasta el fallo final, mediante control de desplazamiento con una velocidad de 8 mm/min, asegurando que la duración del ensayo fuera de 300 ± 120 s. Además, se estableció una distancia entre puntos de aplicación de la carga de 10δ (100 mm) y una distancia entre apoyos inferiores de 30δ (300 mm).

El equipo de extensometría y las galgas empleadas en el ensayo de flexión también son las mismas que se emplearon en el ensayo de tracción. Por lo tanto, se emplearon el equipo de extensometría modelo QuantumX MX840B de la empresa HBM (**Figura 266**) y las galgas extensométricas modelo K-CLY4x-10/120 de HBM (**Figura 267**). Además, al igual que en el ensayo de tracción, para fijar las galgas extensométricas a las probetas de bambú del ensayo de flexión se empleó el adhesivo rápido X60 de HBM (**Figura 268**).

Se colocaron dos galgas extensométricas en las probetas. La **Figura 271** muestra las ubicaciones exactas en las que las galgas fueron colocadas en los especímenes.

4. RESULTADOS

En este Capítulo se recogen los resultados de los ensayos descritos anteriormente.

En primer lugar, se presentan los resultados correspondientes a los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras y emisión acústica de la *Bambusa vulgaris Vulgaris*.

Posteriormente, se presentan los resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras, tracción vertical paralela a las fibras y flexión en 4 puntos realizados a la especie de bambú *Guadua angustifolia Kunth*.

4.1. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESPECIE *BAMBUSA VULGARIS VULGARIS*

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras realizados a los especímenes de *Bambusa vulgaris Vulgaris*, incluidos los resultados mecánicos, observaciones microscópicas y los datos de emisión acústica.

4.1.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS

La **Tabla 37** recoge los resultados obtenidos en los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras realizados a la especie de bambú *Bambusa vulgaris Vulgaris*.

Tabla 37. Resultados del ensayo a tracción vertical paralela a las fibras de Bambusa vulgaris Vulgaris.

Probeta	Área (mm ²)	Fuerza máxima (kN)	Carrera máxima (mm)	Resistencia máxima (kN/mm ²)
UN1	70,00	2,7626	2,4740	0,0395
N1	70,00	2,2309	1,6060	0,0319
UN2	80,00	4,6848	4,6666	0,0586
N2	80,00	5,4851	3,9745	0,0686

En términos generales, existe una diferencia sustancial en los resultados entre las cuatro muestras ensayadas, sin hallazgos concluyentes sobre la existencia del diafragma en la muestra.

Durante el ensayo, todas las probetas mostraron un comportamiento elástico-plástico con una fractura escalonada, que se puede dividir a grandes rasgos en dos fases:

- En una primera fase, se produce un aumento de la carga hasta alcanzar el valor máximo (carga máxima), con un comportamiento elástico y luego plástico. El final de esta primera fase se produce por la rotura de la pared interior del culmo, seguida de una gran hendidura longitudinal.

- En la segunda fase (una vez alcanzada la carga máxima), la carga disminuye de forma escalonada con caídas progresivas correspondientes a roturas sucesivas de la sección de madera del muro exterior.

La **Figura 272** muestra a modo de ejemplo el patrón de fractura de las probetas N2 (arriba) y UN1 (abajo). En ella se ven las fracturas de las paredes interior y exterior de las probetas, así como la hendidura longitudinal producida entre ellas.

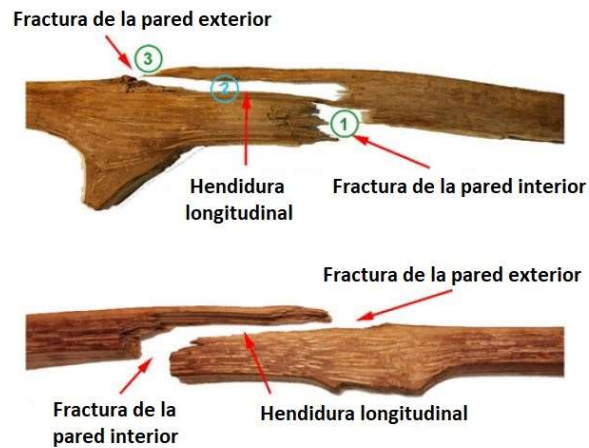


Figura 272. Patrón de fractura de las probetas N2 (arriba) y UN1 (abajo).

En la **Figura 273** se representan las fracturas observadas en las probetas tras el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

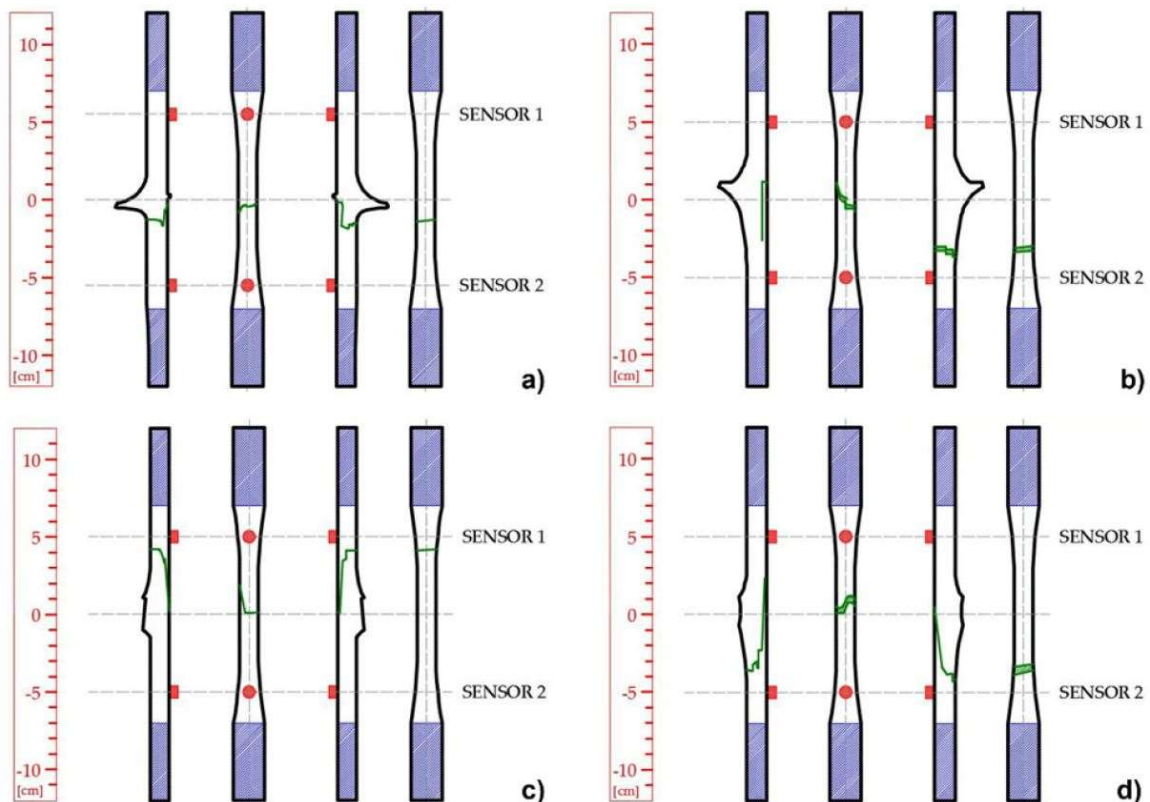


Figura 273. Representación de las fracturas observadas en las probetas tras el ensayo.
a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

En la **Figura 274** puede apreciarse detalladamente la evolución de la carga a lo largo del ensayo de las cuatro probetas analizadas.

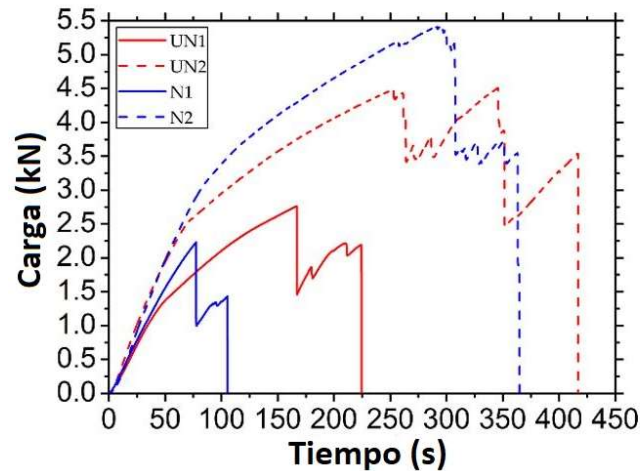


Figura 274. Carga a lo largo del tiempo para las probetas analizadas.

Líneas rojas: Probetas sin diafragma.

Líneas azules: Probetas con diafragma.

Para completar el análisis de las muestras ensayadas, se realizó una observación microscópica de las probetas mediante una microscopía electrónica de barrido (SEM) de alta resolución. Este proceso utiliza un haz de electrones en lugar de un haz de luz para formar una imagen ampliada de la superficie de un objeto. Permite la observación y caracterización superficial de materiales orgánicos e inorgánicos, dando información morfológica y de composición química, eficiente y simultáneamente, del material analizado. Su versatilidad se debe a su alta resolución (de 20 a 50 Å) y apariencia tridimensional de las imágenes, producto de su gran profundidad de foco (Rosas Saito, s.f.).

Para ello se empleó el equipo AURIGA (FIB-FESEM) de Carl Zeiss SMT, compuesto por una Estación de Trabajo CrossBeam por Bombardeo Iónico Focalizado, incorporada a un Microscopio Electrónico de Barrido de Alta Resolución por Emisión de Campo. Este equipo es propiedad del Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada, cuyo servicio se contrató específicamente para este propósito. La **Figura 275** muestra el equipo utilizado.



Figura 275. Equipo de microscopía AURIGA (FIB-FESEM) de Carl Zeiss SMT.

Fuente: Centro de Instrumentación Científica de la Universidad de Granada.

En la **Figura 276** se muestran varias vistas microscópicas SEM de las zonas de fractura definidas en la **Figura 272**, es decir, la fractura de la pared interior (1) y de la pared exterior (3), así como el área de división correspondiente a la hendidura longitudinal (2).

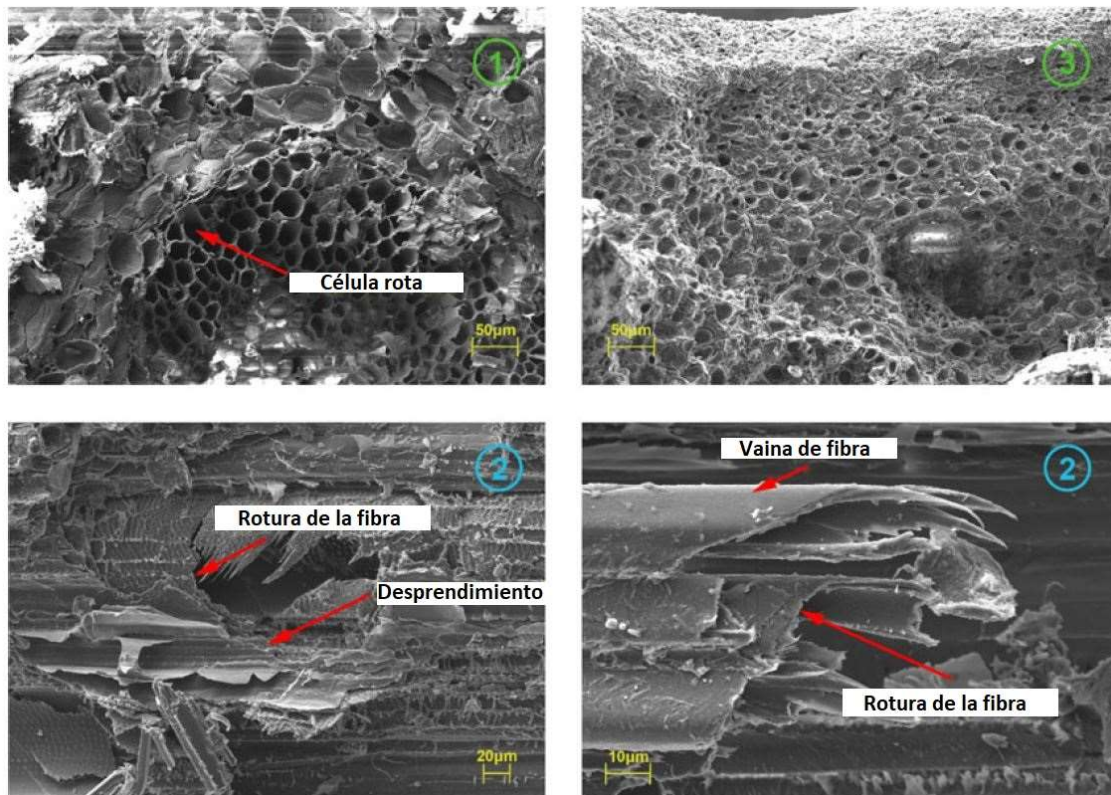


Figura 276. Vistas microscópicas SEM de los tres patrones de fractura.

Como era de esperar, se observa una mayor densidad de fibras en la pared exterior de la muestra que en la pared interior. También se puede ver la rotura de la fibra y el desprendimiento de la matriz de la fibra.

4.1.2. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE EMISIÓN ACÚSTICA

El procesado de los datos de emisión acústica se llevó a cabo en dos fases:

- Fase 1: Filtrado de las señales erróneamente registradas.
- Fase 2: Análisis de las señales correctamente registradas.

4.1.2.1. Filtrado de las señales erróneamente registradas

Los ensayos realizados conllevan mucha actividad acústica, por lo que se genera gran cantidad de señales EA. Este hecho provoca que algunas de ellas se registren erróneamente y deba ser eliminadas. Afortunadamente, este tipo de señales se caracterizan por tener un largo periodo de baja amplitud antes del tiempo de llegada real, por lo que resulta fácil identificarlas (Rescalvo Fernández, 2018).

La **Figura 277** muestra un ejemplo de señales tipo, una registrada correctamente (izquierda) y una mal registrada (derecha).

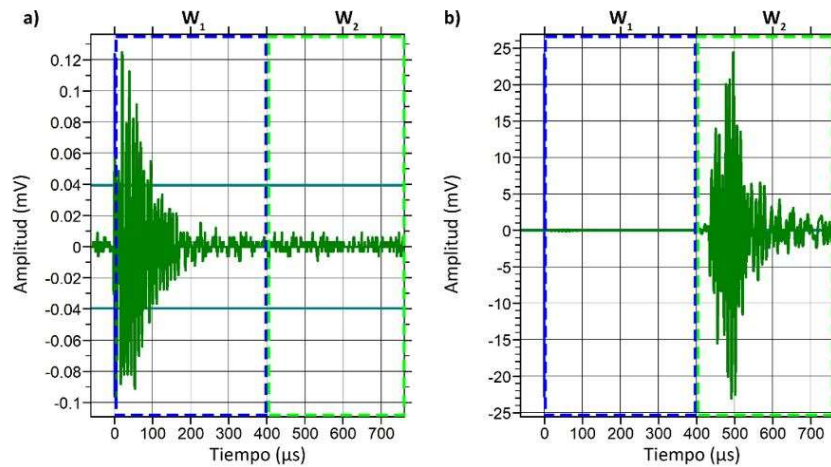


Figura 277. Ejemplo de dos señales de EA.
a) Señal bien registrada, b) Señal mal registrada.
Fuente: Rescalvo Fernández (2018).

Para evitar el registro de señales producidas por ruidos mecánicos y electromagnéticos, el rango de frecuencia de señales se limitó mediante filtros digitales durante la adquisición entre 50 kHz y 500 kHz. Además, el umbral de adquisición se estableció en 35 dB.

La **Figura 278** muestra, a modo de ejemplo, la señal de emisión acústica registrada durante el ensayo de la probeta UN1 y su espectro. En ella puede apreciarse la ventana temporal (W_0) designada como filtrado de las señales, cuya duración es de 400 μs (2000 muestras).

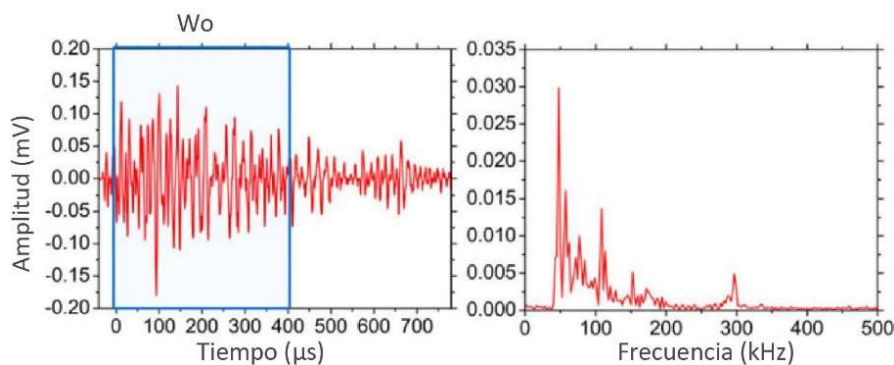


Figura 278. Señal EA registrada durante el ensayo de la probeta UN1.
Izquierda: Definición de la señal y de la ventana temporal (W_0).
Derecha: Magnitud del espectro.

A continuación, se procedió a eliminar aquellas señales EA producidas por la fricción entre las probetas y las mordazas de la prensa.

A modo de ejemplo, la **Figura 279** (parte izquierda) muestra el diagrama Amplitud-Duración de las señales de EA registradas durante el ensayo de la probeta UN1. En ella se pueden observar claramente dos grupos de puntos. El Grupo 1 corresponde a señales de corta duración (por debajo de 2000 μs), originadas por el mecanismo de fractura de la probeta. En cambio, el Grupo

2 está conformado por señales de duración mucho mayor (hasta 18000 μs), por lo que se deduce que corresponde a señales EA originadas por la fricción entre la probeta y las mordazas de la prensa.

La prueba de ello está en la **Figura 279** (parte derecha), que muestra los resultados después de aplicar el filtro de guarda de los sensores 3 y 4, ubicados en sendas mordazas de la prensa. En ella se observa que, tras aplicar el filtro, todas las señales del Grupo 2 fueron eliminadas. Este hecho demuestra la necesidad de utilizar sensores de protección (sensores guarda) en las pruebas de tracción vertical paralela a las fibras con análisis de EA realizados al bambú, de modo que se eliminen adecuadamente las señales ruidosas producidas por la fricción entre la probeta y las mordazas de la prensa.

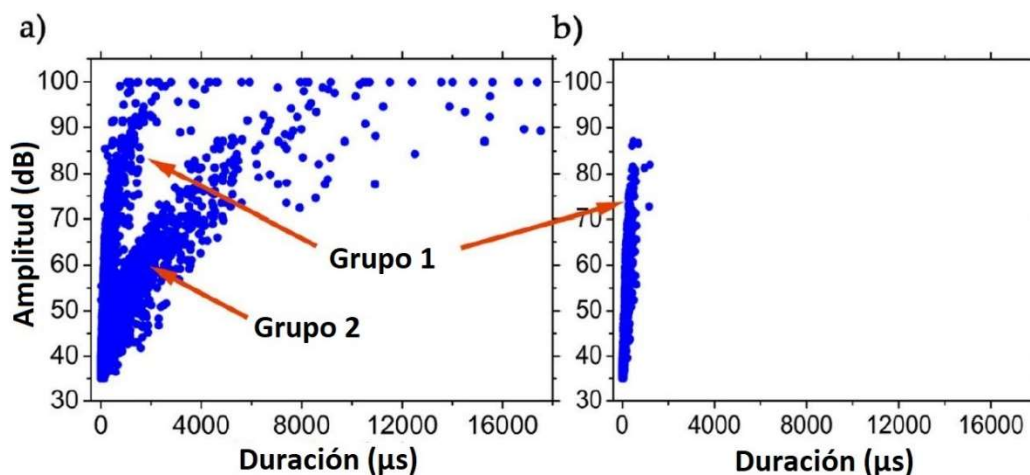


Figura 279. Diagrama Amplitud (A) versus Duración (Dur) de las señales EA registradas durante el ensayo de tracción vertical paralela a las fibras de la probeta UN1.
Izquierda: Antes del filtrado de los sensores guarda.
Derecha: Después del filtrado de los sensores guarda.

4.1.2.2. Análisis de las señales correctamente registradas

Sólo las señales que pasaron el filtro de protección (el filtrado de los sensores guarda explicado en el apartado anterior) fueron consideradas en el análisis de datos.

La **Figura 280** muestra los eventos de EA acumulados en cada uno de los ensayos realizados. Los resultados son similares en todos los casos:

- La actividad EA es muy baja durante la zona elástica. La emisión comienza a ser significativa a partir del punto de fluencia⁵⁹, lo que indica que no hubo daños significativos durante esta etapa. La actividad EA crece gradualmente a un ritmo bajo en toda la zona plástica.
- Excepto para la probeta UN1, la actividad EA salta considerablemente justo antes de la carga máxima. Después de este punto, el crecimiento de la actividad EA es muy alto, lo que indica un aumento progresivo y significativo del daño de la muestra.
- Después de la carga máxima, la actividad EA sufre ligeros cambios en su tendencia en los puntos de caída de carga.

⁵⁹ En ingeniería de los materiales, el punto de fluencia es el punto de la curva tensión-deformación que indica el límite del comportamiento elástico y el comienzo del comportamiento plástico de un material.

De estos resultados se puede concluir que la actividad de EA sigue, de manera coherente, el proceso de daño producido durante todo el proceso de carga. Sin embargo, este análisis es insuficiente para caracterizar el daño e identificar cambios entre la ruptura de las partes internas y externas de la sección transversal de la muestra.

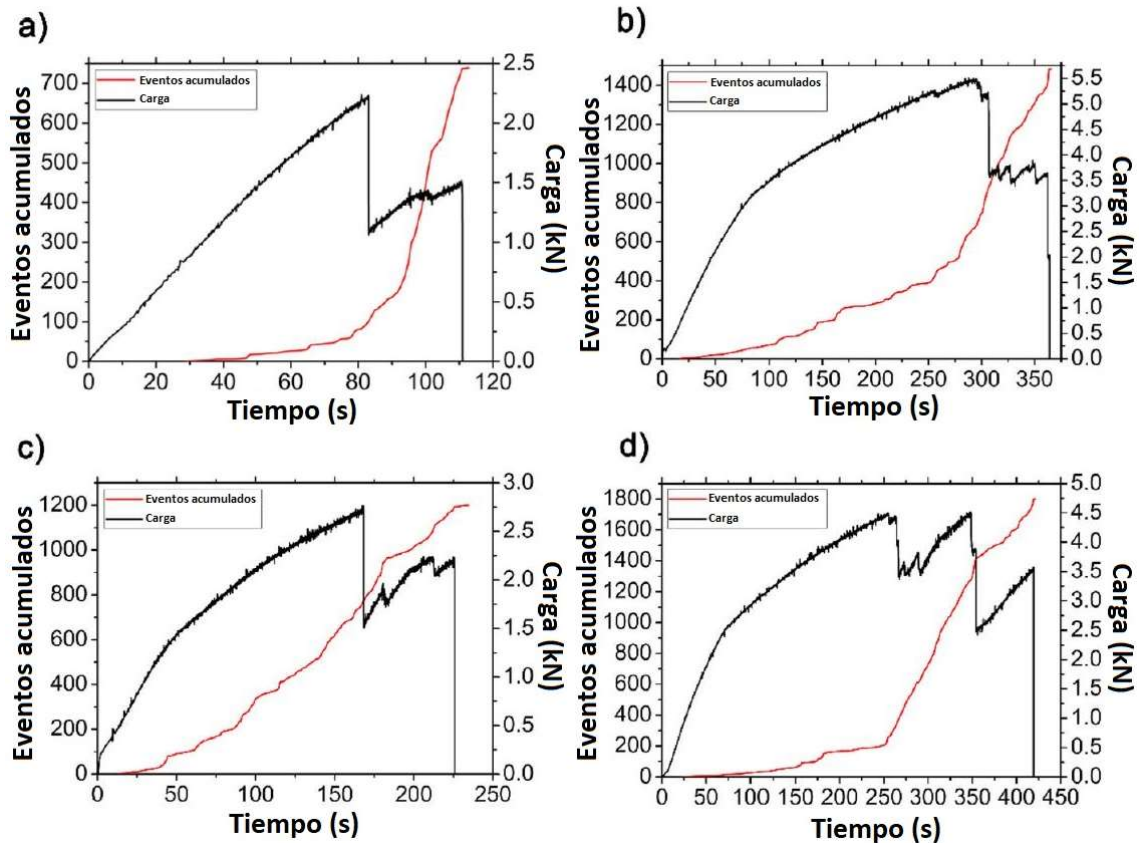


Figura 280. Eventos de EA acumulados a lo largo del tiempo para las probetas analizadas. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

La **Figura 281** y la **Figura 282** muestran los resultados del análisis de ubicación de la fuente. Para el análisis, se consideró como punto $x = 0$ el centro geométrico de cada probeta.

La **Figura 281** representa la posición de los eventos de EA localizados, mientras que la **Figura 282** incluye su clasificación en tres grados de severidad en función de la energía de EA del primer impacto del evento. Los resultados se pueden contrastar con el proceso de fractura observado macroscópicamente y representado en la **Figura 283** y en la **Figura 284**.

- En el caso de la probeta N1, la mayor parte del daño se observa desde el área central hasta la posición $x = -2$ cm, que encaja bien con la ubicación de los eventos de la **Figura 281** (a) y de la **Figura 282** (a).
- En el caso del espécimen N2, el daño tiene lugar desde $x = 0$ hasta $x = -4$ cm, de acuerdo con los resultados de la ubicación de la fuente de emisión acústica.
- La muestra UN1 se fracturó cerca del sensor 1, en $x = 4$ cm, donde se encuentra la mayor parte de la actividad EA de alta intensidad.
- Sin embargo, la muestra UN2 se fracturó cerca del sensor 2 (cerca de $x = -4$ cm), también en excelente acuerdo con la ubicación de los eventos de EA registrados durante su ensayo.

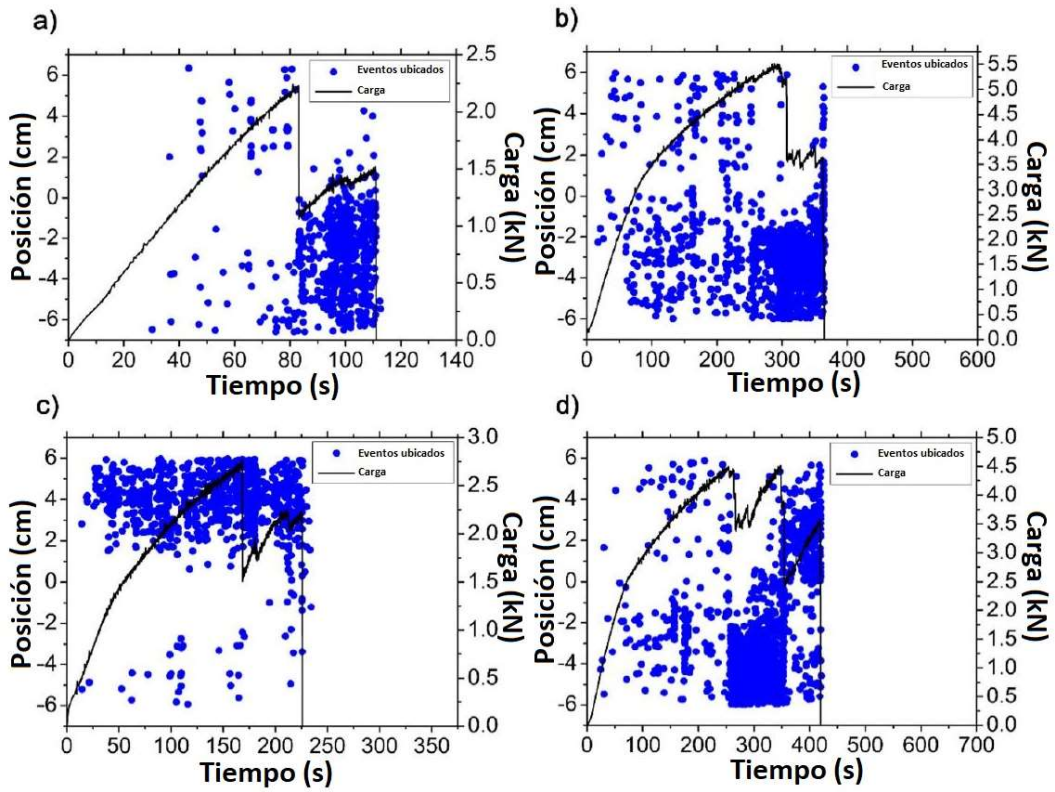


Figura 281. Ubicación de las señales EA durante la prueba de tracción vertical paralela a las fibras. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

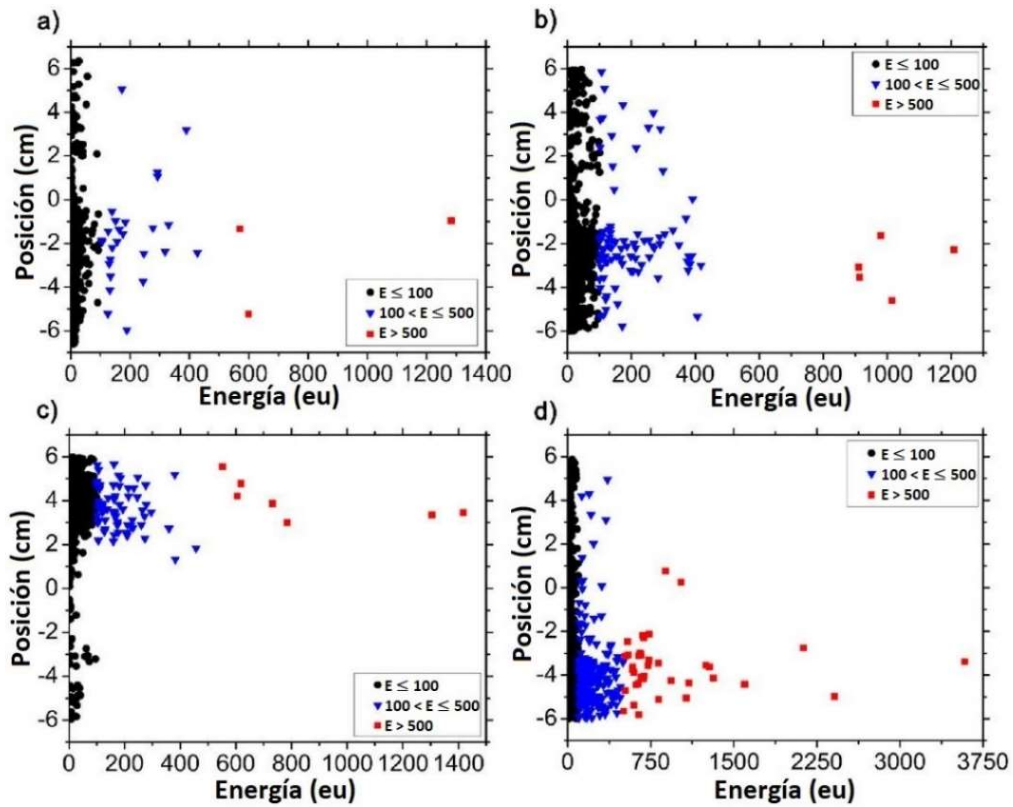


Figura 282. Posición de las señales EA versus Energía de las señales EA. a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

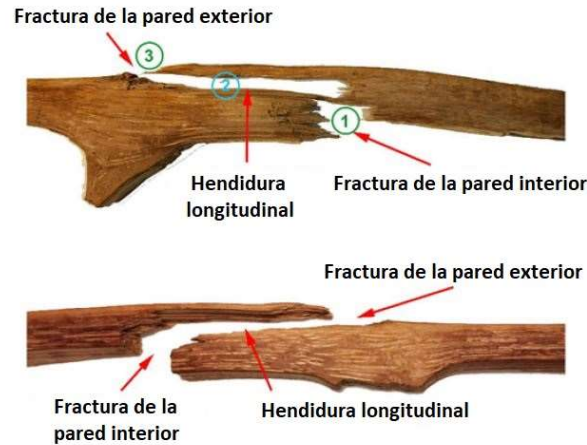


Figura 283. Patrón de fractura de las probetas N2 (arriba) y UN1 (abajo).

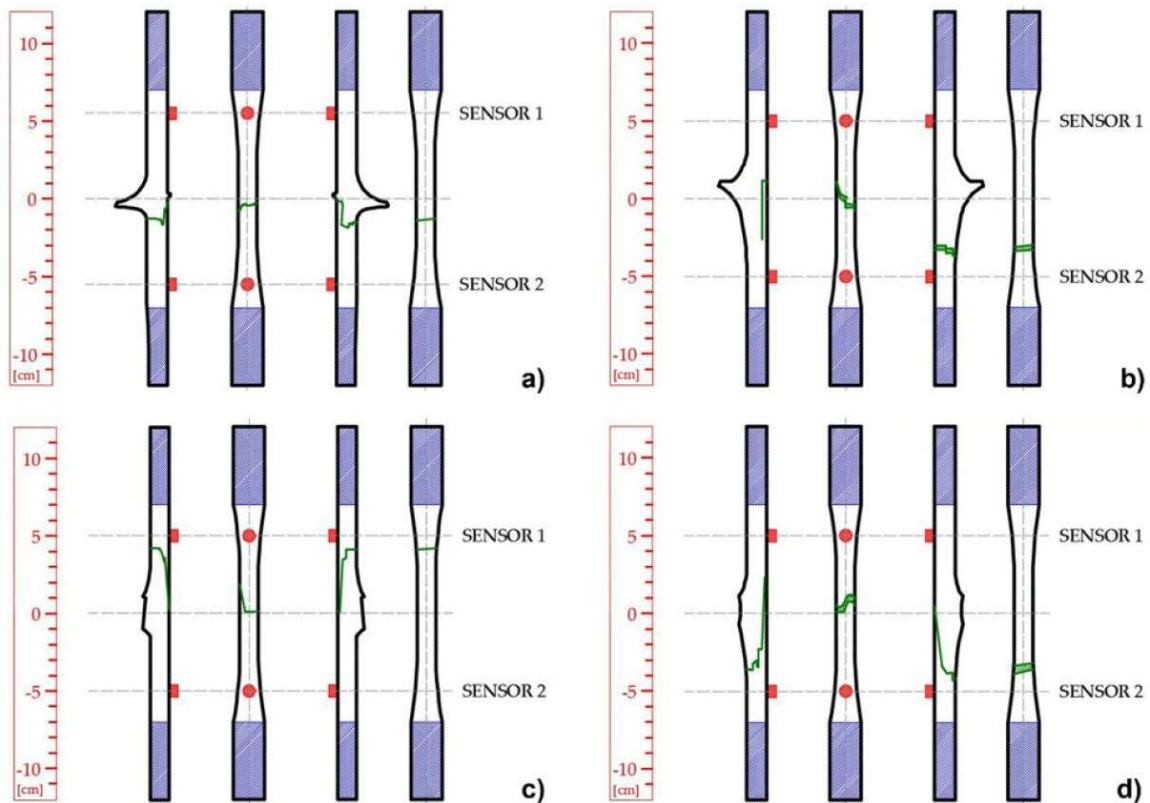


Figura 284. Representación de las fracturas observadas en las probetas tras el ensayo.
a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

El centro de gravedad (CoG) del espectro de las señales EA (también denominado frecuencia centroide) permite clasificarlas en dos rangos de frecuencia: frecuencias bajas, asociadas con agrietamiento de matriz y desunión de interfaces, y altas frecuencias, asociadas con la rotura de fibras. La Ecuación 9 define el CoG como:

$$CoG = \frac{\sum_{[50-500]kHz} Sf}{\sum_{[50-500]kHz} S} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde f es la frecuencia y S es la magnitud de la FFT (Transformada Rápida de Fourier) de la señal. La suma se extiende a todo el rango de frecuencias, limitado por los filtros de adquisición.

La **Figura 285** representa el *CoG* de las señales EA registradas para cada probeta, dividido en dos grupos: señales de baja frecuencia con *CoG* por debajo de 200 kHz y señales de alta frecuencia con *CoG* por encima de 200 kHz.

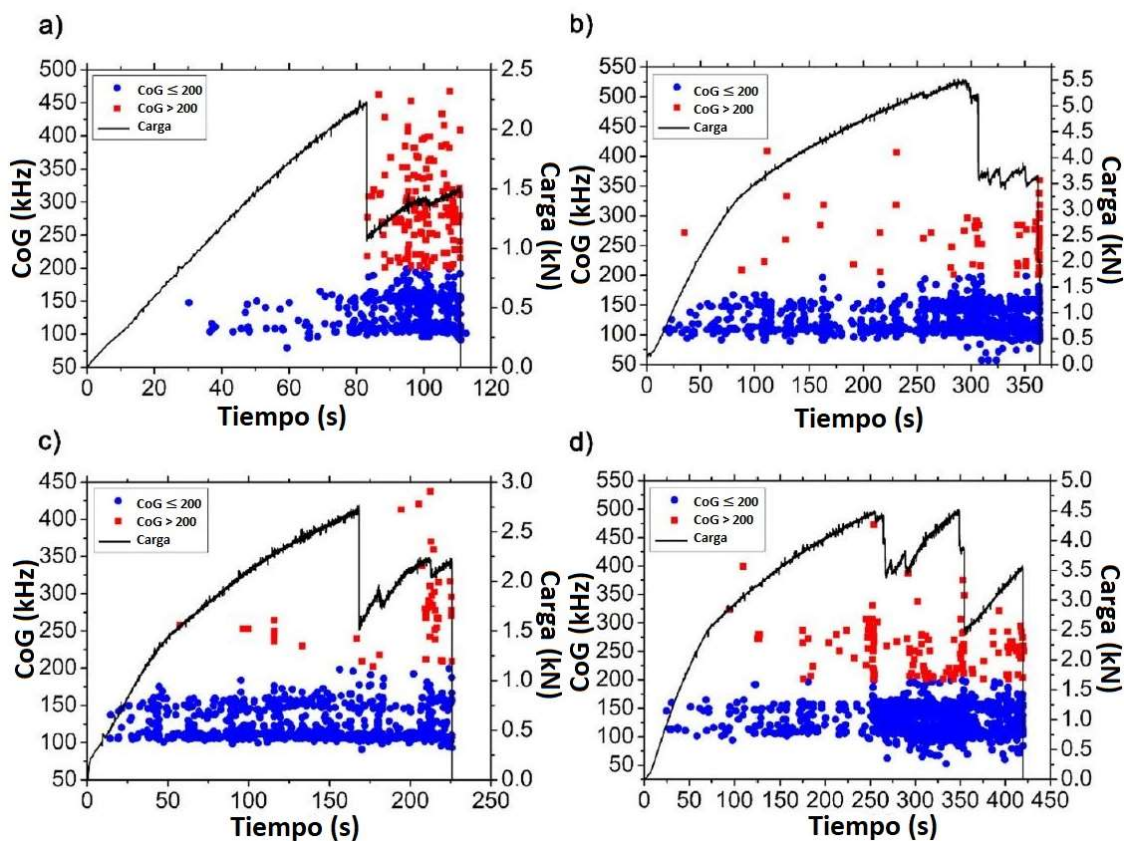


Figura 285. Centro de Gravedad (CoG) de los eventos EA.
a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

La **Figura 286** representa el número acumulado de señales EA de cada grupo.

Se observa con claridad que, mientras que las señales de baja frecuencia aparecen desde el comienzo del ensayo, las señales de alta frecuencia aparecen básicamente cuando se alcanza la carga máxima, es decir, cuando se produce la rotura de la fibra de la pared interior de la probeta (**Figura 283**).

Por lo tanto, las señales de baja frecuencia pueden asociarse con el agrietamiento de la matriz (agrietamiento de la lignina) y la desunión de la fibra de la matriz.

Se observa también un aumento en las señales de alta frecuencia justo cuando se produce la rotura de la fibra de la pared exterior (**Figura 283**), es decir, antes de la rotura final de la muestra.

Por ende, se deduce que las señales de alta frecuencia están relacionadas con la rotura de la fibra de la probeta.

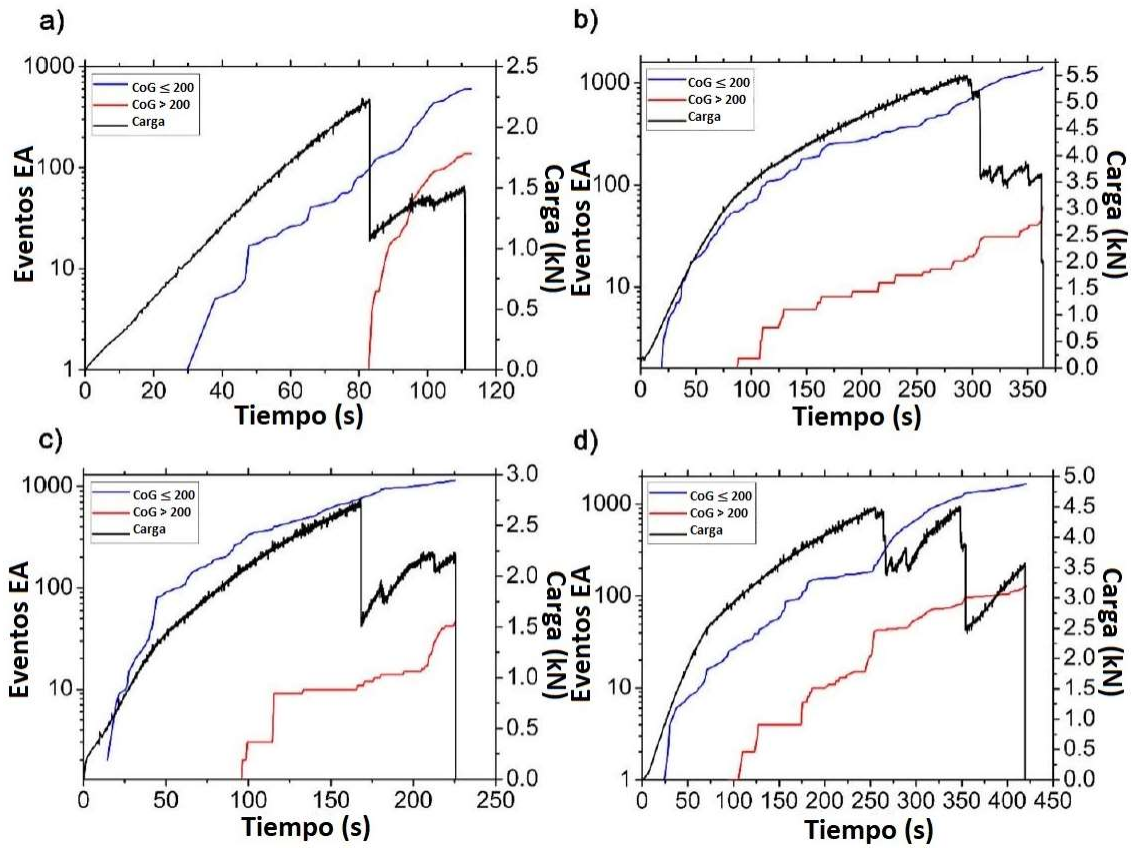


Figura 286. Eventos de EA acumulados a lo largo del tiempo.

a) N1, b) N2, c) UN1, d) UN2.

4.2. RESULTADOS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS A LA ESPECIE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

En este apartado se presentan los resultados de los ensayos realizados a las muestras de GaK.

Se utilizó el programa Statistix v.9® para realizar el análisis estadístico y determinar así las diferencias estadísticas entre todas las propiedades del bambú. Se verificó la normalidad de las variables y se realizó un ANOVA factorial⁶⁰ para las variables gaussianas (es decir, normales) y pruebas no paramétricas de Kruskal-Wallis⁶¹ para aquellas variables que se desviaban de la normalidad. Se establecieron diferencias estadísticamente significativas entre las medias para valores de $p < 0.05$.

4.2.1. RESULTADOS DEL ENSAYO DE COMPRESIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS

Las siguientes tablas (**Tabla 38**, **Tabla 39**, **Tabla 40** y **Tabla 41**) recogen los resultados obtenidos en los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras para cada una de las probetas de GaK.

Tabla 38. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* sin nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
C_C_01_01	3026,64	178,5	0,0590	58,98
C_C_01_02	3155,58	180,7	0,0573	57,26
C_C_01_03	2586,25	168,6	0,0652	65,19
C_C_01_04	3043,05	182,5	0,0600	59,97
C_C_02_01	3514,16	190,4	0,0542	54,18
C_C_02_02	3741,94	132,0	0,0353	35,28
C_C_03_01	2784,27	111,5	0,0400	40,05
C_C_03_02	2653,00	127,2	0,0479	47,95
C_C_03_03	2856,02	117,2	0,0410	41,04
C_C_03_04	2848,64	127,3	0,0447	44,69
C_C_03_05	2705,80	95,3	0,0352	35,22
C_C_04_01	2675,35	165,0	0,0617	61,67
C_C_04_02	2759,90	174,5	0,0632	63,23
C_C_04_03	2817,65	171,4	0,0608	60,83
C_C_05_01	2727,66	146,0	0,0535	53,53
C_C_05_02	2414,32	123,7	0,0512	51,24
C_C_05_03	2699,49	121,5	0,0450	45,01
C_C_05_04	2456,61	117,7	0,0479	47,91
Promedio	2859,24	146,2	0,0513	51,29
Desviación estándar (MPa)				9,61
Error estándar (%)				2,27

⁶⁰ La técnica de análisis de varianza (ANOVA), también conocida como análisis factorial, fue desarrollada por Fisher en 1930 y constituye la herramienta básica para el estudio del efecto de uno o más factores (cada uno con dos o más niveles) sobre la media de una variable continua. Es el test estadístico a emplear cuando se desea comparar las medias de dos o más grupos. Esta técnica puede generalizarse también para estudiar los posibles efectos de los factores sobre la varianza de una variable (Amat Rodrigo, 2016a).

⁶¹ El test de Kruskal-Wallis, también conocido como test H, es la alternativa no paramétrica al test ANOVA para datos no pareados. Se trata de una extensión del test de Mann-Whitney para más de dos grupos. Es un test que emplea rangos para contrastar la hipótesis de que k muestras han sido obtenidas de una misma población. A diferencia del ANOVA, en el que se comparan medias, el Kruskal-Wallis contrasta si las diferentes muestras están equidistribuidas y si, por tanto, pertenecen a una misma distribución (población) (Amat Rodrigo, 2016b).

Tabla 39. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
C_C_N_01_01	3263,94	176,0	0,0539	53,92
C_C_N_01_02	3371,37	206,9	0,0614	61,37
C_C_N_01_03	3305,00	216,4	0,0655	65,48
C_C_N_01_04	3582,11	223,7	0,0624	62,45
C_C_N_01_05	3404,06	133,9	0,0393	39,34
C_C_N_02_01	3019,48	194,2	0,0643	64,32
C_C_N_02_02	3185,18	186,4	0,0585	58,52
C_C_N_03_01	3123,80	114,6	0,0367	36,69
C_C_N_03_02	3103,28	116,9	0,0377	37,67
C_C_N_03_03	3052,49	133,9	0,0439	43,87
C_C_N_03_04	2877,23	130,3	0,0453	45,29
C_C_N_03_05	2909,00	190,8	0,0656	65,59
C_C_N_04_01	2705,64	196	0,0724	72,44
C_C_N_05_01	2739,95	130,1	0,0475	47,48
C_C_N_05_02	2533,39	160,9	0,0635	63,51
C_C_N_05_03	2716,64	151,0	0,0556	55,58
C_C_N_05_04	2905,97	149,6	0,0515	51,48
C_C_N_05_05	2601,76	130,9	0,0503	50,31
Promedio	3022,24	163,5	0,0542	54,18
Desviación estándar (MPa)				10,77
Error estándar (%)				2,54

Tabla 40. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
C_O_04_01	3215,65	172,2	0,0536	53,55
C_O_04_02	3449,86	164,0	0,0475	47,54
C_O_04_03	4085,58	168,6	0,0413	41,27
C_O_04_04	3220,06	148,8	0,0462	46,21
C_O_04_05	3493,12	171,7	0,0492	49,15
C_O_10_01	2829,42	126,6	0,0447	44,74
C_O_10_02	2755,19	127,8	0,0464	46,39
C_O_10_03	2668,85	127,4	0,0477	47,74
C_O_11_01	2643,97	115,6	0,0437	43,72
C_O_11_02	2518,81	118,4	0,0470	47,01
C_O_11_03	2452,13	124,9	0,0509	50,94
C_O_11_04	2305,29	107,3	0,0465	46,55
C_O_13_01	2595,34	111,1	0,0428	42,81
C_O_13_02	2586,19	103,7	0,0401	40,10
C_O_13_03	2515,63	121,9	0,0485	48,46
C_O_14_01	3759,03	218,8	0,0582	58,21
C_O_14_02	4149,85	241,8	0,0583	58,27
C_O_14_03	3843,33	221,2	0,0576	57,55
Promedio	3060,41	149,5	0,0483	48,34
Desviación estándar (MPa)				5,49
Error estándar (%)				1,29

Tabla 41. Resultados de los ensayos de compresión vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
C_O_N_03_01	3429,48	181,8	0,0530	53,01
C_O_N_03_02	3343,80	159,3	0,0476	47,64
C_O_N_03_03	3425,72	166,3	0,0485	48,54
C_O_N_04_01	3497,88	186,5	0,0533	53,32
C_O_N_04_02	3307,63	177,0	0,0535	53,51
C_O_N_04_03	3298,57	190,6	0,0578	57,78
C_O_N_04_04	3846,34	167,3	0,0435	43,50
C_O_N_04_05	3414,00	147,5	0,0432	43,20
C_O_N_09_01	3228,41	170,6	0,0528	52,84
C_O_N_10_01	2987,29	125,8	0,0421	42,11
C_O_N_10_02	2766,61	133,7	0,0483	48,33
C_O_N_10_03	2736,35	146,2	0,0534	53,43
C_O_N_11_01	2954,60	121,7	0,0412	41,19
C_O_N_11_02	2473,99	131,7	0,0532	53,23
C_O_N_11_03	2635,61	121,9	0,0463	46,25
C_O_N_11_04	2587,63	112,5	0,0435	43,48
C_O_N_13_01	2957,77	117,0	0,0396	39,56
C_O_N_13_02	2896,59	117,7	0,0406	40,63
Promedio	3099,35	148,6	0,0479	47,86
Desviación estándar (MPa)				5,60
Error estándar (%)				1,32

La **Figura 287** y la **Tabla 42** muestran los resultados de las pruebas de compresión vertical paralela a las fibras realizadas a los cuatro tipos de especímenes una vez procesados los datos y realizado el análisis estadístico de los mismos.

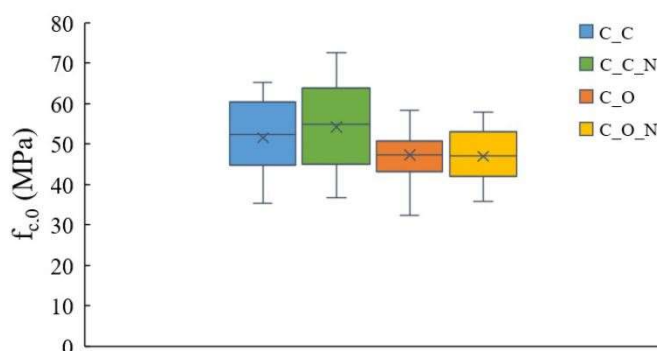


Figura 287. Tensión máxima a compresión ($f_{c,0}$).

x: Valor medio.

Línea horizontal: Mediana.

Área coloreada: Primer y tercer cuartil.

Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.

Tabla 42. Tensión máxima y contenido de humedad para probetas de bambú sometidas a compresión vertical paralela a las fibras.
Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico.
Las letras (A, B) indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).

Descripción de la probeta	Nomenclatura	$f_{c,0}$ (MPa)	Δ (%)	MC (%)
Control, sin nudo	C_C	51 \pm 10 A	0.0	10.7 \pm 1.3
Control, con nudo	C_C_N	54 \pm 11 A	+5.6	10.0 \pm 0.9
Aire libre, sin nudo	C_O	48 \pm 5 B	-5.7	9.2 \pm 0.8
Aire libre, con nudo	C_O_N	48 \pm 6 B	-6.7	9.3 \pm 1.6

Se observan valores inferiores a la media para las probetas que permanecieron expuestas al aire libre: -5.7% y -6.7% inferiores para las muestras sin y con nudo, respectivamente.

Del análisis estadístico se deduce que existen diferencias significativas entre las muestras de control que permanecieron en la cámara climática y las que se mantuvieron expuestas al aire libre. En cambio, no existen diferencias significativas entre las muestras extraídas del entrenudo y las muestras anudadas para el mismo tipo de exposición ambiental.

Como ejemplo, la **Figura 288** muestra el esfuerzo de compresión en función del tiempo para cinco muestras sin nudo (izquierda) y para 5 muestras con nudo (derecha), comparando los dos tipos de exposición ambiental.

Se aprecia una clara diferencia de comportamiento entre las muestras sometidas a diferentes condiciones ambientales, con una disminución de los valores de tensión máxima y rigidez en las muestras sometidas a deterioro ambiental externo, especialmente en las muestras anudadas. La presencia de nudo implica que la rigidez en ambas condiciones ambientales apenas sufre degradación.

Para todos los casos se observa un comportamiento elástico y lineal hasta alcanzar la tensión máxima. Pasado este punto, se observa un comportamiento plástico y dúctil, con una disminución paulatina de la carga. Este aspecto es de gran relevancia en términos de seguridad estructural.

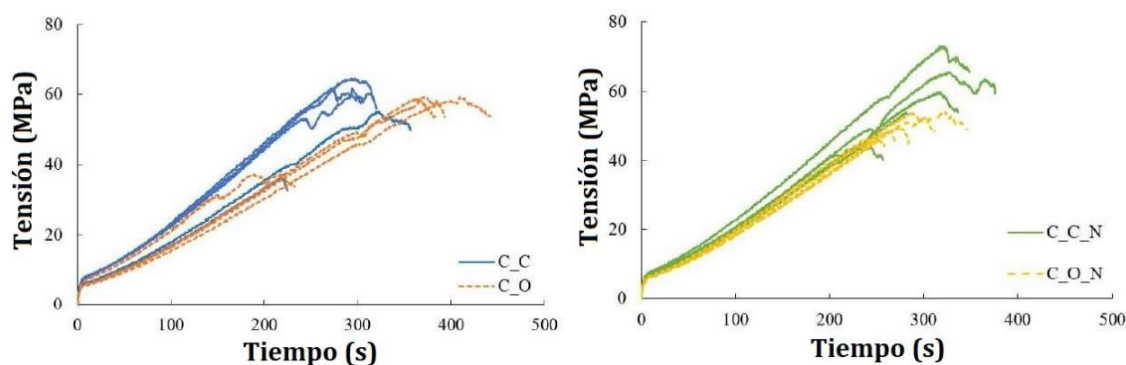


Figura 288. Curvas de tensión versus tiempo para las probetas de bambú sometidas al ensayo de compresión.
Cinco muestras por cada tipo.
Izquierda: Muestras sin nudo. Derecha: Muestras con nudo.

La **Figura 289** ilustra cada tipo de muestra después de la prueba de compresión.

Al alcanzar la tensión máxima, se produce una separación entre la cara externa (sílice) y la cara interna, como se aprecia en la parte superior de la **Figura 289**.

Pasado este punto, se produce una plastificación de la capa exterior y el aplastamiento de la cabeza de las muestras, con la consecuente disminución de la carga, como se puede observar en la **Figura 288**. Esta plastificación genera un agrietamiento longitudinal que aparece primero en la cara exterior de sílice, siendo esta capa asociada a una mayor resistencia. Posteriormente, las grietas se propagan a lo largo de la muestra y hacia la capa interna.

En el caso de las probetas sometidas a condiciones ambientales externas, este efecto es más significativo ya que, debido al deterioro ambiental, las muestras presentaban fisuras previas, muy marcadas en algunos casos, provocando que la fisura atravesara completamente la sección de la muestra.

Cabe señalar que la presencia de la capa de caucho puede afectar a la rotura final, pero al mismo tiempo evita esfuerzos excéntricos en la probeta y asegura que la carga se aplique de forma homogénea en toda la sección transversal, motivo por el que la ISO 22157:2019 recomienda su uso durante el ensayo.

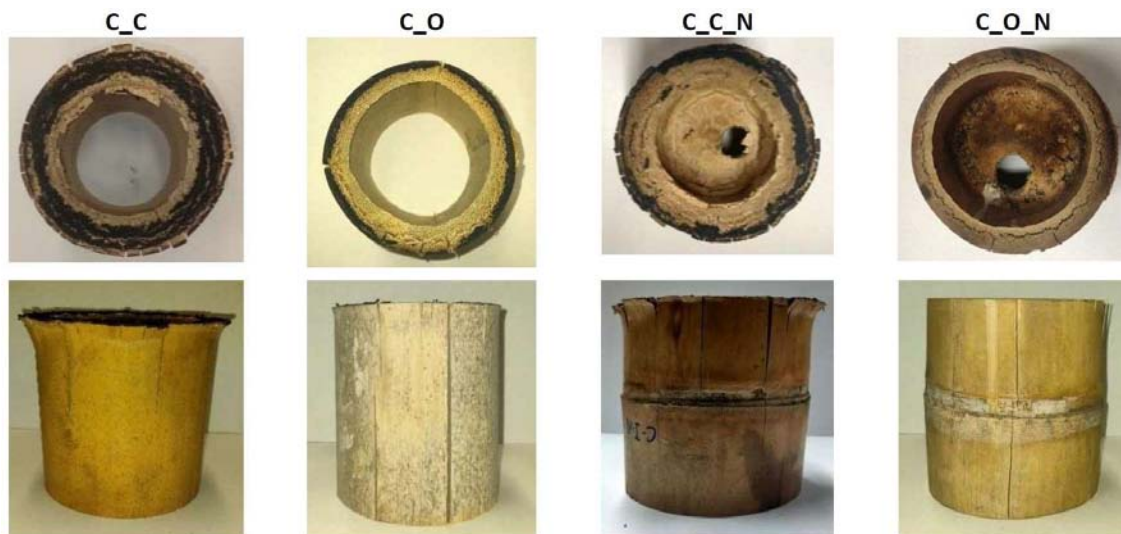


Figura 289. Imágenes de las probetas después del ensayo de compresión vertical paralela a las fibras.

4.2.2. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN VERTICAL PARALELA A LAS FIBRAS

Las siguientes tablas (**Tabla 43**, **Tabla 44**, **Tabla 45** y **Tabla 46**) recogen los resultados obtenidos en los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras para cada una de las probetas de *GaK*.

Tabla 43. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
T_C_04_04	51,68	7,929	0,1534	153,42
T_C_12_02	35,56	6,287	0,1768	176,82
T_C_12_03	34,43	7,527	0,2186	218,59
T_C_15_01	60,11	9,728	0,1618	161,83
T_C_20_05	35,31	7,507	0,2126	212,62
T_C_20_06	34,97	8,529	0,2439	243,88
T_C_20_07	33,20	8,061	0,2428	242,82
T_C_20_08	34,34	8,612	0,2508	250,79
T_C_20_09	35,70	7,981	0,2236	223,55
T_C_20_11	29,72	6,992	0,2353	235,28
T_C_22_02	58,75	11,204	0,1907	190,72
T_C_24_01	64,91	6,212	0,0957	95,70
T_C_24_03	62,54	5,777	0,0924	92,37
T_C_24_04	67,48	7,723	0,1144	114,44
T_C_24_07	64,02	7,643	0,1194	119,38
T_C_24_08	65,96	6,096	0,0924	92,42
T_C_24_10	59,76	7,050	0,1180	117,97
T_C_24_11	61,39	6,947	0,1132	113,16
Promedio	49,44	7,656	0,1698	169,76
Desviación estándar (MPa)				58,69
Error estándar (%)				13,83

Tabla 44. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
T_C_N_06_01	44,01	4,494	0,1021	102,10
T_C_N_06_02	46,54	6,037	0,1297	129,71
T_C_N_09_01	32,14	5,287	0,1645	164,49
T_C_N_11_01	48,12	7,427	0,1543	154,35
T_C_N_11_03	50,75	7,043	0,1388	138,78
T_C_N_11_04	49,74	7,478	0,1503	150,33
T_C_N_11_05	47,76	7,104	0,1487	148,73
T_C_N_11_06	49,69	6,869	0,1382	138,22
T_C_N_11_07	49,09	6,937	0,1413	141,30
T_C_N_12_01	45,58	6,898	0,1513	151,35
T_C_N_12_02	53,79	6,995	0,1300	130,04
T_C_N_12_03	58,65	6,357	0,1084	108,38
T_C_N_12_04	54,09	7,945	0,1469	146,89
T_C_N_18_01	64,20	6,587	0,1026	102,60
T_C_N_18_02	70,82	9,446	0,1334	133,39
T_C_N_23_01	60,11	7,021	0,1168	116,80
T_C_N_23_02	65,28	8,439	0,1293	129,28
T_C_N_23_04	59,83	6,186	0,1034	103,39
Promedio	52,79	6,919	0,1328	132,78
Desviación estándar (MPa)				19,27
Error estándar (%)				4,54

Tabla 45. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
T_O_20_01	46,34	8,667	0,1870	187,04
T_O_20_02	52,89	7,100	0,1343	134,25
T_O_58_02	32,26	6,666	0,2066	206,62
T_O_58_03	32,60	6,673	0,2047	204,71
T_O_58_06	35,15	6,705	0,1908	190,77
T_O_61_03	34,94	6,653	0,1904	190,40
T_O_61_04	36,67	5,864	0,1599	159,93
T_O_95_01	46,58	6,750	0,1449	144,93
T_O_95_02	51,03	8,809	0,1726	172,63
T_O_107_02	31,66	7,224	0,2282	228,19
T_O_107_03	34,50	6,495	0,1883	188,27
T_O_107_05	34,15	6,476	0,1896	189,63
T_O_107_06	37,64	6,383	0,1696	169,57
T_O_107_07	35,04	7,133	0,2036	203,59
T_O_107_08	35,64	6,744	0,1892	189,22
T_O_107_10	29,49	6,773	0,2297	229,67
T_O_107_11	29,99	6,924	0,2308	230,85
T_O_107_12	29,60	6,721	0,2271	227,09
Promedio	37,01	6,931	0,1915	191,52
Desviación estándar (MPa)				28,17
Error estándar (%)				6,64

Tabla 46. Resultados de los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Área de la probeta (mm ²)	Carga máxima (kN)	Resistencia máxima (kN/mm ²)	Resistencia máxima (MPa)
T_O_N_06_01	39,14	5,790	0,1479	147,95
T_O_N_23_03	45,79	7,472	0,1632	163,18
T_O_N_61_01	53,54	5,548	0,1036	103,63
T_O_N_61_02	48,13	5,799	0,1205	120,50
T_O_N_90_01	63,28	9,200	0,1454	145,39
T_O_N_90_02	65,51	7,826	0,1195	119,46
T_O_N_95_03	51,04	6,344	0,1243	124,30
T_O_N_95_04	52,85	5,883	0,1113	111,31
T_O_N_95_05	50,87	6,309	0,1240	124,01
T_O_N_100_01	54,58	6,534	0,1197	119,70
T_O_N_100_02	56,59	6,202	0,1096	109,59
T_O_N_100_03	59,18	7,417	0,1253	125,32
T_O_N_100_04	59,26	7,539	0,1272	127,21
T_O_N_100_05	48,33	6,589	0,1363	136,33
T_O_N_100_07	55,64	6,080	0,1093	109,28
T_O_N_100_08	52,87	6,631	0,1254	125,43
T_O_N_100_09	54,67	6,431	0,1176	117,64
T_O_N_100_10	58,60	7,333	0,1251	125,14
Promedio	53,88	6,718	0,1253	125,30
Desviación estándar (MPa)				14,94
Error estándar (%)				3,52

La **Figura 290** y la **Tabla 47** muestran los resultados de las pruebas de tracción vertical paralela a las fibras realizadas a los cuatro tipos de especímenes una vez procesados los datos y realizado el análisis estadístico de los mismos.

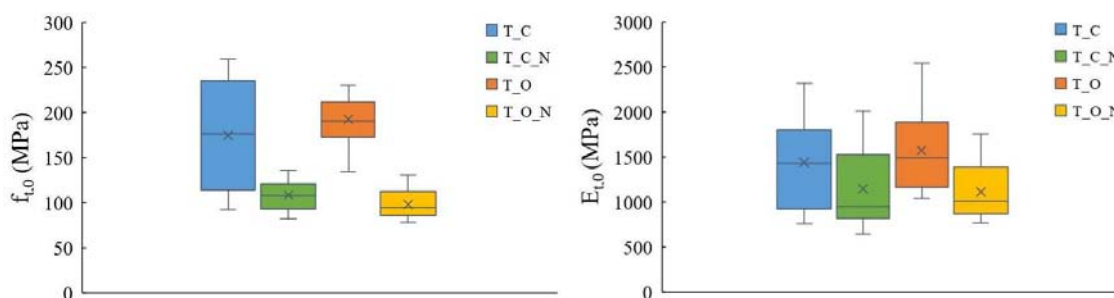


Figura 290. Resultados del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

Izquierda: Tensión máxima de tracción ($f_{t,0}$).

Derecha: Módulo de elasticidad en tracción ($E_{t,0}$).

x: Valor medio.

Línea horizontal: Mediana.

Área coloreada: Primer y tercer cuartil.

Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.

Tabla 47. Tensión máxima, módulo de elasticidad y contenido de humedad para probetas sometidas a tracción vertical paralela a las fibras.

Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico.

Las letras (A, B) indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).

Descripción de la probeta	Nomenclatura	$f_{t,0}$ (MPa)	Δ (%)	$E_{t,0}$ (MPa)	Δ (%)	MC (%)
Control, sin nudo	T_C	170 \pm 59 A	0.0	1434 \pm 492 AB	0.0	9.5 \pm 1.0
Control, con nudo	T_C_N	133 \pm 19 B	-21.8	1143 \pm 397 B	-20.3	9.6 \pm 1.1
Aire libre, sin nudo	T_O	192 \pm 28 A	12.8	1571 \pm 471 A	+9.5	8.9 \pm 1.0
Aire libre, con nudo	T_O_N	125 \pm 15 B	-26.2	1111 \pm 320 B	-22.5	8.6 \pm 0.5

En cuanto a la tensión máxima, no existen diferencias estadísticamente significativas entre las probetas sin nudo, aunque, en términos medios, la tensión máxima es un 12.8% superior en las muestras sin nudo expuestas al aire libre en comparación con las muestras sin nudo que permanecieron en la cámara climática.

La presencia de nudo reduce la tensión máxima de tracción en un 21.8% en las muestras de control con respecto a las probetas de control sin nudo. Del mismo modo, la presencia de nudo reduce la tensión máxima de tracción en un 39.0% en las muestras expuestas al aire libre con respecto a las probetas del exterior sin nudo.

Estadísticamente, las muestras anudadas no presentaron diferencias según su exposición.

En cuanto al módulo de elasticidad, las diferencias entre los cuatro tipos de muestras analizadas son menores.

En general, las muestras anudadas tienen un módulo de elasticidad menor, asociado a la presencia del nudo en la parte central de la probeta.

Las muestras de control anudadas muestran una disminución del módulo elástico del -20.3%. En el caso de las muestras sin nudo en condiciones ambientales al aire libre, se observa un ligero aumento del 9.5% en comparación con las muestras de control sin nudo. Por último, las muestras anudadas al aire libre experimentaron una disminución del -22.5% en el módulo de elasticidad de tracción.

La **Figura 291** muestra las curvas de tensión frente a desplazamiento para los cuatro tipos de muestras analizadas. Las curvas se presentan diferenciando entre muestras sin nudo (izquierda) y muestras con nudo (derecha).

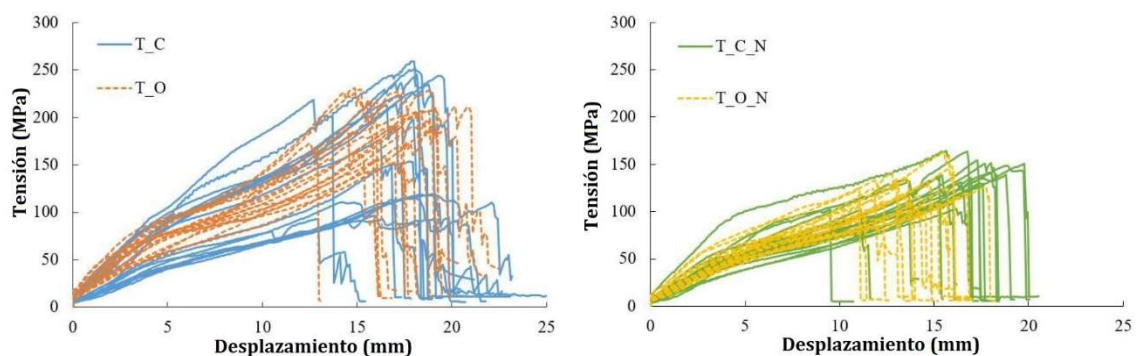


Figura 291. Curvas tensión-desplazamiento para las probetas sometidas al ensayo de tracción.
Izquierda: Muestras sin nudo.
Derecha: Muestras con nudo.

Se aprecia que no existen diferencias en el comportamiento mecánico de las probetas debido al efecto de la exposición ambiental entre grupos.

Las muestras anudadas, que presentan menor rigidez, tienen un comportamiento mucho más lineal hasta la rotura que las muestras sin nudo. Esto puede deberse a que la presencia de un nudo ejerce un efecto homogeneizador entre las posibles diferencias de deformación que se producen entre las caras externa e interna del bambú, teniendo éstas diferentes propiedades mecánicas.

La **Figura 292** muestra una rotura típica para cada uno de los cuatro tipos de muestras ensayadas a tracción vertical paralela a las fibras.

Como era de esperar, en el caso de las muestras anudadas (T_C_N y T_O_N), la rotura se produjo en el nudo, ya que es un punto de concentración de tensiones. La grieta comienza en la cara externa de la sílice y se extiende repentinamente hacia el resto de la sección. Este tipo de fisura concentrada en un punto justifica la mayor homogeneización del comportamiento mecánico que se observa en la **Figura 291**.

En el caso de las muestras sin nudo, la rotura se produce de forma laminar, ocasionando la rotura de forma dispar de las fibras de sílice. Este fallo de la capa exterior (transferido de forma súbita

y similar a la capa interior) produce una mayor dispersión en el comportamiento mecánico del material sometido a tracción, como se ha demostrado anteriormente.



Figura 292. Imágenes de las probetas después del ensayo de tracción vertical paralela a las fibras.

4.2.3. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN EN 4 PUNTOS

Primero, se llevó a cabo un estudio cualitativo comparativo para evaluar la influencia de la ubicación de la capa de sílice (en tensión o compresión) en una prueba de flexión. Para ello, se extrajeron muestras gemelas del mismo culmo para cada tipo de estudio: control y exposición ambiental externa, con y sin nudo.

La **Figura 293** muestra los resultados de tensión frente a desplazamiento teniendo en cuenta la tensión en el área de los puntos de aplicación de la carga sin incluir el nudo, $f_{b,la}$.

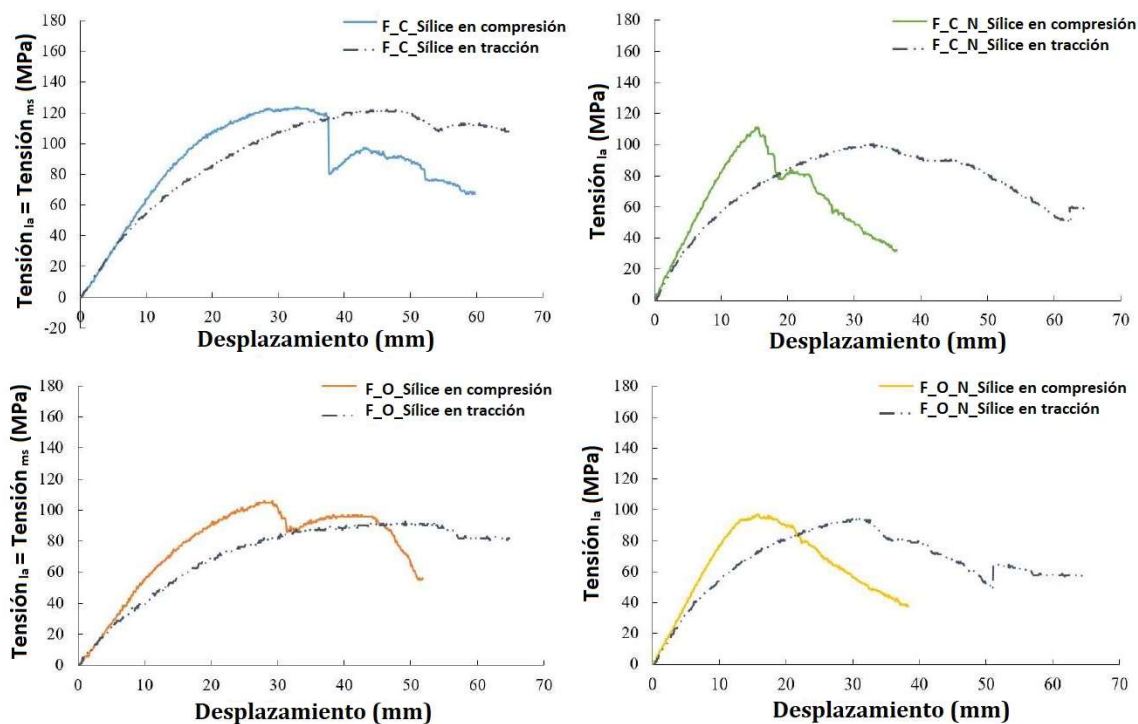


Figura 293. Curvas tensión-desplazamiento para probetas sometidas a ensayos de flexión en 4 puntos, con la capa de sílice en las caras de compresión y tracción.

Como se observa en la **Figura 293**, aunque los resultados de la tensión máxima son similares, el comportamiento mecánico depende en gran medida de la posición de la sílice.

En todos los casos, cuando la sílice se encuentra en la cara de compresión, se logran valores de rigidez más altos. Esto se debe principalmente a que la carga se aplica a la parte rígida de la sección, y dicha capa actúa como refuerzo.

Cuando la sílice se encuentra en la cara de tensión, la capa con mayor contenido de lignina actúa como un elemento de mayor plasticidad, permitiendo que la sección logre valores de desplazamiento más altos a costa de una menor rigidez general.

Por este motivo, en este estudio se ha optado por trabajar con la sílice en compresión para tener las propiedades mecánicas óptimas de rigidez y flexión. No obstante, en situaciones donde la ductilidad sea un aspecto relevante, se debe considerar la segunda opción.

Las siguientes tablas (**Tabla 48**, **Tabla 49**, **Tabla 50** y **Tabla 51**) recogen los resultados obtenidos en los ensayos de flexión en 4 puntos para cada una de las probetas de GaK.

Tabla 48. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Carga máxima (kN)	Área, l_a (mm ²)	f_{b,l_a} (kN/mm ²)	f_{b,l_a} (MPa)	Área, m_s (mm ²)	f_{b,m_s} (kN/mm ²)	f_{b,m_s} (MPa)
F_C_03_01	0,570	193,70	0,09118	91,18	193,70	0,09118	91,18
F_C_03_02	0,673	158,32	0,12888	128,88	158,32	0,12888	128,88
F_C_05_01	0,473	164,09	0,09175	91,75	164,09	0,09175	91,75
F_C_05_02	0,539	139,76	0,14218	142,18	139,76	0,14218	142,18
F_C_08_01	0,474	120,60	0,13991	139,91	120,60	0,13991	139,91
F_C_08_02	0,370	104,60	0,13505	135,05	104,60	0,13505	135,05
F_C_16_01	0,386	117,24	0,13950	139,50	117,24	0,13950	139,50
F_C_19_01	0,380	118,64	0,12034	120,34	118,64	0,12034	120,34
F_C_19_02	0,415	152,97	0,09581	95,81	152,97	0,09581	95,81
F_C_19_03	0,399	119,70	0,11990	119,90	119,70	0,11990	119,90
F_C_21_01	0,390	116,51	0,13751	137,51	116,51	0,13751	137,51
F_C_21_02	0,306	107,60	0,11655	116,55	107,60	0,11655	116,55
F_C_21_03	0,341	120,46	0,11039	110,39	120,46	0,11039	110,39
F_C_21_04	0,403	129,68	0,11324	113,24	129,68	0,11324	113,24
F_C_21_05	0,431	133,34	0,12764	127,64	133,34	0,12764	127,64
F_C_26_01	0,296	105,68	0,12698	126,98	105,68	0,12698	126,98
F_C_26_02	0,416	148,62	0,11344	113,44	148,62	0,11344	113,44
F_C_26_03	0,390	149,84	0,09751	97,51	149,84	0,09751	97,51
Promedio	0,425	133,41	0,11932	119,32	133,41	0,11932	119,32
Desviación estándar (MPa)				16,96	Desviación estándar (MPa)		16,96
Error estándar (%)				4,00	Error estándar (%)		4,00

Tabla 49. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo almacenadas en cámara climática.

Nombre	Carga máxima (kN)	Área, l_a (mm ²)	f_{b,l_a} (kN/mm ²)	f_{b,l_a} (MPa)	Área, m_s (mm ²)	f_{b,m_s} (kN/mm ²)	f_{b,m_s} (MPa)
F_C_N_01_01	0,370	139,75	0,10482	104,82	205,99	0,04996	49,96
F_C_N_01_02	0,506	157,36	0,10482	104,82	195,32	0,06872	68,72
F_C_N_02_01	0,438	118,98	0,13690	136,90	165,11	0,06926	69,26
F_C_N_05_01	0,457	143,65	0,10180	101,80	218,10	0,04361	43,61
F_C_N_05_02	0,522	185,15	0,08866	88,66	305,75	0,03744	37,44
F_C_N_07_01	0,491	119,38	0,14199	141,99	185,91	0,05834	58,34
F_C_N_07_02	0,444	118,68	0,00374	3,7411	166,85	0,00266	2,66
F_C_N_07_03	0,409	121,72	0,11400	114,00	195,36	0,04346	43,46
F_C_N_07_04	0,535	157,56	0,10998	109,98	258,82	0,04049	40,49
F_C_N_10_01	0,428	198,67	0,06158	61,58	294,60	0,02886	28,86
F_C_N_10_02	0,381	118,86	0,11110	111,10	201,34	0,04038	40,38
F_C_N_10_03	0,408	122,87	0,11782	117,82	223,05	0,03580	35,80
F_C_N_13_01	0,486	130,00	0,14791	147,91	227,33	0,04779	47,79
F_C_N_15_01	0,715	148,66	0,15847	158,47	260,57	0,05134	51,34
F_C_N_15_02	0,596	167,66	0,11827	118,27	252,54	0,05380	53,80
F_C_N_21_01	0,525	124,68	0,14914	149,14	189,28	0,06440	64,40
F_C_N_21_02	0,464	126,59	0,12786	127,86	180,47	0,06112	61,12
F_C_N_22_01	0,873	166,69	0,16094	160,94	312,75	0,04705	47,05
Promedio	0,503	142,61	0,11443	114,43	224,40	0,04692	46,92
Desviación estándar (MPa)				37,56	Desviación estándar (MPa)		15,89
Error estándar (%)				8,85	Error estándar (%)		3,75

Tabla 50. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth sin nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Carga máxima (kN)	Área, l_a (mm ²)	f_{b,l_a} (kN/mm ²)	f_{b,l_a} (MPa)	Área, m_s (mm ²)	f_{b,m_s} (kN/mm ²)	f_{b,m_s} (MPa)
F_O_05_01	0,422	131,36	0,11954	119,54	131,36	0,11954	119,54
F_O_17_01	0,574	141,23	0,13337	133,37	141,23	0,13337	133,37
F_O_17_02	0,110	116,51	0,03880	38,80	116,51	0,03880	38,80
F_O_25_01	0,422	116,31	0,14141	141,41	116,31	0,14141	141,41
F_O_25_02	0,329	107,23	0,12439	124,39	107,23	0,12439	124,39
F_O_37_01	0,367	124,87	0,11060	110,60	124,87	0,11060	110,60
F_O_37_02	0,441	130,02	0,11825	118,25	130,02	0,11825	118,25
F_O_37_03	0,480	140,03	0,11756	117,56	140,03	0,11756	117,56
F_O_37_04	0,477	137,86	0,12328	123,28	137,86	0,12328	123,28
F_O_42_01	0,448	161,50	0,09791	97,91	161,50	0,09791	97,91
F_O_52_01	0,538	149,82	0,11738	117,38	149,82	0,11738	117,38
F_O_52_02	0,554	146,02	0,12170	121,70	146,02	0,12170	121,70
F_O_68_01	0,480	143,45	0,11250	112,50	143,45	0,11250	112,50
F_O_68_02	0,470	138,24	0,11633	116,33	138,24	0,11633	116,33
F_O_69_01	0,438	171,13	0,08510	85,10	171,13	0,08510	85,10
F_O_92_01	0,322	141,26	0,07131	71,31	141,26	0,07131	71,31
F_O_92_02	0,332	139,62	0,07955	79,55	139,62	0,07955	79,55
F_O_105_01	0,564	143,15	0,12518	125,18	143,15	0,12518	125,18
Promedio	0,432	137,76	0,10856	108,56	137,76	0,10856	108,56
			Desviación estándar (MPa)		Desviación estándar (MPa)		25,23
			Error estándar (%)		Error estándar (%)		5,95

Tabla 51. Resultados de los ensayos de flexión en 4 puntos de las probetas de *Guadua angustifolia* Kunth con nudo expuestas al aire libre.

Nombre	Carga máxima (kN)	Área, l_a (mm ²)	f_{b,l_a} (kN/mm ²)	f_{b,l_a} (MPa)	Área, m_s (mm ²)	f_{b,m_s} (kN/mm ²)	f_{b,m_s} (MPa)
F_O_N_19_01	0,400	119,84	0,12382	123,82	183,88	0,05129	51,29
F_O_N_19_02	0,318	117,51	0,09324	93,24	171,15	0,04266	42,66
F_O_N_19_03	0,402	120,36	0,12283	122,83	164,57	0,06488	64,88
F_O_N_51_01	0,497	143,23	0,12353	123,53	196,24	0,06547	65,47
F_O_N_51_02	0,224	127,50	0,06566	65,66	180,09	0,03174	31,74
F_O_N_51_03	0,520	133,54	0,13991	139,91	206,74	0,05767	57,67
F_O_N_51_04	0,464	136,87	0,12313	123,13	272,17	0,03093	30,93
F_O_N_53_01	0,438	128,70	0,11642	116,42	166,77	0,07026	70,26
F_O_N_53_02	0,448	142,21	0,10847	108,47	235,17	0,04005	40,05
F_O_N_53_03	0,360	119,20	0,10719	107,19	162,45	0,05734	57,34
F_O_N_56_01	0,473	170,21	0,07610	76,10	271,67	0,03163	31,63
F_O_N_82_01	0,387	171,94	0,07526	75,26	222,05	0,04361	43,61
F_O_N_82_02	0,474	157,83	0,10241	102,41	223,30	0,04931	49,31
F_O_N_82_03	0,296	119,90	0,09489	94,89	177,02	0,04469	44,69
F_O_N_99_01	0,323	109,95	0,12791	127,91	211,34	0,03454	34,54
F_O_N_99_02	0,331	107,78	0,13449	134,49	165,05	0,05821	58,21
F_O_N_99_03	0,387	118,25	0,13679	136,79	164,08	0,07016	70,16
F_O_N_99_04	0,318	114,35	0,10648	106,48	155,69	0,05459	54,59
Promedio	0,392	131,06	0,10992	109,92	196,08	0,04995	49,95
			Desviación estándar (MPa)		Desviación estándar (MPa)		21,96
			Error estándar (%)		Error estándar (%)		5,18

La **Figura 294** y la **Tabla 52** recogen los resultados de tensión y módulo de elasticidad de los ensayos de flexión, considerando los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$ y $E_{b,la}$) y la sección ubicada en el centro geométrico de la probeta ($f_{b,ms}$ y $E_{b,ms}$), coincidiendo esta posición con el nudo en el caso de los especímenes anudados. Esta distinción se realizó con el objetivo de determinar la influencia del nudo.

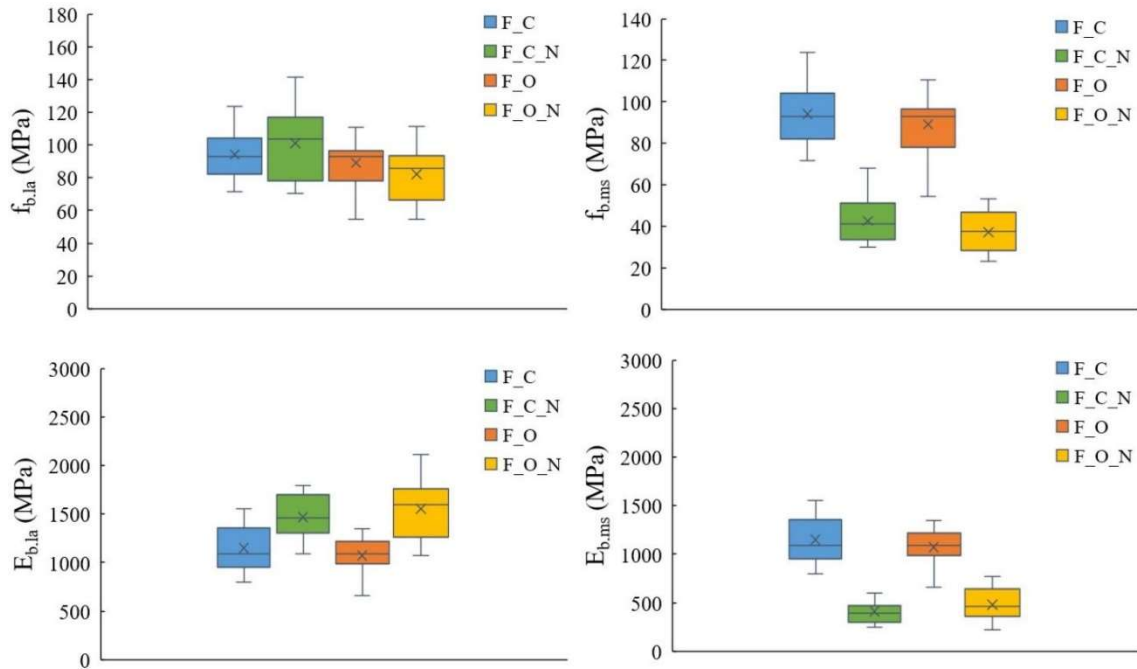


Figura 294. Resultados del ensayo de flexión en 4 puntos.

Arriba-Izquierda: Tensión máxima en flexión considerando la zona en los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$).

Arriba-Derecha: Tensión máxima en flexión considerando el área central de la probeta ($f_{b,ms}$).

Abajo-Izquierda: Módulo de elasticidad en flexión considerando la zona en los puntos de aplicación de la carga ($E_{b,la}$).

Abajo-Derecha: Módulo de elasticidad en flexión considerando el área central de la probeta ($E_{b,ms}$).

x: Valor medio.

Línea horizontal: Mediana.

Área coloreada: Primer y tercer cuartil.

Líneas verticales: Valores máximo y mínimo.

Tabla 52. Tensión máxima, módulo de elasticidad y contenido de humedad para probetas sometidas a flexión en 4 puntos.

Valores medios \pm DE (desviación estándar) y análisis estadístico.

Las letras indican diferencias significativas entre medias (valor $p < 0.05$).

Descripción probeta	Nom.	$f_{b,la}$ (MPa)	Δ (%)	$f_{b,ms}$ (MPa)	Δ (%)	$E_{b,la}$ (MPa)	Δ (%)	$E_{b,ms}$ (MPa)	Δ (%)	MC (%)
Control, sin nudo	F_C	119 \pm 17 A	0.0	119 \pm 17 A	0.0	1150 \pm 248 BC	0.0	1150 \pm 248 A	0.0	10.3 \pm 1.3
Control, con nudo	F_C_N	114 \pm 38 A	-4.1	47 \pm 16 B	-60.7	1468 \pm 284 AB	27.6	410 \pm 133 B	-64.4	9.6 \pm 1.1
Aire libre, sin nudo	F_O	108 \pm 25 A	-9.0	108 \pm 25 A	-9.0	1072 \pm 183 C	-6.8	1072 \pm 183 A	-6.8	9.4 \pm 0.8
Aire libre, con nudo	F_O_N	110 \pm 22 A	-7.9	50 \pm 13 B	-58.0	1553 \pm 293 A	35.0	482 \pm 171 B	-58.1	9.4 \pm 1.2

En el caso de las tensiones y módulos de elasticidad en los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$ y $E_{b,la}$), no se observaron diferencias estadísticas para ninguno de los cuatro grupos de muestras, aunque, en promedio, el esfuerzo de flexión ($f_{b,la}$) para las muestras expuestas a condiciones exteriores fue -9.0% y -7.9% menor con respecto a la muestra control sin nudo.

No se observó influencia del nudo sobre la tensión de flexión en los puntos de aplicación de la carga ($f_{b,la}$).

En cuanto al módulo de elasticidad, se pueden distinguir tres grupos estadísticos: A) muestras con nudo; B) muestras de control con y sin nudo; C) muestras sin nudo.

En general, se observa que el nudo aumenta la rigidez en la zona de aplicación de la carga, lo que puede atribuirse al efecto homogeneizador del nudo. El módulo de elasticidad en las muestras anudadas fue 27.6% y 35.0% mayor que en las muestras F_C.

En el caso de las tensiones y módulos de elasticidad calculados para la sección del centro geométrico de la probeta ($f_{b,ms}$ y $E_{b,ms}$), se aprecia que el área del nudo se encuentra en un estado de tensión mucho menor que las zonas de aplicación de la carga.

Este resultado es un indicador de que el área del nudo no es el área crítica de la muestra, sino que serán las áreas correspondientes a la aplicación de la carga las que causarán la falla final en flexión, ya que están sujetas a una mayor tensión para la misma carga. En consecuencia, la zona del nudo presenta una rigidez menor.

Este hallazgo demuestra que, en presencia de nudos, los cálculos de resistencia a la flexión y módulo de elasticidad deben tener en cuenta la sección sin nudo, ya que de lo contrario se subestimaría su capacidad portante.

La **Figura 295** muestra las curvas de tensión frente a desplazamiento de las muestras analizadas.

En el caso de las curvas $f_{b,la}$, se observa que las probetas sin nudo (arriba a la izquierda) presentan, en general, un comportamiento similar a las probetas con nudo (arriba a la derecha), independientemente del tipo de exposición. No obstante, se aprecia una tendencia a disminuir la tensión máxima y la rigidez en los especímenes expuestos al aire libre.

En ambos casos, se observa un comportamiento elastoplástico hasta que se alcanza la tensión máxima, tras lo que se produce una disminución escalonada de la tensión. Este descenso escalonado (comportamiento dúctil) es de gran relevancia para la seguridad estructural y su principal causa es la rotura progresiva de las fibras del lado opuesto a la capa de sílice, que se encuentran sometidas a tracción.

En el caso de las muestras anudadas, el aumento de rigidez mencionado anteriormente es muy evidente. Sin embargo, debido a que el nudo actúa como elemento de refuerzo, la deformación máxima que pueden alcanzar las muestras es mucho menor (alrededor de un 22% menos que para las muestras sin nudo). Asimismo, dado que la capa de sílice se encuentra en la zona de compresión, la rotura se produce de forma dúctil.

Por último, en cuanto a las curvas tensión-desplazamiento en el área del nudo ($f_{b,ms}$), se observa un estado de tensión más bajo que en la zona de los soportes.

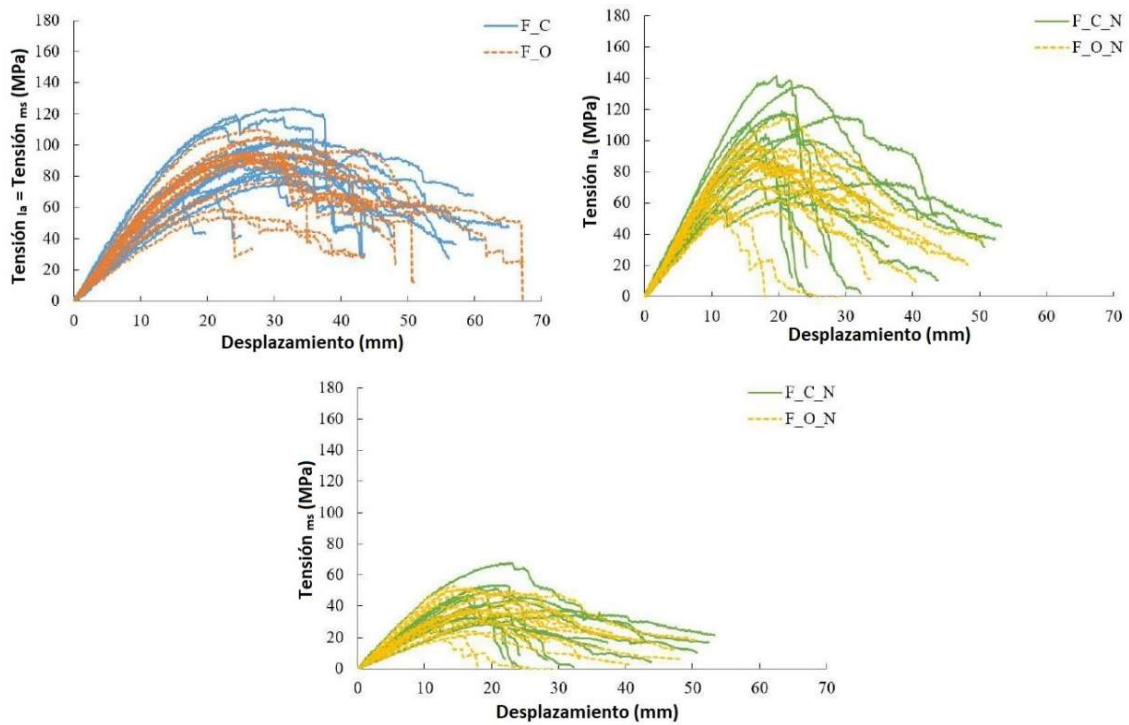


Figura 295. Curvas tensión-desplazamiento para las probetas sometidas al ensayo de flexión.

Arriba a la izquierda: Muestras sin nudo.

Arriba a la derecha: Muestras con nudo, considerando la zona entre los apoyos.

Abajo: Muestras con nudo, considerando la sección del centro geométrico de la probeta.

La **Figura 296** muestra una rotura típica para cada uno de los cuatro tipos de muestras ensayadas a flexión en 4 puntos.



Figura 296. Imágenes de las probetas después del ensayo de flexión en 4 puntos.

En el caso de las muestras sin nudo, se evidencia que la capa de sílice actúa como refuerzo de la sección, produciendo una rotura laminar por tracción de las fibras sometidas a este esfuerzo.

En el caso de las muestras anudadas, a pesar de que el nudo se encuentra en un estado de tensión menor, sigue siendo un punto singular donde comienza la fractura final. En este tipo de especímenes, se aprecia que las fisuras se originan en la zona cercana al nudo y se propagan hacia la zona de los apoyos, que son los que soportan mayor esfuerzo. La ruptura final se produce en un modo de tracción-cizallamiento.

5. CONCLUSIONES

En esta Tesis Doctoral se ha realizado un análisis detallado sobre el bambú, su cultivo, usos y aplicabilidad en el sector de la Construcción.

Además, se han realizado ensayos de laboratorio de tracción vertical paralela a las fibras a la especie de bambú *Bambusa vulgaris Vulgaris*, procedente de la localidad granadina de Motril (situada en la Costa Tropical, al sur de España), donde se cultiva de forma natural.

Para complementar la experimentación, se realizó también un análisis de emisión acústica (EA) a las muestras ensayadas, con la intención de comprobar si el comportamiento acústico del bambú se corresponde con su patrón de rotura al ser sometido al esfuerzo de tracción y determinar la influencia que tiene el diafragma en este tipo de ensayo.

Posteriormente, gracias a la adquisición de *Guadua angustifolia Kunth* procedente del Eje Cafetero colombiano (concretamente de los municipios de Palmira y Candelaria, en el área metropolitana de Cali, Departamento del Valle del Cauca), se puso en marcha un nuevo estudio.

Para ello, parte del material se empleó en la construcción de una estructura de pequeñas dimensiones que se mantuvo expuesta a la intemperie en los exteriores de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación de la Universidad de Granada (al sur de España) durante 2 años, mientras que el resto del material permaneció en el interior de una cámara climática durante el mismo periodo de tiempo.

Pasado el plazo establecido, se elaboraron especímenes a partir de ambos grupos de materiales, fabricando probetas con nudo y sin nudo para cada tipo de ensayo. De este modo, y tomando como grupo de control las muestras sin nudo conservadas en la cámara climática, se pudo evaluar la influencia del nudo y de la exposición ambiental sobre la especie objeto de estudio.

Se realizaron ensayos de compresión vertical paralela a las fibras, tracción vertical paralela a las fibras y flexión en 4 puntos, analizando la deformación de las muestras en los ensayos de tracción y flexión y realizando un análisis estadístico de los resultados obtenidos.

En el presente apartado se presentan las conclusiones extraídas divididas según las principales actividades que se han desarrollado.

5.1. ESTUDIO DOCUMENTAL DEL BAMBÚ

- El bambú es un material natural y sostenible que cuenta con más de 1600 especies reconocidas y aceptadas, y que reúnen excelentes características como son:
 - Su rápido crecimiento y bajo coste de producción.
 - Su capacidad para reducir los gases de efecto invernadero.
 - Su capacidad para regular los caudales de agua.
 - Su idoneidad y adaptación climática.

- Sus características físico-mecánicas, que incluyen: peso reducido, alta resistencia, gran flexibilidad y alta resistencia sísmica.
 - Su baja producción de residuos.
 - Su versatilidad y gran variedad de aplicaciones.
- Debido a las características mencionadas, el bambú contribuye a la consecución de varios Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), destacando: el ODS 6 Agua Limpia y Saneamiento, pues se ha demostrado que ayuda a limpiar el agua de sustancias contaminantes como el azul de metileno; el ODS 13 Acción por el Clima, pues es una de las plantas que mayor cantidad de CO₂ consume y su rápido crecimiento permite salvaguardar otras especies maderables de crecimiento más lento; y el ODS 15 Vida de Ecosistemas Terrestres, pues los bosques de bambú constituyen auténticos ecosistemas y son muchas las especies animales para las que el bambú es una fuente principal de alimento.
 - El bambú contribuye también a la consecución de otros ODS, pues su cultivo ayuda a reducir la pobreza, puede ser consumido como alimento, tiene propiedades medicinales, diferentes asociaciones y movimientos promueven el trabajo decente e igualitario basado en el procesado del bambú, se ha demostrado que puede producir energía (aunque aún con resultados humildes) y, sobre todo, son muchas las personas que, a lo largo del mundo, construyen sus viviendas con él.
 - Profundizando en su contribución al medioambiente, hay que señalar que el bambú es una de las especies vegetales que mayor cantidad de dióxido de carbono consumen, por lo que los bosques de bambú son considerados como sumideros de CO₂.
 - Además, el bambú protege las riveras de los cursos de agua, regula hidrológicamente las microcuencas, disminuye el riesgo de deslizamientos, protege el suelo de la erosión, recicla nutrientes y alberga flora y fauna local.
 - Como ya se ha mencionado anteriormente, el cultivo de bambú podría servir como medio de protección y salvaguarda de otras especies maderables de mayor valor económico y crecimiento más lento.
 - Su rápido crecimiento lo convierte en una planta ideal para una reforestación rápida del ambiente.
 - En referencia a los usos del bambú, la existencia de más de 1600 especies con características propias y diferentes a las del resto, hacen de él un material con multitud de aplicaciones.
 - Tradicionalmente, el bambú se ha empleado para la fabricación de todo tipo de utensilios y objetos de uso cotidiano, así como artesanías de lo más variadas.
 - Muchas de las especies conocidas de bambú son consumidas como alimento y/o presentan propiedades terapéuticas.
 - El desarrollo de la tecnología ha permitido fabricar con él elementos textiles y utilizarlo como biomasa. Además, se ha empleado como absorbente de contaminantes del agua y está siendo investigado como fuente de energía térmica y eléctrica.
 - En el sector de la Construcción, el bambú ha sido empleado tradicionalmente para fabricar todo tipo de estructuras, construcciones y edificios. Esto se debe a la versatilidad del bambú, que permite emplearlo con carácter estructural, en cerramientos, en revestimientos y en multitud de elementos de acabado.
 - Las innovaciones desarrolladas permiten que, a día de hoy, las cañas de bambú puedan ser transformadas en gran cantidad de elementos derivados, cada uno de ellos con diferentes propiedades y aplicaciones.

- De entre estos derivados, destacan por su uso los laminados de bambú, los composites y los tableros de fibras y partículas de bambú. En cambio, por su novedad, hay que mencionar el bambú enroscado, el papel de bambú y el textil de bambú.
- Como ha quedado demostrado, el bambú puede emplearse para construir andamios, puentes, viviendas tradicionales y sociales, construcciones efímeras o con carácter de urgencia y, por supuesto, todo tipo de grandes construcciones.
- En España no existe ninguna norma ni legislación que regule el cultivo, tratamiento y uso del bambú (ni como especie, ni como material).
- Si deseamos que el bambú forme parte de nuestra sociedad como especie vegetal cultivable y explotable en todos sus aspectos (incluido como material de construcción) se debe regular su cultivo, tratamiento y uso. Para apoyar esta idea, la Asociación Ibérica del Bambú ha iniciado (con el asesoramiento y apoyo de INBAR) la redacción de una propuesta de normativa sobre el bambú.
- En España existen ya algunos cultivos de diferentes especies de bambú, la mayoría de ellos destinados a la producción de biomasa.
- También hay algunas edificaciones en España en las que se ha utilizado bambú, siendo empleado como material de acabado en las construcciones de mayores dimensiones y como material estructural en las otras.
- A través de la realización de congresos, conferencias, webinarios y talleres, diferentes organismos, instituciones, empresas y particulares están dando a conocer el bambú y su gran abanico de posibilidades en nuestra sociedad.

5.2. ENSAYOS DE *BAMBUSA VULGARIS VULGARIS*

- Se establece una correlación entre el comportamiento de fractura por tracción vertical paralela a las fibras de las probetas elaboradas a partir de las cañas de *Bambusa vulgaris Vulgaris* y el patrón de emisión acústica (EA) registrado durante el ensayo mediante el uso de sensores piezoeléctricos multirresonantes.
- Se ha demostrado que existe una buena concordancia entre el patrón de fractura observado macroscópicamente en la probeta y los resultados de la ubicación de la fuente de emisión acústica.
- Se ha comprobado que la fractura tiene lugar en dos fases diferenciadas:
 - La primera falla (hasta alcanzar la carga máxima) se produce por la rotura masiva de fibras de madera de la pared interna de la muestra. A esta falla le sigue una rotura longitudinal masiva en esta área. Además, se comprueba que antes de alcanzar la carga máxima, hay un aumento muy significativo de la actividad de EA.
 - La segunda falla (desde que se alcanza la carga máxima hasta que tiene lugar la falla final de la probeta) se produce por la rotura masiva de las fibras de la pared externa de la muestra, que tiene mayor dureza que la madera de la parte interna, debido a la mayor densidad de fibras existente en dicha zona.
- Se puede concluir que el centro de gravedad del espectro de las señales EA (CoG) es una característica válida para distinguir entre señales provenientes de la rotura de la fibra de bambú (con CoG mayor de 200 kHz) y señales procedentes de otros mecanismos (desunión de la matriz de fibra y agrietamiento de matriz, por ejemplo, con CoG menor de 200 kHz).
- Esta Tesis Doctoral, así como trabajos previos realizados por otros autores y mencionados a lo largo del texto, demuestran la utilidad de la emisión acústica como un método confiable

para la obtención de información de gran interés para la caracterización mecánica del bambú y el análisis de su proceso de fractura.

- En el futuro, la emisión acústica puede ser de gran interés práctico e industrial para el diseño de elementos estructurales, clasificación de resistencia del bambú y, especialmente, para el diseño de sistemas de monitoreo continuo de daños de estructuras de bambú (*Structural Health Monitoring*) que anuncien eventuales fallas catastróficas de la estructura a través de alarmas basadas en características de emisión acústica, permitiendo así reducir los riesgos materiales y humanos.

5.3. ENSAYOS DE *GUADUA ANGUSTIFOLIA KUNTH*

- La investigación realizada ha permitido evaluar el efecto de la exposición ambiental sobre el bambú *Guadua angustifolia Kunth* en relación a tres propiedades mecánicas, comparando muestras con y sin nudo. Para evaluar los mecanismos de deterioro, se necesita una investigación más profunda, que incluya un estudio de los cambios a nivel microscópico.
- Cuando se someten a compresión vertical paralela a las fibras, las muestras de *Guadua angustifolia Kunth* evidencian claramente cómo el efecto del clima afecta adversamente a la resistencia.
- También se aprecia una disminución de la rigidez en las probetas expuestas a la intemperie sin nudo. Esta disminución de la rigidez no se observa en las muestras anudadas, ya que los nudos sirven como refuerzo frente al agrietamiento que el esfuerzo de compresión provoca en la pared de sílice.
- En general, en comparación con los especímenes procedentes de la cámara climática, el agrietamiento producido en las probetas durante el ensayo de compresión se acentúa notablemente en las muestras que permanecieron expuestas al aire libre.
- En cuanto a los ensayos de tracción vertical paralela a las fibras, las muestras con nudo presentaron una disminución de entre el 22% y el 39% en la tensión máxima en comparación con las probetas sin nudo.
- De igual modo, las probetas anudadas presentan un módulo de elasticidad de tracción de entre el 20% y el 22% menor que las probetas sin nudo debido a la presencia del nudo en la parte central de la probeta.
- No se observan diferencias estadísticas relevantes entre los diferentes tipos de exposición, ni tampoco entre muestras con y sin nudo.
- En relación al comportamiento mecánico de las probetas sometidas al ensayo de tracción, las probetas anudadas mostraron una menor rigidez y una mayor homogeneidad que las muestras sin nudo. Esto se debe a que el nudo ejerce un efecto homogeneizador entre las diferentes deformaciones que se producen en las caras externa e interna del bambú, por lo que termina produciéndose una fractura frágil en el nudo, al tratarse éste de un punto de concentración de tensiones.
- Las muestras sin nudo, en cambio, presentan una rotura laminar debido a la rotura dispar de las fibras en la zona de la sílice. Este fallo se transfiere de forma súbita a la capa interior, por lo que se produce una mayor dispersión en el comportamiento mecánico del material.
- En las muestras sometidas a flexión en 4 puntos, se realizó una evaluación cualitativa de la relevancia de la posición de la capa de sílice en el ensayo, demostrando que cuando la capa de sílice se encuentra en la zona de compresión, se alcanzan valores de rigidez más altos.

- La presencia de nudo en las probetas sometidas a flexión ocasiona que la sección ensayada en ellas no sea constante, por lo que se realizó una evaluación en dos puntos diferentes de los especímenes:
 - En los puntos de aplicación de la carga (*la*).
 - En el centro geométrico de la pieza (*ms*).
- Estadísticamente, teniendo en cuenta la resistencia a flexión en los puntos de aplicación de la carga (*la*), no se observaron diferencias entre los cuatro grupos de estudio.
- En cambio, se observó que, independientemente del tipo de exposición, la rigidez era mayor en las muestras anudadas debido al efecto homogeneizador (mencionado anteriormente) que tiene el nudo en relación a la distribución de tensiones. El módulo de elasticidad en las muestras anudadas fue entre el 27% y el 35% mayor que en las muestras sin nudo.
- En el centro geométrico de la probeta (*ms*), la presencia de nudo implicó un aumento de la sección en dicha zona, por lo que ésta se encuentra en un estado de tensión menor pese a estar sometida a la misma carga que el resto de la pieza.
- Por lo tanto, se concluye que la zona crítica de la probeta sometida a mayor esfuerzo es la zona de aplicación de la carga.
- Por último, en todos los casos se comprobó que las probetas de *Guadua angustifolia Kunth* sometidas a flexión en 4 puntos, muestran un comportamiento dúctil frente a la rotura, pues presentan un comportamiento elastoplástico hasta alcanzar la tensión máxima, seguido de una disminución escalonada de la tensión. Esto se asocia a la presencia en compresión de la cara de sílice, que provoca que las fibras del lado opuesto (sometidas a tracción) fallen gradualmente.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ABC, 2017. *Bicicletas de bambú que reducen la pobreza en Ghana*. [En línea]
Available at: https://www.abc.es/natural/vivirenverde/abci-bicicletas-bambu-reducen-pobreza-ghana-201602221247_noticia.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F
[Último acceso: 8 Octubre 2020].
- Abhilash, J., 2016. Bamboo: a natural resource for mankind - an overview. *International Journal of Current Agricultural Science*, 6(7), pp. 81-83.
- Aldama, Z., 2019. *El bambú no es solo comida para osos panda*. [En línea]
Available at: https://elpais.com/elpais/2019/09/11/planeta_futuro/1568199403_231153.html
[Último acceso: 1 Febrero 2021].
- Álvarez Vega, F. L., 2018. *Caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del bambú Bambusa vulgaris para uso estructural en Colombia*. Primera ed. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Amada, S. y otros, 1997. Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, Volumen 28, pp. 13-20.
- Amada, S. y otros, 1996. The mechanical structures of bamboo in viewpoint of functionally gradiente and composite materials. *Journal of Composite Materials*, 30(7), pp. 800-819.
- Amada, S. & Untao, S., 2001. Fracture properties of bamboo. *Composites Part B: Engineering*, Volumen 32, p. 451-459.
- Amat Rodrigo, J., 2016a. *ANOVA análisis de varianza para comparar múltiples medias*. [En línea]
Available at: https://www.cienciadedatos.net/documentos/19_anova
[Último acceso: 15 Diciembre 2021].
- Amat Rodrigo, J., 2016b. *Test Kruskal-Wallis*. [En línea]
Available at: https://www.cienciadedatos.net/documentos/20_kruskal-wallis_test
[Último acceso: 15 Diciembre 2021].
- Ambientum, 2018. *Sistema innovador de tratamiento de aguas residuales basado en el bambú*. [En línea]
Available at: <https://www.ambientum.com/ambientum/energia/sistema-innovador-de-tratamiento-de-aguas-residuales-basado-en-el-bambu.asp>
[Último acceso: 29 Diciembre 2021].
- Amede, E. A., Hailemariam, E. K., Hailemariam, L. M. & Nuramo, D. A., 2021. A Review of Codes and Standards for Bamboo Structural Design. *Advances in Materials Science and Engineering*, Volumen 2021, p. 4788381 (Versión online).
- Anon., s.f.. *Cadenas forestales en Colombia*. [En línea]
Available at:
http://maderas.ut.edu.co/especies/pagina_especie.php?especie=GUADUA#descripcion
[Último acceso: 28 Enero 2020].

Añazco, M., 2013. *Estudio de la vulnerabilidad del bambú (Guadua angustifolia) al cambio climático en la costa del Ecuador y norte Perú*. Primera ed. Quito: INBAR.

Arango Díaz, L., Barrios Villafane, V., Cardona Jaramillo, J. J. & Zuluaga Puerta, V., 2005. *Construcción verde y bioclimática*, Manizales: Programa Internacional de Cooperación Urbana (Unión Europea-Norte América).

ArchDaily, 2008. *Vivienda Carabanchel / Foreign Office Architects*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/1580/caranbachel-housing-foreign-office-architects>
[Último acceso: 11 Agosto 2021].

ArchDaily, 2010a. *Passive House / Karawitz Architecture*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/84165/passive-house-karawitz-architecture>
[Último acceso: 14 Marzo 2021].

ArchDaily, 2010b. *The Green School / IBUKU*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/81585/the-green-school-pt-bambu>
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ArchDaily, 2012a. *Dai Lai Conference Hall / Vo Trong Nghia Architects*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/310549/dai-lai-conference-hall-vo-trong-nghia-architects>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

ArchDaily, 2012b. *The Green Village / IBUKU*. [En línea]
Available at: https://www.archdaily.com/296667/the-green-village-pt-bambu?ad_medium=office_landing&ad_name=article
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ArchDaily, 2015. *Diamond Island Community Center / Vo Trong Nghia Architects*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/778269/diamond-island-community-center-vo-trong-nghia-architects>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

ArchDaily, 2018. *Aldo's Kitchen / IBUKU*. [En línea]
Available at: https://www.archdaily.com/886674/aldos-kitchen-ibuku?ad_medium=office_landing&ad_name=article
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ArchDaily, 2019. *Sharma Springs / IBUKU*. [En línea]
Available at: https://www.archdaily.com/641170/sharma-springs-ibuku?ad_medium=office_landing&ad_name=article
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ArchDaily, 2020. *Ananda House / IBUKU*. [En línea]
Available at: https://www.archdaily.com/883984/ananda-house-ibuku?ad_medium=office_landing&ad_name=article
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ArchDaily, 2021. *Kura Kura Badminton Courts*. [En línea]
Available at: https://www.archdaily.com/957537/kura-kura-badminton-courts-ibuku-plus-studio-jencquel?ad_medium=office_landing&ad_name=article
[Último acceso: 15 Marzo 2021].

- Archello, 2021. *Extension of the Parking Garage at the Leipzig Zoo*. [En línea]
Available at: <https://archello.com/project/extension-of-the-parking-garage-at-the-leipzig-zoo>
[Último acceso: 11 Marzo 2021].
- Architectuul, 2021. *Parking Garage Leipzig Zoo*. [En línea]
Available at: <http://architectuul.com/architecture/parking-garage-leipzig-zoo>
[Último acceso: 11 Marzo 2021].
- Archivo Digital Arquitectura Panamericana, 2020. *Bambú Social*. [En línea]
Available at: <http://www.arquitecturapanamericana.com/bambu-social/>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- Archivo Digital Arquitectura Panamericana, 2020. *Centro de Documentación de Bambú*. [En línea]
Available at: <http://www.arquitecturapanamericana.com/centro-de-documentacion-de-bambu/>
[Último acceso: 19 Marzo 2021].
- Ardle, J., 2009. *Bambúes y plantas herbáceas*. Primera ed. Barcelona(Barcelona): Blume.
- Aristizabal, W., 2016. *ARME Ideas en Guadua*. [En línea]
Available at: <https://armeideasenguadua.com/generalidades-de-la-guadua-angustifolia-kunth/>
[Último acceso: 28 Enero 2020].
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, s.f.. *Manual de construcción sismo resistente de viviendas en bahareque encementado*. Bogotá: FOREC.
- ASTM, 2013. *ASTM D5456: Standard Specification for Evaluation of Structural Composite Lumber Products*. West Conshohocken(Pennsylvania): ASTM International.
- Athiê, S. & Dias, M., 2016. Use of perches and seed dispersal by birds in an abandoned pasture in the Porto Ferreira state park, southeastern Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 76(1), pp. 80-92.
- Avellaneda, A., Montón, J. & Haurie, L., 2019. Comportamiento al fuego del bambú, *Guadua angustifolia*. En: *Congreso LIGNOMAD 19: libro de ponencias: congreso sobre Construcción con Madera y otros Materiales Lignocelulósicos*. Santiago de Compostela: Xunta de Galicia, pp. 211-215.
- Bahari, S. A. & Ahmad, M., 2009. Effects of culm height levels and node presence on mechanical properties and fracture modes of *Gigantochloa scortechinii* strips loaded in shear parallel to grain. *Bamboo Science and Culture: The Journal of the American Bamboo Society*, 22(1), pp. 41-44.
- Bai, Z., Dent, D., Olsson, L. & Schaepman, M. E., 2008. *Wiley Online Library*. [En línea]
Available at: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1475-2743.2008.00169.x>
[Último acceso: 7 Octubre 2020].
- Baladrón Laborda, J., 2018. *Arquitectura Sostenible*. [En línea]
Available at: <https://arquitectura-sostenible.es/bambu-el-acero-vegetal/>
[Último acceso: 28 Enero 2020].

Baladrón Laborda, J., s.f.. *Construcción con bambú. Productos derivados del bambú*. [En línea]
Available at: <https://tocamaderablog.com/productos-derivados-bambu/>
[Último acceso: 5 Noviembre 2021].

Bamboo Garden, 2019. *Phyllostachys atrovaginata*. [En línea]
Available at: <http://bamboogarden.com/Phyllostachys%20atrovaginata.htm>
[Último acceso: 12 Septiembre 2021].

Bamboo Seeds, s.f.. *Semillas de Bambú (Phyllostachys Pubescens)*. [En línea]
Available at: <https://www.bamboo-seeds.com/product-page/100-semillas-de-bamb%C3%BA-phyllostachys-pubescens>
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].

Bambú Gigante, s.f.a.. *Bambusa*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/bambusa/>
[Último acceso: 26 Agosto 2021].

Bambú Gigante, s.f.b.. *Bambusa oldhamii*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/bambusa/oldhamii/>
[Último acceso: 27 Agosto 2021].

Bambú Gigante, s.f.c.. *Dendrocalamus*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/dendrocalamus/>
[Último acceso: 31 Agosto 2021].

Bambú Gigante, s.f.d.. *Dendrocalamus asper*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/dendrocalamus/dendrocalamus-asper/>
[Último acceso: 10 Septiembre 2021].

Bambú Gigante, s.f.e. *Especies de la familia Phyllostachys*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/phyllostachys/>
[Último acceso: 11 Septiembre 2021].

Bambú Gigante, s.f.f. *Phyllostachys nigra*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/phyllostachys/phyllostachys-nigra-2/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Bambú Gigante, s.f.g. *Phyllostachys pubescens*. [En línea]
Available at: <https://www.bambugigante.com/phyllostachys/phyllostachys-edulis/>
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].

Bambú Parque, s.f.. *Bambusa vulgaris 'Vittata'*. [En línea]
Available at: <https://bambuparque.pt/es/bambu/bambusa-vulgaris-vittata/>
[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Bambusa.es, 2021. *Armado de solera con cañas de bambú*. [En línea]
Available at: <https://bambusa.es/armado-de-solera-con-canas-de-bambu/>
[Último acceso: 3 Enero 2022].

Bambusa.es, s.f.a. *BAMBÚ EN BIOCONSTRUCCIÓN*. [En línea]
Available at: <https://bambusa.es/caracteristicas-del-bambu/construccion-con-bambu/>
[Último acceso: 3 Febrero 2021].

- Bambusa.es, s.f.b. *BAMBÚ GUADUA*. [En línea]
Available at: <https://bambusa.es/caracteristicas-del-bambu/bambu-guadua/>
[Último acceso: 28 Enero 2020].
- Bambusa.es, s.f.c. *Phyllostachys pubescens*. [En línea]
Available at: <https://bambusa.es/caracteristicas-del-bambu/bambu-moso/>
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].
- Bambuerver, s.f.. *Oldhamii (Bambusa Oldhamii)*. [En línea]
Available at: <https://www.bambuerver.com/index.php/productos/planta-tipo/oldhamii-bambusa-oldhamii#top>
[Último acceso: 27 Agosto 2021].
- Banco Mundial, 2013. *Ecuador innova con casas de bambú para los más pobres*. [En línea]
Available at: <https://www.bancomundial.org/es/news/feature/2013/01/23/ecuador-innovates-with-bamboo-houses-for-the-poor>
[Último acceso: 8 Octubre 2020].
- Barnet, Y. & Jabrane, F., 2017. Diseño de proyectos con bambú en Lima como estrategia de difusión de un método constructivo alternativo y sostenible. *Campus*, 22(23), pp. 85-104.
- Barrallo, J., 2016. *Cómo hervir agua de manera segura*. [En línea]
Available at: https://www.revistaoxigeno.es/supervivencia/como-hervir-agua-de-manera-segura_52311_102.html
[Último acceso: 9 Febrero 2021].
- BBC Mundo, 2016. *Terremoto de magnitud 7,8 en la zona costera de Ecuador deja más de 600 muertos*. [En línea]
Available at:
https://www.bbc.com/mundo/noticias/2016/04/160416_ecuador_terremoto_magnitud_colombia_peru_bm
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- Beaver, R. A., Sittichaya, W. & Liu, L.-Y., 2011. A Review of the Powder-Post Beetles of Thailand (Coleoptera: Bostrichidae). *Tropical Natural History*, Octubre, 11(2), pp. 135-158.
- Behari, B., Agarwal, R., Singh, A. & Banerjee, S., 2000. Vegetation Development in a Degraded Area under Bamboo Based Agro-Forestry System. *The Indian Forester*, 126(7), pp. 710-720.
- Benavente, R. P., 2014. *Torres de bambú y plástico para sacar agua potable del aire*. [En línea]
Available at: https://www.elconfidencial.com/tecnologia/2014-04-03/torres-de-bambu-y-plastico-para-sacar-agua-potable-del-aire_111018/
[Último acceso: 14 Septiembre 2020].
- Ben-Zhi, Z. y otros, 2005. Ecological functions of bamboo forest: Research and Application. *Journal of Forestry Research*, Volumen 16, pp. 143-147.
- Bibiloni, J., 2015. *Dendrocalamus giganteus, el bambú más grande del mundo*. [En línea]
Available at: <http://jardin-mundani.blogspot.com/2015/01/dendrocalamus-giganteus-el-bambu-mas.html>
[Último acceso: 31 Agosto 2021].

Biblioteca Digital Mundial, 2016a. *Puente de bambú sobre el río de La Plata, con vista de la ciudad, provincia de Neiva*. [En línea]

Available at: <https://www.wdl.org/es/item/9142/>

[Último acceso: 5 Marzo 2021].

Biblioteca Digital Mundial, 2016b. *Puente sobre el río Ingará, provincia del Chocó*. [En línea]

Available at: <https://www.wdl.org/es/item/9057/>

[Último acceso: 5 Marzo 2021].

BIERZO 98 S.L., s.f.. *Bambú de T4*. [En línea]

Available at: <http://www.bierzo98.es/bambu-de-t4/>

[Último acceso: 14 Agosto 2021].

Billa, D., 2014. *Light of Shodoshima*. [En línea]

Available at: [https://www.setouchiexplorer.com/light-shodoshima/#:~:text=Light%20of%20Shodoshima%20\(%E5%B0%8F%E8%B1%86%E5%B3%B6%E3%81%AE,from%20the%20Setouchi%20Triennale%202013.&text=It's%20actually%20the%20second%20version,Nakayama%20valley%20on%20Shodoshima%2C%20Mr.](https://www.setouchiexplorer.com/light-shodoshima/#:~:text=Light%20of%20Shodoshima%20(%E5%B0%8F%E8%B1%86%E5%B3%B6%E3%81%AE,from%20the%20Setouchi%20Triennale%202013.&text=It's%20actually%20the%20second%20version,Nakayama%20valley%20on%20Shodoshima%2C%20Mr.)

[Último acceso: 7 Marzo 2021].

Billa, D., 2020. *Shōdoshima in Summer (Setouchi Triennale 2019 – Part Fourteen)*. [En línea]

Available at: <https://www.setouchiexplorer.com/shodoshima-in-summer-setouchi-triennale-2019-part-fourteen/>

[Último acceso: 7 Marzo 2021].

Bissanti, G., 2020. *Bambusa vulgaris*. [En línea]

Available at: <https://antropocene.it/es/2020/06/12/bambusa-vulgaris/>

[Último acceso: 20 Noviembre 2021].

Blayse, A. & Manley, K., 2004. Key influences on construction innovation. *Construction Innovation*, 4(3), pp. 143-154.

BosqueDeBambú, 2018. *Plantación de bambú en España*. [En línea]

Available at: <https://www.agroterra.com/foro/foros/agricultura-temas-generales-f2/plantacion-de-bambu-en-espana-t33646.html>

[Último acceso: 5 Abril 2021].

Botero Cortés, L. F., 2001. *Reproducción de la Guadua angustifolia por el método de chusquines*. Primera ed. Guayaquil: INBAR.

Boto de Matos Caeiro, J. G., 2010. *Construção em bambu*. Primera ed. Lisboa: Faculdade de Arquitectura de la Universidade Técnica de Lisboa.

Brink, M., 2008. *Dendrocalamus asper (Schult. & Schult.f.) Backer ex K.Heyne*. [En línea]

Available at:

[https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Dendrocalamus+asper+\(Schult.+&+Schult.f.\)+Backer+ex+K.Heyne](https://www.prota4u.org/database/protav8.asp?g=pe&p=Dendrocalamus+asper+(Schult.+&+Schult.f.)+Backer+ex+K.Heyne)

[Último acceso: 10 Septiembre 2021].

Broto, E., 2014. *Bambú: Arquitectura y diseño*. Primera ed. Barcelona(Barcelona): Links.

- Brunner, A., 2018. Identification of damage mechanisms in fiber-reinforced polymer-matrix composites with Acoustic Emission and the challenge of assessing structural integrity and service-life. *Construction and Building Materials*, Volumen 173, p. 629–637.
- Bullaro, L., 2018. *El bambú colombiano según Simón Vélez y Marcelo Villegas: montajes, conexiones y soportes estructurales*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/896067/el-bambu-colombiano-segun-simon-velez-y-marcelo-villegas-montajes-conexiones-y-soportes-estructurales>
[Último acceso: 9 Marzo 2021].
- Bureau of Indian Standards, 2016. *National Building Code of India 2016*. New Delhi: Bureau of Indian Standards.
- Caballar, R. D., 2020. *Las casas modulares de bambú que podrían poner freno a la crisis filipina de vivienda*. [En línea]
Available at: <https://redshift.autodesk.es/casas-modulares-bambu/>
[Último acceso: 8 Octubre 2020].
- Cabi, E. & Doğan, M., 2012. Poaceae. En: A. Güner, y otros edits. *Türkiye Bitkileri Listesi*. Estambul: Nezahat Gökyiğit Botanik Bahçesi ve Flora Araştırmaları Derneği Yayını, p. 690–756.
- Cairo Cairo, P. y otros, 2018. La biomasa de *Bambusa vulgaris* como alternativa para la recuperación de suelos degradados. *Centro Agrícola*, Julio-Septiembre, 45(3), pp. 51-58.
- Cancela, D., 2015. *¿Por qué Hong Kong sigue utilizando andamios de bambú?*. [En línea]
Available at: <https://www.abc.es/internacional/20150925/abci-hong-kong-andamios-bambu-201509241856.html?ref=https:%2F%2Fwww.google.com%2F>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- Cardona Tobón, P. A., 2011. *Puente de guadua en lugar de servir, preocupa*. [En línea]
Available at:
https://www.elcolombiano.com/historico/puente_de_gadua_en_lugar_de_servir_preocupa-KYec_157386
[Último acceso: 5 Marzo 2021].
- Carmioli Umaña, V., 2009. Bambú Guadua: un recurso ecológico. *Tecnología en Marcha*, Julio-Septiembre, 22(3), pp. 3-9.
- Castrillón Valdés, B. M. & Malaver Zapata, D. M., 2004. *Procedimientos de ensayo para la determinación de las propiedades físico mecánicas de la Guadua*. Primera ed. Bogotá: Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.
- Ceccon, E., 2013. *Restauración en Bosques Tropicales: Fundamentos Ecológicos, Prácticos y Sociales*. Primera ed. México, D.F.: Ediciones Díaz de Santos.
- Cely Moreno, L. A., Hernández Rojas, W. G. & Gutiérrez Junco, O. J., 2012. Caracterización de la *Guadua Angustifolia* Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-10. *Revista Facultad de Ingeniería, UPTC*, 21(33), pp. 53-71.
- Chang, H.-M. & But, P. P.-H., 1986. *Pharmacology And Applications Of Chinese Materia Medica (Vol. I)*. Singapore: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd..
- Chaowana, K., Wisadsatorn, S. & Chaowana, P., 2021. Bamboo as a Sustainable Building Material—Culm Characteristics and Properties. *Sustainability*, 13(13), p. 7376 (Versión online).

- Chaowana, P. & Barbu, M., 2017. Bamboo: Potential material for biocomposites. En: M. Jawaid, M. T. Paridah & N. Saba, edits. *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials. Processing, Properties and Applications*. Sawston: Woodhead Publishing, pp. 259-289.
- Chee, S. S. y otros, 2019. Thermomechanical and dynamic mechanical properties of bamboo/woven kenaf mat reinforced epoxy hybrid composites. *Composites Part B: Engineering*, Volumen 163, pp. 165-174.
- Chen, G. & Luo, H., 2020. Effects on node with discontinuous hierarchical fibers on the tensile fracture behaviors of natural bamboo. *Sustainable Materials and Technologies*, Volumen 26, p. e00228 (Versión online).
- Chen, G. y otros, 2018a. Flexural deformation and fracture behaviours of bamboo with gradient hierarchical fibrous structure and water content. *Composites Science and Technology*, Volumen 157, pp. 126-133.
- Chen, G. y otros, 2018b. Water effects on the deformation and fracture behaviors of the multi-scaled cellular fibrous bamboo. *Acta Biomaterialia*, Volumen 65, pp. 203-215.
- Chen, M. y otros, 2020. Flexural strength and ductility of moso bamboo. *Construction and Building Materials*, Volumen 246, p. 118418 (Versión online).
- Christanty, L., Mailly, D. & Kimmins, J., 1996. "Without bamboo, the land dies": Biomass, litterfall, and soil organic matter dynamics of a Javanese bamboo talun-kebun system. *Forest Ecology and Management*, 87(1-3), pp. 75-88.
- Cibergarden, s.f.. *BAMBÚ MOSO (PHYLLOSTACHYS EDULIS)*. [En línea]
Available at: <http://www.cibergarden.com/shop/es/plantas-y-flores/178-bambu-moso-phyllostachys-edulis-20-semillas.html>
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].
- Ciro, H., Osorio, J. & Vélez, J., 2005. Determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Revista de la Facultad Nacional de Agronomía de Medellín*, 58(1), pp. 2709-2715.
- Clarín, 2017. *Estudian las cualidades del bambú para la purificación del agua*. [En línea]
Available at: https://www.clarin.com/rural/bambu-dar_0_rJxZRTXUb.html
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].
- Clayton, W. & Renvoize, S., 1999. *Genera Graminum : Grasses of the World*. Primera ed. Londres: Royal Botanic Gardens, Kew.
- Clayton, W., Vorontsova, M., Harman, K. & Williamson, H., s.f.. *GrassBase - The Online World Grass Flora*. [En línea]
Available at: <http://www.kew.org/data/grasses-db.html>
[Último acceso: 16 Noviembre 2021].
- Comunicae, 2020. *Fundación COPADE defiende el comercio justo como alternativa económica tras la crisis del Covid-19*. [En línea]
Available at: <https://www.comunicae.es/nota/fundacion-copade-defiende-el-comercio-justo-1218259/>
[Último acceso: 8 Octubre 2020].

- CONBAM, 2005. *Construcciones de Jörg Stamm*. [En línea]
Available at: <https://www.conbam.info/pagesES/bauwerke.html>
[Último acceso: 5 Marzo 2021].
- Conciencia Eco, 2011. *Simón Vélez: Arquitectura Sostenible con Bambú*. [En línea]
Available at: <https://www.concienciaeco.com/2011/12/06/simon-velez-arquitectura-sostenible-con-bambu/>
[Último acceso: 14 Marzo 2021].
- CONSTRUTEC, s.f.. *Glosario de términos*. [En línea]
Available at:
<https://www.construtec.com/glosario/ovalidad/#:~:text=Defecto%20de%20redondez%20de%20la,menor%20y%20el%20di%C3%A1metro%20nominal.>
[Último acceso: 27 Enero 2022].
- Consulta Plantas, s.f.. *Cuidados de la planta Phyllostachys aurea o Bambú amarillo*. [En línea]
Available at: <http://www.consultaplantas.com/index.php/es/plantas-por-nombre/plantas-de-la-m-a-la-r/846-cuidados-de-la-planta-phyllostachys-aurea-o-bambu-amarillo>
[Último acceso: 11 Septiembre 2021].
- Coombes, A. J., 2012. *The A to Z of plant names*. Primera ed. Portland(Oregón): Timber Press.
- CORDIS, 2013. *Sistema innovador de tratamiento de aguas residuales basado en el bambú*. [En línea]
Available at: <https://cordis.europa.eu/article/id/36167-innovative-system-uses-bamboo-to-treat-wastewater/es>
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].
- Correal, J. & Arbeláez, J., 2010. Influence of age and height position on colombian Guadua angustifolia bamboo mechanical properties. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 12(2), pp. 105-113.
- Cuba, A. F., 2020. *Bambú de savia gallega para Europa*. [En línea]
Available at: https://www.lavozdegalicia.es/noticia/somosagro/2020/02/09/bambu-savia-gallega-europabambu-invasivo-bambu-invasivo-precio/0003_202002F9C12993.htm
[Último acceso: 6 Enero 2021].
- Cultivos Casaita, s.f.. *PHYLLOSTACHYS PUBESCENS "BICOLOR"*. [En línea]
Available at: <http://casaita.com/los-bambues/phyllostachys/phyllostachys-pubescens-bicolor/>
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].
- Darke, R., 1999. *The Color Encyclopedia of Ornamental Grasses*. Primera ed. Portland(Oregón): Timber Press.
- Das, S., Rijvan, M. & S.P., B., 2012. Therapeutic Potentials of Bambusa bambos Druce. *International Journal of Research in Pharmaceutical and Biomedical Sciences*, 3(2), pp. 940-942.
- Davis, A., 2013. *Blooming Bamboo Home by H&P Architects*. [En línea]
Available at: <https://www.dezeen.com/2013/09/25/blooming-bamboo-house-by-h-and-p-architects/>
[Último acceso: 17 Marzo 2021].

DeBambú, 2020. *Propiedades del bambú y consejos de mantenimiento*. [En línea]
Available at: <https://debambu.info/propiedades-del-bambu-y-consejos-de-mantenimiento>
[Último acceso: 1 Enero 2021].

Detail Inspiration, 2010. *Pabellón de bambú para la Expo Shanghai*. [En línea]
Available at: <https://inspiration.detail.de/bamboo-pavilion-for-the-expo-shanghai-103526.html>
[Último acceso: 10 Marzo 2021].

Diario ecología, 2011. *Bambú contra cambio climático*. [En línea]
Available at: <http://diarioecologia.com/bambu-contra-cambio-climatico/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2020].

Diario Siglo XXI, 2020. *El cultivo de bambú, un ejemplo de comercio justo como alternativa económica tras la crisis del Covid-19*. [En línea]
Available at: <http://www.diariosigloxxi.com/texto-ep/mostrar/20201004112736/cultivo-bambu-ejemplo-comercio-justo-como-alternativa-economica-tesis-covid-19>
[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Dijardín, s.f.. *Pseudosasa japónica (Bambú)*. [En línea]
Available at: <https://www.dijardinonline.com/bambu/3833-8-PSEUDOSASA-JAPONICA-5L-BAMBU.html>
[Último acceso: 27 Agosto 2021].

Domenico, 2010. *Inaugurado el Pabellón de Madrid en la Expo 2010 Shanghai*. [En línea]
Available at: <https://ecosistemaurbano.org/castellano/inaugurado-el-pabellon-de-madrid-en-la-expo-2010-shanghai/>
[Último acceso: 10 Marzo 2021].

Domínguez García-Tejero, F., 1998. *Plagas y enfermedades de las plantas cultivadas*. Novena ed. Madrid(Madrid): Mundi-Prensa.

Eberts, F., 2006. *Bambús: las especies y variedades más hermosas. Elección, diseño, cuidados*. Primera ed. Barcelona(Barcelona): Omega.

EcoHabitar, s.f.. *Bambú, alternativa sostenible para construcciones del sector agropecuario cubano*. [En línea]
Available at: <https://ecohabitar.org/bambu-alternativa-sostenible-para-construcciones-del-sector-agropecuario-cubano/>
[Último acceso: 21 Noviembre 2021].

EcoHabitar, s.f.b. *Torre de refrigeración adiabática, sistema de refrigeración urbano alternativo sin electricidad*. [En línea]
Available at: <https://ecohabitar.org/109119-2/>
[Último acceso: 27 Enero 2022].

EcoInventos, 2015. *La ciudad de bambú que podrá albergar hasta 20.000 personas*. [En línea]
Available at: <https://ecoinventos.com/ciudad-de-bambu/>
[Último acceso: 27 Enero 2022].

EcoInventos, 2020. *Warka Water. La torre de bambú que produce hasta 100 litros de agua al día*. [En línea]

Available at: <https://ecoinventos.com/warkawater/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2020].

EcolInventos, 2021. *Torre de refrigeración adiabática, luchando contra el calor con un sistema de refrigeración urbano alternativo sin electricidad*. [En línea]
Available at: <https://ecoinventos.com/torre-de-refrigeracion-urbana-adiabatica/>
[Último acceso: 27 Enero 2022].

EcuRed, s.f.. *Phyllostachys nigra*. [En línea]
Available at: https://www.ecured.cu/Phyllostachys_nigra
[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Edgar, E. & Connor, H., 2000. *Flora of New Zealand - Vol. V: Gramineae*. Primera ed. New Zealand: Manaaki Whenua Press Lincoln New Zealand.

Efe, 2009. *Viviendas de bambú para almacenar CO2*. [En línea]
[Último acceso: 18 Septiembre 2020].

EFSA, 2012. Compendium of botanicals reported to contain naturally occurring substances of possible concern for human health when used in food and food supplements. *European Food Safety Authority Journal*, 10(5), p. 2663.

Eje21, 2019. *Bambusa vulgaris podría ser más resistente que la guadua*. [En línea]
Available at: <https://www.eje21.com.co/2019/09/bambusa-vulgaris-podria-ser-mas-resistente-que-la-gadua/>
[Último acceso: 21 Noviembre 2021].

El Guisante Verde Project, 2019. *La Bamboueraie en Cévennes, el mayor bosque de bambú de Europa*. [En línea]
Available at: <https://www.guisanteverdeproject.com/2019/05/bamboueraie-en-cevennes-asia-en-francia.html>
[Último acceso: 6 Enero 2021].

El Horticultor, 2019. *Logran limpiar aguas contaminadas con arsénico usando bambú*. [En línea]
Available at: <https://elhorticultor.org/lograron-limpiar-aguas-contaminadas-con-arsenico-usando-bambu/>
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].

El Orden Mundial, 2020. *¿Qué es la Agenda 2030?*. [En línea]
Available at: <https://elordenmundial.com/que-es-la-agenda-2030/>
[Último acceso: 11 Septiembre 2020].

El País, 2019. *20 años del terremoto que tumbó al 75% de Armenia*. [En línea]
Available at: <https://www.elpais.com.co/colombia/20-anos-del-terremoto-que-tumbo-al-75-de-armenia.html>
[Último acceso: 27 Enero 2022].

El Tiempo, 1995. *PUENTE ORTIZ, 150 AÑOS DE HISTORIA*. [En línea]
Available at: <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-370214>
[Último acceso: 5 Marzo 2021].

Ellingwood, B., 1994. Probability-based codified design: past accomplishments and future challenges. *Structural Safety*, 13(3), p. 159–176.

Escalona, J. C., Hernández, J. G. & Requena, C. M., 2017. *Método de empleo del bambú como material alternativo para la construcción de viviendas de interés social en el municipio Campo Elías sector Santa Eduvigés*. [En línea]

Available at:

https://issuu.com/cristalmichellerequenaRodriguez/docs/tesis_del_bambu....docx/41

[Último acceso: 3 Febrero 2021].

Espejo Serna, A., López-Ferrari, A. & Valdés-Reyna, J., 2000. Poaceae. *Monocot. Mexic. Sinopsis Floríst.* Volumen 10, pp. 7-236 [and index].

Epiloy, Z., 1986. Physico-mechanical properties and anatomical structure relationships of some Philippine bamboos. En: *International Bamboo Workshop*. Hangzhou: International Development Research Center, pp. 257-264.

Estrada Mejía, M., 2010. *Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (Guadua angustifolia) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos*. Bogotá: Universidad de los Andes.

Ethnoplants, s.f.. *Phyllostachys pubescens BAMBÚ MOSO*. [En línea]

Available at: <https://www.ethnoplants.com/es/semillas-plantas-insolitas/181-phyllostachys-pubescens-bambu-moso-semillas.html>

[Último acceso: 13 Septiembre 2021].

Europa Press, 2020. *El comercio justo, alternativa económica tras la crisis del Covid-19*. [En línea]

Available at: <https://www.europapress.es/epsocial/responsables/noticia-comercio-justo-alternativa-economica-tesis-covid-19-20201004112738.html>

[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Exotic Plants, s.f.. *Dendrocalamus asper*. [En línea]

Available at: <https://www.exotic-plants.de/semillas/Bambu/Dendrocalamus-asper.php>

[Último acceso: 10 Septiembre 2021].

Falck, N. B., 2001. *El bambú usado como material de construcción*. Tegucigalpa, AIDIS.

Falcy, M. R. & Estades, C. F., 2007. Effectiveness of Corridors Relative to Enlargement of Habitat Patches. *Conservation Biology*, 21(5), pp. 1341-1346.

FAO & INBAR, 2018. Bamboo for land restoration. En: *INBAR Policy Synthesis Report 4*. Beijing: INBAR.

FAO, 2010. *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2010: Informe principal*, Roma: FAO.

Faraday, E., 2019. *Las bicicletas de bambú que cambiaron una comunidad*. [En línea]

Available at: <https://www.inspimundo.com/2019/09/ghana-bambu-bicicletas/>

[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Farmacia Serra Mandri, s.f.. *Bamboo (Extracto de Bambú) 300mg 60 cápsulas - Solaray*. [En línea]

Available at: <https://www.farmaciaserra.com/bamboo-300mg-60caps-solaray.html>
[Último acceso: 21 Noviembre 2021].

Finch, P., 2005. Coded for design. *Architectural Review*, Volumen July, p. 28.

Flora of China Editorial Committee, 2006. Poaceae. En: C. Wu, P. Raven & D. Hong, edits. *Flora of China*. Beijing & St. Louis: Science Press & Missouri Botanical Garden Press, pp. 1-733.

Francis, J. K., 1993. *Bambusa vulgaris Schrad ex Wendl. Common bamboo. Gramineae. Grass family. Bambusoideae. Bamboo subfamily..* Primera ed. San Juan(Washington): USDA Forest Service, International Institute of Tropical Forestry.

Franco, J. T., 2012. *Ala de Bambú / Vo Trong Nghia*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-147908/ala-de-bambu-vo-trong-nghia>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

Franco, J. T., 2013. *Puente Peatonal de Bambú es construido por la comunidad de Davao en Filipinas*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-224355/puente-peatonal-de-bambu-es-construido-por-la-comunidad-de-davao-filipinas>
[Último acceso: 5 Marzo 2021].

Franco, J. T., 2014. *Proyecto WARKA: Torres de bambú que recogen agua potable del aire*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-351457/proyecto-warka-torres-de-bambu-que-recogen-agua-potable-desde-el-aire>
[Último acceso: 14 Septiembre 2020].

Franquis, F. & Infante Cruz, Á., 2003. Perspectivas del Bambú en América Latina y en Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, 13 Octubre, 18 (1)(33), pp. 1-10.

Frearson, A., 2013. *Dailai Conference Hall by Vo Trong Nghia Architects*. [En línea]
Available at: <https://www.dezeen.com/2013/01/20/dailai-conference-centre-vo-trong-nghia/>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

Frearson, A., 2015. *Vo Trong Nghia crea cúpulas de bambú y paja para el Centro Comunitario de Diamond Island*. [En línea]
Available at: <https://www.dezeen.com/2015/12/03/vo-trong-nghia-diamond-island-community-centre-bamboo-thatch-domes-ho-chi-minh-city-vietnam/>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

Fu, M., Jianghua, X. & Yiping, L., 2000. *Cultivation and utilization on bamboo*. Primera ed. Beijing: China Forestry Publishing House.

Galiana, M., 2016. *Construyendo con Bambú. Ibuku. Elora Hardy*. [En línea]
Available at: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/construyendo-con-bambu-ibuku-elora-hardy>
[Último acceso: 14 Marzo 2021].

García-Ramírez, Y. y otros, 2007. Establecimiento in vitro de yemas axilares de *Bambusa vulgaris* var *Vittata*. *Bioteología Vegetal*, Julio-Septiembre, 7(3), pp. 155-159.

García, S. M., 2015. *BAMBÚ COMO MATERIAL ESTRUCTURAL: GENERALIDADES, APLICACIONES Y MODELIZACIÓN DE UNA ESTRUCTURA TIPO*. [En línea]

Available at: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/55983/MARTINEZ%20-%20Bamb%C3%BA%20como%20material%20estructural%3A%20Generalidades%2C%20aplicaciones%20y%20modelizaci%C3%B3n%20de%20una%20est....pdf?sequence=1>

[Último acceso: 1 Febrero 2021].

Gardenia, s.f.. *Bambusa vulgaris 'Vittata? (bambú pintado)*. [En línea]

Available at: <https://www.gardenia.net/plant/bambusa-vulgaris-vittata>

[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Gatío, A. y otros, 2014. Sustainable structures: bamboo standards and building codes.

Engineering Sustainability, 167(ES5), pp. 189-196.

Gauss, C., Savastano, H. & Harries, K. A., 2019. Use of ISO 22157 mechanical test methods and the characterisation of Brazilian *P. edulis* bamboo. *Construction and Building Materials*, 228(2), p. 116728 (Versión online).

Gnanaharan, R., Janssen, J. J. & Arce, O., 1994. *Bending strength of Guadua bamboo.*

Comparison of different testing procedures. New Dehli: INBAR Working Paper No. 3.

González Yebra, Ó., 2014. *Caracterización del bambú Guadua (Guadua Angustifolia) para el Diseño e Industrialización en España*. Primera ed. Almería(Almería): Editorial Universidad de Almería.

González, H., Montoya, J. & Bedoya, J., 2006. Esfuerzo de tensión y la influencia de la humedad relativa del ambiente y la altura a lo largo del tramo en la especie de bambú *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, 12(32), pp. 445-450.

Goyal, A. K., Middha, S. K. & Sen, A., 2013. *Bambusa vulgaris* Schrad. ex J. C. Wendl. var. *vittata* Riviere & C. Riviere leaves attenuate oxidative stress - An in vitro biochemical assay. *Indian Journal of Natural Products and Resources*, 4(4), pp. 436-440.

Gozzer, E., 2012. *El negocio del bambú llega a Valencia*. [En línea]

Available at: <https://www.levante-emv.com/economia/2012/08/27/negocio-bambu-llega-valencia-12959073.html>

[Último acceso: 6 Enero 2021].

Greco, T. M. & Cromberg, M., 2011. *Bambu Cultivo e Manejo*. Primera ed. Florianópolis:

Insular.

Grosse, C. & Ohtsu, M., 2008. *Acoustic Emission Testing*. Heidelberg: Springer.

Guadua y Bambú Colombia, s.f.. *Sugerencias para la preservación de la Guadua*. [En línea]

Available at: <https://guadaybambu.es.tl/Estudio-8.htm>

[Último acceso: 17 Noviembre 2021].

Habibi, M. y otros, 2015. Asymmetric flexural behavior from bamboo's functionally graded hierarchical structure: underlying mechanisms. *Acta Biomaterialia*, Volumen 16, pp. 178-186.

Hamdan, H., Anwar, U., Zaidon, A. & Tamizi, M., 2009. Mechanical properties and failure behaviour of *Gigantochloa Scortechini*. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 21, p. 336-344.

- Harbin Institute of Technology, 2007. *JG/T 199-2007 Testing method for physical and mechanical properties of bamboo used in building*. Beijing: Ministry of Construction Engineering standard technical focal China Architectural Scientific Academy.
- Harries, K., Sharma, B. & Richard, M., 2012. Structural use of full culm bamboo: the path to standardization. *International Journal of Architecture, Engineering and Construction*, 1(2), pp. 66-75.
- Hegnauer, R., 1997. Cyanogenic compounds as systematic markers in Tracheophyta. En: K. Kubitzki, ed. *Flowering Plants. Plant Systematics and Evolution*. Vienna: Springer, pp. 191-210.
- Henríquez Defelipe, D. & Morón Sierra, F. E., 2017. *Diseño de un puente en bambú Guadua angustifolia Kunth ubicado en la finca El Centenario para la Universidad Santo Tomás*. Primera ed. Bogotá: Universidad Santo Tomás.
- Heyne, K., 2010. *De Nuttige Planten van Nederlandsch-Indië*. Primera ed. Charleston(Carolina del Sur): BiblioBazaar.
- Hidalgo López, Ó., 1974. *Bambú. Su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía*. Primera ed. Bogotá: Italgraf S.A..
- Hidalgo López, Ó., 1978. *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Primera ed. Bogotá: Estudios Técnicos Colombianos, Ltda..
- Hidalgo López, Ó., 2003. *Bamboo. The gift of the gods*. Primera ed. Bogotá: Hipertexto, S.A.S..
- Hill, J., 2014. *HÖHENRAUSCH.3*. [En línea]
Available at: <https://archidose.blogspot.com/2014/01/hohenrausch3.html>
[Último acceso: 7 Marzo 2021].
- Hitchcock, A. S., 2003. *Manual of the grasses of the United States*. Segunda ed. Washington, D.C.: Dover Publications Inc..
- Hogar de Cristo, 2020. *HISTORIA. Nuestros primeros pasos en producción social del hábitat*. [En línea]
Available at: <https://hogardecristo.org.ec/historia/>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- Hong, C. y otros, 2021. Experimental and numerical study on eccentric compression properties of laminated bamboo columns with a chamfered section. *Journal of Building Engineering*, Volumen 43, p. 102901 (Versión online).
- Hu, C., Zhang, Y. & Kitts, D., 2000. Evaluation of antioxidant and prooxidant activities of bamboo *Phyllostachys nigra* var. Henonis leaf extract in vitro. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 48(8), pp. 3170-3176.
- Huellas de Arquitectura, 2015. *Las propiedades mecánicas del bambú*. [En línea]
Available at: <https://huellasdearquitectura.wordpress.com/2015/10/14/las-propiedades-mecanicas-del-bambu/>
[Último acceso: 4 Febrero 2021].
- Hung, K., Chen, Y. & Wu, J., 2012. Natural weathering properties of acetylated bamboo plastic composites. *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 97, pp. 1680-1685.

IBUKU, s.f. *Aldo's Kitchen*. [En línea]

Available at: <https://ibuku.com/aldos-kitchen/>

[Último acceso: 15 Marzo 2021].

ICONTEC, 2006a. *NTC 5405 Propagación vegetativa de Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2006b. *NTC 5407 Uniones de estructuras con Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2006c. *NTC 5458 Elaboración de artesanías y muebles con culmos maduros de Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2007a. *NTC 5301 Preservación y secado del culmo de Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2007b. *NTC 5525 Métodos de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2008. *NTC 5300 Cosecha y postcosecha del culmo de Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2009a. *NTC 5726 Inventario de rodales de Guadua angustifolia Kunth para aprovechamientos con fines comerciales*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2009b. *NTC 5727 Terminología aplicada a la Guadua y sus productos*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

ICONTEC, 2010. *NTC 5829 Obtención de latas y tablillas de Guadua angustifolia Kunth*. Primera ed. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

Iglesias, A., 2019. *BAMBU NEGRO (Phyllostachys nigra)*. [En línea]

Available at: <http://saludconplantas.com/bambu-negro-phyllostachys-nigra/>

[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Impenor Asbitra Asociados S.L., s.f.. *T4 BARAJAS*. [En línea]

Available at: <https://www.impenorasbitra.com/proyectos/t4-barajas-cubiertas>

[Último acceso: 14 Agosto 2021].

INBAR, 2010. *INBAR Y SUS SOCIOS SORPRENDEN A LA EXPO DE SHANGHAI CON BAMBÚ*. [En línea]

Available at: <https://www.inbar.int/inbar-and-partners-wow-shanghai-expo-with-bamboo/>

[Último acceso: 10 Marzo 2021].

INBAR, 2011. *Guadua angustifolia Kunth como material constructivo y sus procedimientos generales en la construcción para ser aplicados en edificaciones GaK*. Quito: INBAR.

INBAR, 2014. *El bambú: un recurso estratégico para que los países reduzcan los efectos del cambio climático*. Primera ed. Beijing: INBAR.

INBAR, 2015. *Norma Andina para Diseño y Construcción de Casas de Uno y Dos Pisos en Bahareque Encementado*. Primera ed. Quito: INBAR.

- INBAR, 2016. *Resumen comercial 2016: Los productos de bambú y ratán en el mercado internacional*, Beijing: INBAR.
- INBAR, 2018. *Value Chain Analysis and Market Assessment of Bamboo Products in Ethiopia*. Beijing: INBAR.
- INBAR, 2019a. *¿Por qué bambú y ratán?*. [En línea]
Available at: <https://www.inbar.int/es/why-bamboo-rattan/>
[Último acceso: 21 Diciembre 2020].
- INBAR, 2019b. *Resumen Anual 2018*. Primera ed. Beijing: INBAR.
- INBAR, 2020a. *EL BAMBÚ PARA COMBATIR EL CAMBIO CLIMÁTICO: 5 MANERAS DE CÓMO USARLO*. [En línea]
Available at: <https://www.inbar.int/es/el-bambu-para-combatir-el-cambio-climatico-5-maneras-de-como-usarlo/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2020].
- INBAR, 2020b. *Resumen Anual 2019*. Primera ed. Beijing: INBAR.
- INBAR, 2021a. *Bamboo policy: a roadmap for bamboo development*. [En línea]
Available at: <https://www.inbar.int/event/bamboo-policy/>
[Último acceso: 28 Diciembre 2021].
- INBAR, 2021b. *European Bamboo Business: 'A New Deal'*. [En línea]
Available at: <https://www.inbar.int/event/webinar-european-bamboo-business/>
[Último acceso: 26 Diciembre 2021].
- INBAR, 2021c. *Resumen Anual 2020*. Primera ed. Beijing: INBAR.
- Inhabitat, 2006. *Great (Bamboo) Wall*. [En línea]
Available at: <https://inhabitat.com/great-bamboo-wall/>
[Último acceso: 15 Marzo 2021].
- Instituto de la Construcción y Gerencia, 2012. *Reglamento Nacional de Edificaciones - Sección III.2 Estructuras - Norma Técnica E.100 Bambú*. Lima: ICG.
- Instituto Ecuatoriano de Normalización, 1976. *GPE INEN 42 (1976): Bambú caña guadua*. Quito: INEN.
- Instituto Geofísico - EPN, 2016. *Informe sísmico especial N°8 - 2016*. [En línea]
Available at: <https://www.igeppn.edu.ec/servicios/noticias/1312-informe-sismico-especial-n-8-2016>
[Último acceso: 26 Enero 2022].
- Interioresymás, 2016. *Wang Wen-Chih, el arte de la Naturaleza*. [En línea]
Available at: <https://interioresymas.wordpress.com/2016/09/27/wang-wen-chih-el-arte-de-la-naturaleza/>
[Último acceso: 7 Marzo 2021].
- Isan, A., 2017a. *Ecología verde*. [En línea]
Available at: <https://www.ecologiaverde.com/el-bambu-los-mil-usos-de-un-recurso-sostenible-527.html>
[Último acceso: 28 Enero 2020].

- Isan, A., 2017b. *El bambú: Los mil usos de un recurso sostenible*. [En línea]
Available at: https://www.ecologiaverde.com/el-bambu-los-mil-usos-de-un-recurso-sostenible-527.html#anchor_1
[Último acceso: 23 Febrero 2021].
- ISO, 2018. *ISO 19624:2018 Estructuras de bambú – Clasificación de las cañas de bambú – Principios y procedimientos básicos*. Vernier(Geneva): International Organization for Standardization.
- ISO, 2019. *ISO 22157:2019 Bamboo structures – Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms – Test methods*. Vernier(Geneva): International Organization for Standardization.
- ISO, 2021. *ISO 22156:2021 Bamboo structures – Bamboo culms – Structural design*. Vernier(Geneva): International Organization for Standardization.
- Jankac, M., 2021. *Crean una torre de bambú ‘cero electricidad’ para enfriar las ciudades*. [En línea]
Available at: <https://portal-ambiental.com/arg/crean-una-torre-de-bambu-cero-electricidad-para-enfriar-las-ciudades/>
[Último acceso: 27 Enero 2022].
- Janssen, J., 2000. *Designing and Building with Bamboo: INBAR Technical Report 20*. Primera ed. Beijing: International Network for Bamboo and Rattan.
- Japan-guide.com, 2019. *Setouchi Triennale*. [En línea]
Available at: <https://www.japan-guide.com/e/e5410.html>
[Último acceso: 7 Marzo 2021].
- Jaramillo Benavides, A. S., 2019. *Manifestações patológicas e decisões projetuais que incidem na durabilidade do bambu em edificações no sul do Brasil*. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.
- Jaramillo Koupermann, J. J., 2018. *Técnicas y procesos para el curvado de Caña Guadua, aplicado a mobiliario y accesorios del hogar*. Primera ed. Cuenca: Universidad del Azuay.
- Jefatura del Estado, 2007. *Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad*. Primera ed. Madrid: Agencia Estatal Boletín Oficial del Estado.
- Jena, M., 2018. *El bambú, nuevo héroe contra la degradación del suelo*. [En línea]
Available at: <http://www.ipsnoticias.net/2018/06/nuevo-heroe-la-degradacion-del-suelo/>
[Último acceso: 12 Septiembre 2020].
- Jiang, Z., 2007. *Bamboo and Rattan in the World*. Beijing: China Forestry Publishing House.
- Jiménez, J. A., s.f.. *Detalle de la T4. Aeropuerto de Barajas*. [En línea]
Available at: <http://www.fotomadrid.com/ver/1229>
[Último acceso: 14 Agosto 2021].
- Johnson, T., 1999. *CRC Ethnobotany Desk Reference*. Primera ed. Boca Ratón: CRC Press LLC.
- Jordana, S., 2010. *The “German-Chinese House” at the Shanghai World Expo 2010*. [En línea]
Available at: <https://www.archdaily.com/58871/the-%25e2%2580%259cgerman-chinese->

house%25e2%2580%259d-at-the-shanghai-world-expo-2010

[Último acceso: 10 Marzo 2021].

Judziewicz, E. J., Clark, L. G., Londoño, X. & Stern, M. J., 1999. *American bamboos*. Primera ed. Washington D.C.: Smithsonian Books.

Judziewicz, E. J. y otros, 2000. Catalogue of New World Grasses (Poaceae): I. Subfamilies Anomochlooideae, Bambusoideae, Ehrhartoideae, and Pharoideae. *United States National Herbarium*, Volumen 39, pp. 1-128.

Kallakas, H. y otros, 2015. The influence of accelerated weathering on the mechanical and physical properties of wood-plastic composites. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*, Volumen 64, pp. 94-104.

Kamruzzaman, M., Saha, S., Bose, A. & Islam, M., 2008. Effects of age and height on physical and mechanical properties of bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 20, pp. 211-217.

Kappel, R., Mattheck, K. & Tesari, I., 2004. Bamboo as a composite structure and its mechanical failure behaviour. *Design Nature II*, Volumen 6, p. 285–293.

KENGO KUMA Atmospheric Works 2000-2014, 2014. Villa Gran Muralla, 2000-2002, Pekín (China). *AV Monografías*, Volumen 167-168, pp. 138-143.

Keogh, L., O’Hanlon, P., O’Reilly, P. & Taylor, D., 2015. Fatigue in bamboo. *International Journal of Fatigue*, Volumen 75, pp. 51-56.

Kistler Group, s.f.. *Efecto piezoeléctrico*. [En línea]

Available at: <https://www.kistler.com/es/glosario/termino/efecto-piezoelctrico/>

[Último acceso: 1 Diciembre 2021].

Kumar, A. y otros, 2016. Engineered bamboo scrimber: influence of density on the mechanical and water absorption properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 127, p. 815–827.

Kurtz, L., 2013. *Cómo controlar la propagación del bambú*. [En línea]

Available at: <https://es.wikihow.com/controlar-la-propagaci%C3%B3n-del-bamb%C3%BA>

[Último acceso: 3 Febrero 2021].

Laestadius, L. y otros, 2011. Mapping opportunities for forest landscape restoration. *Unasylva*, 62(2), pp. 47-48.

Laino, A., 2015. *Bamboo Wing. Naturaleza, tradición y contemporaneidad*. [En línea]

Available at: <http://www.fadu.edu.uy/viaje2015/articulos-estudiantiles/bamboo-wing-naturaleza-tradicion-y-contemporaneidad/>

[Último acceso: 16 Marzo 2021].

Lewis Bamboo, s.f.. *Incense Bamboo*. [En línea]

Available at: <https://lewisbamboo.com/products/incense-bamboo>

[Último acceso: 12 Septiembre 2021].

Lewis, D. & Miles, C., 2007. *Farming Bamboo*. Primera ed. Morrisville(Carolina del Norte): Lulu Press.

- Liese, W., 1987. Research on bamboo. *Wood Science and Technology*, Volumen 21, pp. 189-209.
- Liese, W., 1998. *The Anatomy of Bamboo Culms (INBAR Technical Report N°18)*. Beijing: INBAR.
- Liese, W. & Düking, R., 2009. Bambus als CO₂-Speicher?. *Naturwissenschaftliche Rundschau*, 62(7), pp. 341-348.
- Li, H. y otros, 2021. Experimental investigation on axial compression behavior of laminated bamboo lumber short columns confined with CFRP. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volumen 150, p. 106605 (Versión online).
- Li, H., Su, J. & Corbi, O., 2020. Evaluation on the ultimate bearing capacity for laminated bamboo lumber columns under eccentric compression. *Structures*, Volumen 28, pp. 1572-1579.
- Li, T., 2013. *¿Qué puede hacer el Bambú sobre el Cambio Climático?*. [En línea] Available at: <https://inesad.edu.bo/dslm/2013/07/que-puede-hacer-el-bambu-sobre-el-cambio-climatico/> [Último acceso: 18 Septiembre 2020].
- Liu, P. y otros, 2020. Fundamental research on tensile properties of phyllostachys bamboo. *Journal of Materials Research*, p. 100076 (Versión online).
- Liu, W.-Y., Fox, J. E. & Xu, Z., 2000. Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao Mountain, Yunnan, South-west China. *Ecological Research*, 15(4), pp. 435-447.
- Li, X. y otros, 2007. Chemical changes with maturation of the bamboo species *Phyllostachys pubescens*. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 19, pp. 6-12.
- Lobovikov, M. y otros, 2007. *World bamboo resources. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005*, Roma: FAO.
- Londoño, X., 1989. *The American Bamboos with emphasis in the Genus Guadua*. Cali: Instituto Vallecaucano de Investigaciones Científicas, INCIVA.
- López Villalba, J. A. y otros, 2002. *Árboles comunes del Paraguay ñande yvyra mata kuera*. Segunda ed. Paraguay: Cuerpo de Paz, Colección e Intercambio de Información.
- López, L. F. & Correal, J. F., 2009. Estudio exploratorio de los laminados de bambú *Guadua angustifolia* como material estructural. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 11(3), pp. 171-182.
- Lucila Aguilar Arquitectos, s.f.. *Manual para la Construcción con Bambú*. Cuajimalpa de Morelos: Lucila Aguilar Arquitectos.
- Lynch, P., 2016. *Vídeo: Andamios de bambú en la construcción de rascacielos en Hong Kong*. [En línea] Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/793698/video-andamios-de-bambu-en-la-construccion-de-rascacielos-en-hong-kong> [Último acceso: 4 Marzo 2021].
- M., L., 2008. *Museo Nómada*. [En línea] Available at: <https://mrmannoticias.blogspot.com/2008/10/museo-nomada.html> [Último acceso: 10 Marzo 2021].

- Magic Garden Seeds, s.f.. *Bambú Moso (Phyllostachys pubescens)*. [En línea]
Available at: [https://www.magicgardenseeds.es/Las-%C3%99nicas/Bamb%C3%BA-Moso-\(Phyllostachys-pubescens\)-A.PHY04-](https://www.magicgardenseeds.es/Las-%C3%99nicas/Bamb%C3%BA-Moso-(Phyllostachys-pubescens)-A.PHY04-)
[Último acceso: 13 Septiembre 2021].
- Makino, T., 1925. Pseudosasa. *Journal of the Arnold Arboretum*, 6(3), p. 150.
- Martínez García, S., 2015. *Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo*. Primera ed. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Martínez Jiménez, A. J., 2016. *Evaluación de daño mediante el método de emisión acústica de vigas de madera antigua reforzadas con CFRP*. Granada: Universidad de Granada.
- Martínez-Jequier, J. y otros, 2015. Real-time damage mechanisms assessment in CFRP samples via acoustic emission Lamb wave modal analysis. *Composites Part B: Engineering*, Volumen 68, p. 317–326.
- Maya Garden, s.f.. *Phyllostachys Atrovaginata 'Incense Bamboo'*. [En línea]
Available at: <https://mayagardensinc.com/products/phyllostachys-atrovaginata-incense-bamboo>
[Último acceso: 12 Septiembre 2021].
- Maza, L., 2016. *El bambú gigante (Bambusa oldhamii)*. [En línea]
Available at: <https://www.elverdecillo.com/bambu-gigante-bambusa-oldhamii/>
[Último acceso: 27 Agosto 2021].
- Mejía G., A. I. y otros, 2009. Plantas del género Bambusa: importancia y aplicaciones en la industria farmacéutica, cosmética y alimentaria. *VITAE, Revista de la Facultad de Química Farmacéutica*, 16(3), pp. 396-405.
- Meredith, T. J., 2001. *Bamboo for Gardens*. Primera ed. Portland(Oregón): Timber Press.
- Michalun, M. V. & Dinardo, J. C., 2014. *Skin Care and Cosmetic Ingredients Dictionary*. Cuarta ed. s.l.:Cengage Learning.
- Ministerio de Asuntos Exteriores, Unión Europea y Cooperación, 2018. *Agenda 2030*. [En línea]
Available at:
<http://www.exteriores.gob.es/Portal/es/PoliticaExteriorCooperacion/Agenda2030/Paginas/Inicio.aspx>
[Último acceso: 11 Septiembre 2020].
- Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018. *Agenda 2030 - Objetivo 13*. [En línea]
Available at: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/objetivo13.htm>
[Último acceso: 12 Septiembre 2020].
- Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018. *Agenda 2030 - Objetivo 15*. [En línea]
Available at: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/objetivo15.htm>
[Último acceso: 12 Septiembre 2020].
- Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018. *Agenda 2030 - Objetivo 6*. [En línea]
Available at: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/objetivo6.htm>
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].

Ministerio de Derechos Sociales y Agenda 2030, 2018. *Agenda 2030 - Objetivos*. [En línea]
Available at: <https://www.agenda2030.gob.es/objetivos/home.htm>
[Último acceso: 11 Septiembre 2020].

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2016. *Norma Ecuatoriana de la Construcción - Seguridad Estructural - Estructuras de Guadúa (GaK)*. Quito: MIDUVI.

Ministerio de Fomento, 2019. *Código Técnico de la Edificación*. Primera ed. Madrid: s.n.

Ministerio de Vivienda, C. y. S. d. P., 2006. *Norma Técnica Peruana E. 010 Madera*. Primera ed. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú.

Ministerio de Vivienda, C. y. S. d. P., 2012. *Norma Técnica Peruana E. 100 Bambú*. Primera ed. Lima: Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento de Perú.

Minke, G., 2010. *Manual de Construcción con Bambú*. Primera ed. Cali: Merlín, S.E..

Minuto30.com, 2013. *DAGR D Medellín atiende colapso parcial del puente peatonal en barrio Santo Domingo Savio*. [En línea]
Available at: <https://www.minuto30.com/medellin/infraestructura-medellin-area-metropolitana/dagr-d-medellin-atiende-colapso-parcial-del-puente-peatonal-en-barrio-santo-domingo-savio/195408/>
[Último acceso: 3 Marzo 2021].

Miralles García, F. & Campos Vilardebó, D., 2012. *Materia Médica I: Materiales Académicos de Medicina China*. Primera ed. Amposta(Tarragona): Fundación Europea de MTC.

Mishra, G. y otros, 2014. Bamboo: potential resource for eco-restoration of degraded lands. *Journal of Biology and Earth Sciences*, 4(2), pp. B130-B136.

Mizutani, Y., 2016. *Practical Acoustic Emission Testing. Japanese Society for Non-Destructive Inspection*. Tokyo: Springer.

Mohmod, A., Amin, A., Kasim, J. & Jusuh, M., 1995. Chemical constituents and physical properties of *Bambusa heterostachya*. En: *Vth International Bamboo Workshop and IV International Bamboo Congress*. Ubud: International Development Research Centre, pp. 225-238.

Mohmod, A. L., Amin, A. H., Kasim, J. & Jusuh, M. Z., 1993. Effects of anatomical characteristics on the physical and mechanical properties of *Bambusa blumeana*. *Journal of Tropical Forest Science*, 6(2), pp. 159-170.

Mohmod, A. L. & Jusuh, M. Z., 1992. Culm characteristics of *Bambusa blumeana* and *Gigantochloa scortechinii* and their effects on physical and mechanical properties. En: I. T. T. O. a. C. A. o. Forestry, ed. *Bamboo and its use*. Beijing: International Symposium on Industrial Use of Bamboo, pp. 118-128.

Monouso, 2020. *¿Cuáles son los diferentes usos del bambú en la vida cotidiana?*. [En línea]
Available at: <https://blog.monouso.es/usos-del-bambu/>
[Último acceso: 23 Febrero 2021].

Montero, D., 2020. *Bambú gigante, Bambú asper*. [En línea]
Available at: <https://www.consejosparamihuerto.com/familias/bambu-gigante-bambu-asper/>
[Último acceso: 10 Septiembre 2021].

- Montiel, M., Jiménez, V. M. & Guevara, E., 2006. Ultraestructura del bambú *Guadua angustifolia* var. *bicolor* (Poaceae: Bambusoideae), presente en Costa Rica. *Revista de Biología Tropical*, 54(2), pp. 13-19.
- More Hotels, 2012. *Crosswaters Ecolodge*. [En línea]
Available at: <https://morehotels.wordpress.com/eco-hoteles/crosswaters-ecolodge-china/>
[Último acceso: 14 Marzo 2021].
- Moreira, S. & Souza, E., 2020. *5 materiales alternativos para construir refugios de emergencia*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/939306/5-materiales-alternativos-para-construir-refugios-de-emergencia>
[Último acceso: 3 Marzo 2021].
- Moreno Bazán, Á., 2015. *Caracterización y adherencia madera antigua - fibra de carbono para refuerzo estructural: Resultados preliminares*. Granada: Universidad de Granada.
- Moreno P., P. A., Garay J., D. A., Durán P., J. A. & Valero, S. W., 2007. Utilización de la *Bambusa Vulgaris* como una alternativa en la fabricación de tableros aglomerados de partículas. *Revista Forestal Latinoamericana*, Volumen 42, pp. 31-50.
- MOSO, s.f.. *Aeropuerto Internacional Barajas Madrid*. [En línea]
Available at: <https://www.moso-bamboo.com/es/inspiracion-en-bambu/aeropuerto-internacional-madrid/>
[Último acceso: 14 Agosto 2021].
- Naciones Unidas, 2015. *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. [En línea]
Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
[Último acceso: 11 Septiembre 2020].
- Naciones Unidas, s.f.. *Objetivo 11: Lograr que las ciudades sean más inclusivas, seguras, resilientes y sostenibles*. [En línea]
Available at: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/cities/>
[Último acceso: 27 Noviembre 2021].
- Nianhe, X., Liangzhi, J., Dezhu, L. & Stapleton, C., 2006. BAMBUSA Schreber, Gen. Pl. 236. 1789, nom. cons.. *Flora of China*, Volumen 22, pp. 9-38.
- Nordahlia, A. y otros, 2012. Effects of Age and Height on Selected Properties of Malaysian Bamboo (*Gigantochloa levis*). *Journal of Tropical Forest Science*, 24(1), pp. 102-109.
- Nurmadina, N., Nughor & Bahtiar, E., 2017. Structural grading of *Giantochloa apus* bamboo based on its flexural properties. *Construction and Building Materials*, Volumen 157, p. 1173–1189.
- Obras por Expansión, 2018. *Ingeniero crea casas exprés de bambú para áreas pobres de Manila*. [En línea]
Available at: <https://obras.expansion.mx/arquitectura/2018/12/06/ingeniero-crea-casas-de-bambu-para-areas-pobres-de-manila>
[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Ogunsona, E., Misra, M. & Mohanty, A., 2017. Accelerated hydrothermal aging of biocarbon reinforced nylon biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, Volumen 139, pp. 76-88.

Ohrnberger, D., 1999. *Los bambúes del mundo: nomenclatura anotada y literatura de las especies y los taxones superiores e inferiores*. Primera ed. Amsterdam: Elsevier.

Oka, G. M., Triwiyono, A., Awaludin, A. & Siswosukarto, S., 2014. Effects of node, internode and height position on the mechanical properties of gigantochloa atroviolacea bamboo. *Procedia Engineering*, Volumen 95, pp. 31-37.

Oka, G., Triwiyono, A., Awaludin, A. & Siswosukarto, S., 2014. Effects of node, internode and height position on the mechanical properties of gigantochloa atroviolacea bamboo. *Process Engineering Journal*, Volumen 95, pp. 31-37.

Omega Engineering, s.f.. *Galgas extensiométricas*. [En línea]
Available at: <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensiometricas.html#>
[Último acceso: 10 Diciembre 2021].

Ordoñez Candelaria, V. R. & Salomón Quintana, I., 2009. Consideraciones geométricas en la determinación de las propiedades en flexión estática de bambú. *Madera y Bosques*, 15(1), pp. 91-100.

Ordóñez-Candelaria, V. R. & Bárcenas-Pazos, G. M., 2014. Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera y Bosques*, 20(2), pp. 111-125.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, 2019. 6.4.2. *Estrés hídrico*. [En línea]
Available at: <http://www.fao.org/sustainable-development-goals/indicators/642/es/>
[Último acceso: 13 Septiembre 2020].

Osorio, J., Vélez, J. & Ciro, H., 2007. Internal structure of the *Guadua* and its incidence in the mechanical properties. *DYNA*, Volumen 153, pp. 81-94.

Palma Verde, s.f.. *Bambú-bambú *Phyllostachys atrovaginata* - *Phyllostachys congesta**. [En línea]
Available at: <https://www.palmaverde.nl/en/phyllostachys-atrovaginata-phyllostachys-congesta.html>
[Último acceso: 12 Septiembre 2021].

Parameswaran, N. & Liese, W., 1976. On the fine structure of bamboo fibres. *Wood Science and Technology*, Volumen 10, p. 231–246.

Pascual Menéndez, J. M., 2011. *Manual para la Construcción con Bambú “Nave Agropecuaria para Ganado Vacuno”*. Primera ed. Santiago de Cuba: GCT CASAS.

Peng, G. y otros, 2014. Detection of complex vascular system in bamboo node by X-ray μ CT imaging technique. *Holzforschung*, Volumen 68, pp. 223-227.

Peña, C. M. & Tokatlian, L., 2013. *El bambú en el delta bonaerense y su gente: Desarrollo de proyectos sustentables para el delta de la provincia de Buenos Aires - Gestión 2008-2012*. Primera ed. Buenos Aires: DMP Diseño Gráfico.

Pérez García, N. y otros, 2009. El bambú (*Bambusa* spp.) como sistema agroforestal: una alternativa de desarrollo mediante el pago por servicios ambientales en la sierra nororiental del Estado de Puebla. *Ra Ximhai*, 5(3), pp. 335-346.

Pérez, M., 2012. *Bambusa oldhamii*. [En línea]
Available at: http://www.botanicayjardines.com/bambusa-oldhamii/?_cf_chl_jschl_tk=_pmd_SUD3CzgSZSmlvLJNbf3Yae_VYHqncIVXEKds.V5Is-1630053823-0-gqNtZGzNAeWjcnBszQP1
[Último acceso: 27 Agosto 2021].

Pérez, M., 2013. *Pseudosasa japonica*. [En línea]
Available at: http://www.botanicayjardines.com/pseudosasa-japonica/?_cf_chl_jschl_tk=_pmd_tdQr_ciC1KVZGa18AY6hl4L86hPT5vC5Ub6x02Gt3Cs-1630085944-0-gqNtZGzNAeWjcnBszQP9
[Último acceso: 27 Agosto 2021].

Pérez, M., 2014. <http://www.mimbrea.com/bambu-en-espana/>. [En línea]
Available at: <http://www.mimbrea.com/bambu-en-espana/>
[Último acceso: 6 Enero 2021].

PERUBAMBÚ, s.f. *Métodos de propagación del Bambú (Guadua angustifolia)*. Primera ed. Lima: Asociación Peruana del Bambú.

Piñeros, A., 2017. *Así reconstruyeron una región de Ecuador a punta de bambú*. [En línea]
Available at: <https://sostenibilidad.semana.com/impacto/articulo/bambu-asi-reconstruyeron-una-region-de-ecuador-con-este-material/37621>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].

Planfor, s.f.a. *Bambú Phyllostachys Atrovaginata "Green Perfume"*. [En línea]
Available at: <https://www.planfor.es/compra,bambu-phyllostachys-atrovaginata,9271,ES#ficha-tecnica>
[Último acceso: 12 Septiembre 2021].

Planfor, s.f.b. *Bambú Phyllostachys Nigra*. [En línea]
Available at: <https://www.planfor.es/compra,bambu-phyllostachys-nigra,9268,ES#ficha-tecnica>
[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Planfor, s.f.c. *Saberlo todo sobre: Bambú Bambusa vulgaris Vittata*. [En línea]
Available at: <https://www.planfor.es/compra,bambu-bambusa-vulgaris-vittata,9283,ES>
[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Plank, H. K., 2018. *Biology of the Bamboo Powder-Post Beetle in Puerto Rico*. Primera ed. Londres(Inglaterra): Forgotten Books.

Plantas & Jardín, 2011. *Phyllostachys nigra, el Bambú negro*. [En línea]
Available at: <https://plantasyjardin.com/2011/02/phyllostachys-nigra-bambu-negro/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Plantas y Hongos, s.f.. *Bambusa vulgaris Schrad. ex J. C. Wendl. (Poaceae)*. [En línea]
Available at: https://www.plantasyhongos.es/herbarium/htm/Bambusa_vulgaris.htm
[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Plantukis, s.f.. *Bambusa vulgaris*. [En línea]

Available at: <http://plantukis.blogspot.com/2014/06/bambusa-vulgaris.html>

[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Plataforma Arquitectura, 2013. *Casa Bb / H&P Architects*. [En línea]

Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/02-297672/casa-bb-h-and-p-architects>

[Último acceso: 17 Marzo 2021].

Plataforma Arquitectura, 2017. *Módulo de vivienda sostenible Piura / Carlos Pastor Santa María*. [En línea]

Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/873357/modulo-de-vivienda-sostenible-piura-carlos-pastor-santa-maria>

[Último acceso: 4 Marzo 2021].

Poblete, H., Cuevas, H. & Díaz-Vaz, J., 2009. Property characterization of *Chusquea culeou*, a bamboo growing in Chile. *Maderas: Ciencia y Tecnología*, 11(2), pp. 129-138.

Poppens, R. & Morán Ubidia, J. A., 2005. *Manual de construcción: vivir con la guadúa*. Primera ed. Quito: INBAR.

Portillo, G., s.f.. *Bambusa*. [En línea]

Available at: <https://www.jardineraon.com/bambusa.html>

[Último acceso: 26 Agosto 2021].

Prakash, S., 2016. *Pabellón de la India en la Exposición Universal de 2010, Shanghai, China*. [En línea]

Available at: <https://architecturelive.in/india-pavilion-at-world-expo-2010-shanghai-china-shift-sanjay-prakash-and-associates/>

[Último acceso: 11 Marzo 2021].

Puccio, P., s.f.. *Bambusa vulgaris*. [En línea]

Available at: <https://www.monaconatureencyclopedia.com/bambusa-vulgaris/?lang=es>

[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Qi, L.-H. y otros, 2009. Effects of different tending measures on carbon density, storage, and allocation pattern of *Phyllostachys edulis* forests in Western Fujian Province. *Chinese Journal of Ecology*, Agosto, 28(8), pp. 1482-1488.

Quiero ser Ingeniera, 2019. *Quiero ser Ingeniera*. [En línea]

Available at: <https://quieroseringeniera.ugr.es/index.html>

[Último acceso: 3 Enero 2022].

RAE, 2014. *Diccionario de la Lengua Española 23ª Edición*. Madrid: Espasa Libros, S.L.U..

Rarepalmseeds, s.f.. *Phyllostachys edulis*. [En línea]

Available at: <https://www.rarepalmseeds.com/es/phyllostachys-edulis-es>

[Último acceso: 13 Septiembre 2021].

Rebelo, C. & Buckingham, K., 2015. Bamboo: the opportunities for forest and landscape restoration. *Unasylva*, 66(3), pp. 91-98.

RedacciónT21, 2013. *Uso del bambú para el tratamiento de aguas residuales*. [En línea]

Available at: <https://tendencias21.levante-emv.com/uso-del-bambu-para-el-tratamiento-de->

[aguas-residuales_a25784.html](#)

[Último acceso: 13 Septiembre 2020].

Rescalvo Fernández, F. J., 2018. *Refuerzos de fibra de carbono para rehabilitación de vigas de madera. Modelos analíticos, ensayos experimentales y puesta en obra*. Primera ed. Granada: Universidad de Granada.

Residuos Profesional, 2013. *Utilizan plantas de bambú para tratar aguas residuales*. [En línea] Available at: <https://www.residuosprofesional.com/utilizan-plantas-de-bambu-para-tratar-aguas-residuales/>

[Último acceso: 13 Septiembre 2020].

RHS, s.f.. *Pseudosasa japonica*. [En línea]

Available at: <https://www.rhs.org.uk/Plants/14080/i-Pseudosasa-japonica-i/Details>

[Último acceso: 27 Agosto 2021].

Ribeiro, R., Ribeiro, M. & Miranda, I., 2017. Bending strength and nondestructive evaluation of structural bamboo. *Construction and Building Materials*, Volumen 146, pp. 38-42.

Richard, M., Gottron, J., Harries, K. & Ghavami, K., 2016. Experimental evaluation of longitudinal splitting of bamboo flexural components. *Journal of Building Engineering*, Volumen 170, pp. 1-10.

Richard, M. & Harries, K., 2015. On inherent bending in tension tests of bamboo. *Wood Science And Technology*, 49(1), pp. 99-119.

Rodrigues Moura, C., Oliveira Dalla Valentina, L. V. & Tavares Vieira, A. J., 2018. Avaliação da perda de massa de colmos de bambu durante o processo de secagem. *Engevista*, 20(3), pp. 476-486.

Rodríguez Alonso, C. A. & Morales Díaz, E., 2008. *El Bambú como material estructural: análisis de un caso práctico*. Primera ed. Girona: Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.

Rodríguez, E., 2013. *Bicicletas de bambú, liderazgo femenino y negocios locales contra el cambio climático*. [En línea]

Available at: <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Bicicletas-de-bambu-liderazgo-femenino-y-negocios-locales-contr-el-cambio-climatico#top>

[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Rodríguez, J., 2013. *El Centro de Documentación del Bambú de la UCSG, ganadora de los "Premios Latinoamérica Verde"*. [En línea]

Available at: <https://www.concienciaeco.com/2013/07/19/el-centro-de-documentacion-del-bambu-de-la-ucsg-ganadora-de-los-premios-latinoamerica-verde/>

[Último acceso: 19 Marzo 2021].

Rodríguez-Pérez, M. y otros, 2006. Evaluación de la actividad antimalárica de algunas plantas utilizadas en la medicina tradicional cubana. *Revista de Ciências Farmacêuticas Básica e Aplicada*, 27(3), pp. 197-205.

RoiPress, 2020. *Fundación COPADE defiende el comercio justo como alternativa económica tras la crisis del Covid-19*. [En línea]

Available at: <https://www.roipress.com/2020/10/fundacion-copade-defiende-el->

[comercio.html](#)

[Último acceso: 8 Octubre 2020].

Rojas Quiroga, R. A., Li, T., Lora, G. & Andersen, L. E., 2013. *A Measurement of the Carbon Sequestration Potential of Guadua Angustifolia in the Carrasco National Park, Bolivia*. Primera ed. La Paz: Institute for Advanced Development Studies Development Research Working Paper Series.

Rosas Saito, G. H., s.f.. *Microscopía electrónica de barrido y microanálisis de elementos del Clúster Científico y Tecnológico BioMimic®*. [En línea]

Available at: <https://www.inecol.mx/inecol/index.php/es/ct-menu-item-25/ct-menu-item-27/17-ciencia-hoy/723-microscopia-electronica-de-barrido-y-microanalisis-de-elementos-del-cluster-cientifico-y-tecnologico-biomimic>

[Último acceso: 13 Diciembre 2021].

Saidan, E., Scida, D., Assarar, M. & Ayad, R., 2017. Damage mechanisms assessment of hybrid flax-glass fibre composites using acoustic emission. *Composite Structures*, 174(10.1016/j.compstruct.2017.04.044), pp. 1-11.

Salas Delgado, E., 2006a. *Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia. Simón Vélez: símbolo y búsqueda de lo primitivo*. Primera ed. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya.

Salas Delgado, E., 2006b. La importancia de la gada en la obra de Simón Vélez. *Boletín de información técnica [de] AITIM*, Volumen 241, pp. 14-19.

Salas Delgado, E., 2012. La era del bambú. *Boletín de información técnica [de] AITIM*, Volumen 279, pp. 32-37.

Saltaren, C. & Montaña, E., 2000. *Características y propiedades físicas y mecánicas de especies de bambú del Valle del Cauca*, Palmira: Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira.

Sánchez, A., 2017. *Madera*. [En línea]

Available at: <https://www.madera.es/la-especies-de-madera-mas-relevantes-en-espana/>

[Último acceso: 27 Enero 2020].

Sánchez, M., Patiño, W. & Cárdenas, J., 2020. Physical-mechanical properties of bamboo fibers-reinforced biocomposites: influence of surface treatment of fibers. *Journal of Building Engineering*, Volumen 28, p. 101058 (Versión online).

Sangronis Padrón, J., 2012. *Arquívideo 2: El Arquitecto Simón Vélez y el Bambú*. [En línea]

Available at: <http://apuntesdearquitecturadigital.blogspot.com/2012/08/arquívideo-2-el-arquitecto-simon-velez.html>

[Último acceso: 9 Marzo 2021].

Sanz, D., 2010. *Bambú para luchar contra el cambio climático*. [En línea]

Available at: <https://climaticocambio.com/bambu-para-luchar-contr-el-cambio-climatico/>

[Último acceso: 14 Septiembre 2020].

Sarmiento, L., 2018. *Jardinería On*. [En línea]

Available at: <https://www.jardineriaon.com/bambu.html>

[Último acceso: 24 Enero 2020].

Sause, M., 2016. *In-Situ Monitoring of Fiber-Reinforced Composites*. Berlin: Springer.

Sause, M. G., 2011. Investigation of Pencil Lead Breaks as Acoustic Emission Sources. *Journal of Acoustic Emission*, Volumen 29, pp. 184-196.

Schröder, S., s.f.a. *Bambusa vulgaris 'Vittata'*. [En línea]

Available at: <https://www.guaduabamboo.com/blog/bambusa-vulgaris-vittata>

[Último acceso: 30 Agosto 2021].

Schröder, S., s.f.b. *¿Qué es la Guadua angustifolia?*. [En línea]

Available at: <https://www.guaduabambu.com.co/blog/que-es-la-guadua-angustifolia>

[Último acceso: 16 Noviembre 2021].

Scottish Bamboo, s.f.. *Phyllostachys Atrovaginata Green Perfume Bamboo*. [En línea]

Available at:

https://www.scottishbamboo.com/Phyllostachys+Atrovaginata+Green+Perfume+Bamboo/0_CAAA004_CAAA015/PRAA066.htm

[Último acceso: 9 Septiembre 2021].

Semana S.A., 2013. *Medellín: el puente de Guadua que también colapsó*. [En línea]

Available at: <https://www.semana.com/nacion/articulo/colapso-puente-de-guadua-en-medellin/363057-3/>

[Último acceso: 5 Marzo 2021].

Semillas Únicas, s.f.a. *BAMBU MOSO GIGANTE Phyllostachys pubescens bamboo*. [En línea]

Available at: <https://www.semillasunicas.es/BAMBU-MOSO-GIGANTE-Phyllostachys-pubescens-bamboo-30-Semillas-d385.htm>

[Último acceso: 13 Septiembre 2021].

Semillas Únicas, s.f.b. *Bambu negro Phyllostachys nigra - Moso black*. [En línea]

Available at: <https://www.semillasunicas.es/Bambu-negro-Phyllostachys-nigra-Moso-black-25-semillas-d1134.htm>

[Último acceso: 14 Septiembre 2021].

Semillas Únicas, s.f.c. *EL BAMBU MAS GIGANTE del mundo DENDROCALAMUS*. [En línea]

Available at: <https://www.semillasunicas.es/EL-BAMBU-MAS-GIGANTE-del-mundo-DENDROCALAMUS-100-semillas-seeds-d383.htm>

[Último acceso: 31 Agosto 2021].

SENCICO, 2014. *Manual de Construcción de Estructuras con Bambú*. Primera ed. Lima: Cartolan Editores, S.R.L..

Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción, 2020. *Normas del Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE)*. [En línea]

Available at: <https://www.gob.pe/institucion/sencico/informes-publicaciones/887225-normas-del-reglamento-nacional-de-edificaciones-rne>

[Último acceso: 27 Enero 2022].

Shao, Z. y otros, 2010. Differences in structure and strength between internode and node sections of moso bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 22, pp. 133-139.

Shao, Z. y otros, 2010. Differences in structure and strength between internode and node sections of moso bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 22, pp. 133-138.

Sharma, B., 2010. *Seismic Performance of Bamboo Structures* [Entrevista] 2010.

- Sharma, B., Gatoó, A., Bock, M. & Ramage, M., 2015. Engineered bamboo for structural applications. *Construction and Building Materials*, Volumen 81, pp. 66-73.
- Shin, F., Xian, X., Zheng, W. & Yipp, M., 1989. Analyses of the mechanical properties and microstructure of bamboo-epoxy composites. *Journal Of Materials Science*, 24(10), p. 3483–3490.
- Shukla, R. y otros, 2012. Medicinal Importance of Bamboo. *International Journal of Biopharm & Phytochemical Research*, 1(1), pp. 9-15.
- Shukla, S. & Sharma, S., 2017. Evaluation of dynamic elastic properties of Bambusa Bambos at three different stages of its life cycle by elastosonic technique. *Journal of Tropical Forest Science*, Volumen 29, p. 448–456.
- Sistema Nacional Argentino de Vigilancia y Monitoreo de Plagas, s.f.. *Dendrocalamus asper*. [En línea]
Available at: <https://www.sinavimo.gob.ar/cultivo/dendrocalamus-asper>
[Último acceso: 10 Septiembre 2021].
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group, 2004. *The SER International Primer on Ecological Restoration*. [En línea]
Available at: https://www.ctahr.hawaii.edu/littonc/PDFs/682_SERPrimer.pdf
[Último acceso: 7 Octubre 2020].
- Soler Soler, P., 2017. *Uso del bambú en la arquitectura contemporánea*. Primera ed. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.
- Song, J., Gao, L. & Lu, Y., 2017. In situ mechanical characterization of structural bamboo materials under flexural bending. *Experimental Techniques*, Volumen 41, p. 565–575.
- Song, J., Surjadi, J. U., Hu, D. & Lu, Y., 2017. Fatigue characterization of structural bamboo materials under flexural bending. *International Journal of Fatigue*, Volumen 100, pp. 126-135.
- Sotela, J., 1992. El bambú: una alternativa de uso en construcción de vivienda. *Ingeniería. Revista de la Universidad de Costa Rica*, 2(1), pp. 87-94.
- Spavento, E. M., Keil, G. D. & Monteoliva, S., 2008. *Propiedades mecánicas de la madera*. Primera ed. La Plata: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales de la Universidad Nacional de la Plata.
- Stamm, J., 2008. La Evolución de los Métodos constructivos en Bambú. En: *Segundo Congreso Mexicano del Bambú*. Puebla: s.n.
- Stevens, P., 2014. *Vo Trong Nghia surrounds country retreat with Bamboo Wing*. [En línea]
Available at: <https://www.designboom.com/architecture/vo-trong-nghia-architects-bamboo-wing-07-04-2014/>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].
- Stott, R., 2014. *Vo Trong Nghia obtiene el premio ARCASIA al mejor edificio del año*. [En línea]
Available at: <https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/623549/vo-trong-nghia-obtiene-el-premio-arcasia-al-mejor-edificio-del-ano>
[Último acceso: 16 Marzo 2021].

- Strong, H., 1907. *The National Druggist. Volume 37*. Primera ed. Ann Arbor(Michigan): University of Michigan.
- Studio Jencquel, 2020. *Kura Kura Badminton Court*. [En línea]
Available at: <https://www.studiojencquel.com/kura-kura-1>
[Último acceso: 15 Marzo 2021].
- Studio Jencquel, 2020. *Studio Jencquel_Bali*. [En línea]
Available at: <https://www.studiojencquel.com/>
[Último acceso: 15 Marzo 2021].
- Subyakto, 1995. Variation in specific gravity and bending properties of *Dendrocalamus asper* culm grown in Bogor. En: *Vth International Bamboo Workshop and IV International Bamboo Congress*. Ubud: International Development Research Centre, pp. 185-192.
- Surjokusumo, S. & Nugroho, N., 1995. A study on *Dendrocalamus asper* as concrete reinforcement. En: *Vth International Bamboo Workshop and IV International Bamboo Congress*. Ubud(Bali): International Development Research Centre, pp. 92-98.
- Tahmasebinia, F. y otros, 2021. Sustainable architecture creating arches using a bamboo grid shell structure: Numerical analysis and design. *Sustainability*, 13(13), p. 2598.
- Takeuchi, C. & González, C., 2007. Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. *Ingeniería y Universidad*, 11(001), pp. 89-103.
- Tan, T. y otros, 2011. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures. *Acta Biomater*, Volumen 7, p. 3796–3803.
- Tavera, H., 2020. *Pisco 2007: 13 años de un sismo devastador*. [En línea]
Available at: <https://www.gob.pe/institucion/igp/noticias/294466-pisco-2007-13-anos-de-un-sismo-devastador>
[Último acceso: 27 Enero 2022].
- Taylor, D., 1998. Fatigue of bone and bones: An analysis based on stressed volume. *Journal of Orthopaedic Research*, 16(2), pp. 163-169.
- Taylor, D. y otros, 2014. The biomechanics of bamboo: investigating the role of the nodes. *Wood Science And Technology*, Volumen 49, p. 345–357.
- Teneche, G., 2013. *Plantar Guadua, semillero y vivero de Guadua angustifolia, reforestar con Guadua*. [En línea]
Available at: <https://guaduabambucolombias.com/tag/plantulas-y-chusquines/>
[Último acceso: 26 Agosto 2021].
- Teneche, G., 2015. *Por qué se cayó el puente de Guadua en Medellín*. [En línea]
Available at: <https://guaduabambucolombias.com/2015/01/25/por-que-se-cayo-el-puente-de-guadua-en-medellin-2/>
[Último acceso: 3 Marzo 2021].
- Tewari, S. y otros, 2016. Bamboo based agroforestry systems. En: I. C. o. F. R. a. Education, ed. *Bamboos in India*. Dehradun: Institute of Wood Science and Technology, pp. 261-284.

- The Little Dröm Store, 2014. *Japan travelogue – The Light of Shōdoshima*. [En línea]
Available at: <https://thelittledromstore.tumblr.com/post/50329613522/light-of-shodoshima>
[Último acceso: 7 Marzo 2021].
- Toledo-Bruno, A. y otros, 2017. Ecology of litterfall production of giant bamboo *Dendrocalamus asper* in a watershed area. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 3(4), pp. 363-372.
- Torres Rojas, J. E., 2019. *Mantenimiento de estructuras de bambú*. [En línea]
Available at: <https://evidally.com/mantenimiento-estructuras-de-bambu/>
[Último acceso: 18 Noviembre 2021].
- Tropicos, s.f.a. *Bambusa vulgaris Schrad. ex J.C. Wendl.*. [En línea]
Available at: <http://legacy.tropicos.org/Name/25509331>
[Último acceso: 19 Noviembre 2021].
- Tropicos, s.f.b. *Dendrocalamus Nees*. [En línea]
Available at: <http://legacy.tropicos.org/Name/40023463>
[Último acceso: 31 Agosto 2021].
- Trujillo, D., Jangra, S. & J.M., G., 2016. *Flexural properties as a basis for bamboo strength grading*. Beijing: Proceedings of the Institution of Civil Engineering.
- Trujillo, D. & López, L., 2016. Bamboo material characterisation. En: Primera, ed. *Nonconventional and Venacular Construction Materials*. Conventry: Woodhead Publishing, p. 365–392.
- Tsai, S. y otros, 2016. Acoustic emission from breaking a bamboo chopstick. *Physical Review Letters*, 116(3), p. 35501 (versión online).
- Unicef, 2017. *Lluvias e inundaciones: Fenómeno El Niño - 2017*. [En línea]
Available at: <https://www.unicef.org/peru/emergencias/lluvias-inundaciones-fenomeno-el-nino-2017>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- Valero, S., Reyes, E. & Contreras, W., 2005. Estudio de las propiedades mecánicas del bambú (*Bambusa vulgaris*), de tres años de edad y proveniente de las plantaciones ubicadas en la ribera de la margen derecha del río Chama, municipio Francisco Javier Pulgar, estado Zulia, Venezuela. *Revista Forestal Latinoamericana*, Volumen 37, pp. 87-107.
- van der Lugt, P., 2017. *Booming Bamboo. The (re)discovery of a sustainable material with endless possibilities*. Primera ed. Naarden: Materia Exhibitions B.V..
- Vélez, S., 2016. *Catedral Sin Religión*. [En línea]
Available at: <https://arqa.com/arquitectura/catedral-sin-religion.html>
[Último acceso: 9 Marzo 2021].
- Vendrell Felici, S., 2015. *Torre de Bambú, una ciudad sostenible en altura*. [En línea]
Available at: <https://arquitecturayempresa.es/noticia/torre-de-bambu-una-ciudad-sostenible-en-altura>
[Último acceso: 27 Enero 2022].

- Verdify, s.f.. *Phyllostachys Nigra - Bambú caña Negra*. [En línea]
Available at: <https://www.verdify.es/phyllostachys-nigra-bambu-cana-negra-b522/>
[Último acceso: 14 Septiembre 2021].
- Villiers, A. J., 2021. *James Cook*. [En línea]
Available at: <https://www.britannica.com/biography/James-Cook>
[Último acceso: 20 Noviembre 2021].
- Viteri López, A. V., 2017. *Comportamiento térmico de dos plantas fibrosas ecuatorianas para la utilización como aislamiento en viviendas*. Primera ed. Sangolquí: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Vives, S., 2020. *Un parado de Sollana planea el primer bosque de bambú de España*. [En línea]
Available at: <https://www.levante-emv.com/comarcas/2011/11/20/parado-sollana-planea-primer-bosque-13022988.html>
[Último acceso: 9 Noviembre 2021].
- Volterra, 2020. *Bambú para restauración de ecosistemas y como cultivo comercial*. [En línea]
Available at: <https://volterra.bio/es/bambu-agricultura-regenerativa-cultivo-comercial/volterra-bambu-agricultura-regenerativa-cultivo-comercial-249.html>
[Último acceso: 7 Octubre 2020].
- Wang, F., Shao, Z., Wu, Y. & Wu, D., 2013. The toughness contribution of bamboo node to the mode I interlaminar fracture toughness of bamboo. *Wood Science And Technology*, Volumen 48, p. 1257–1268.
- Watson, L. J. & Dallwitz, M. J., 1994. *Grass Genera of the World*. Primera ed. Oxfordshire: C.A.B. International Wallingford.
- Whelan, C. J., Wenny, D. G. & Marquis, R. J., 2008. Ecosystem Services Provided by Birds. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1134(1), pp. 25-60.
- White, D. G., 2018. *Bamboo culture and utilization in Puerto Rico*. Primera ed. Londres(Inglaterra): Forgotten Books.
- Witte, D., 2019. Structural bamboo building codes: catalysts for industry, research, and construction Technology. *Technology|Architecture + Design*, 3(1), p. 50–64.
- World Habitat, 2018. *Viviendas del Hogar de Cristo, Guayaquil*. [En línea]
Available at: <https://world-habitat.org/es/premios-mundiales-del-habitat/ganadores-y-finalistas/viviendas-del-hogar-de-cristo-guayaquil/>
[Último acceso: 4 Marzo 2021].
- World-Architects, 2020. *Great (Bamboo) Wall*. [En línea]
Available at: <https://www.world-architects.com/de/kengo-kuma-and-associates-tokyo/project/great-bamboo-wall>
[Último acceso: 15 Marzo 2021].
- Wróblewska, K. B., de Oliveira, D. C., Grombone-Guaratini, M. T. & Moreno, P. R. H., 2019. Medicinal Properties of Bamboos. En: S. Perveen & A. Al-Taweel, edits. *Pharmacognosy - Medicinal Plants*. Londres: IntechOpen, p. Capítulo 8.

- Xu, M., Cui, Z., Chen, Z. & Xiang, J., 2017. Experimental study on compressive and tensile properties of a bamboo scrimber at elevated temperatures. *Construction and Building Materials*, Volumen 151, p. 732–741.
- Xu, Q. y otros, 2014. Mechanical properties of structural bamboo following immersion in water. *Engineering Structures*, Volumen 81, p. 230–239.
- Ye, F. & Fu, W., 2017. Physical and mechanical characterization of fresh bamboo for infrastructure projects. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 30(2), p. 05017004 (versión online).
- Yong, G. y otros, 2019. Identification of damage mechanisms of carbon fiber reinforced silicon carbide composites under static loading using acoustic emission monitoring. *Ceramics International*, 45(11), pp. 13847-13858.
- Yu, L. y otros, 2017. Effects of boric acid and/or borax treatments of fire resistance of bamboo filament. *Bioresources*, 12(3), pp. 5296-5307.
- Zaragoza-Hernández, I. y otros, 2015. Propiedades físico-mecánicas de una Guadua mexicana (*Guadua aculeata*). *Maderas. Ciencia y tecnología*, 17(3), pp. 505-516.

7. ANEXOS

7.1. ANEXO 1: GLOSARIO DE TÉRMINOS

- **Almacenamiento:** Acción y efecto de almacenar culmos de bambú.
- **Área de sección transversal:** En un corte transversal del culmo, área de la sección perpendicular a la dirección de las fibras y de los vasos conductores.
- **Banco de propagación:** Lugar que se utiliza para la siembra y germinación de la semilla sexual o asexual (chusquines, riendas o segmentos de tallo) del bambú.
- **Carbonizado o caramelizado:** Proceso de carbonización con temperatura y presión utilizado para modificar el color natural de las cañas de bambú, normalmente, oscureciéndolo.
- **Cepillado:** Actividad realizada para alisar o limpiar la superficie del bambú.
- **Chusquín:** Plántula pequeña que se origina dentro de un bosque de bambú a partir de yemas de rizoma o semillas germinadas. Está formado por tallos herbáceos, hojas foliares, ramas y raíces.
- **Contenido de humedad:** Contenido de agua en el interior de un cuerpo, expresado como la relación del porcentaje entre el peso del agua contenida y el peso del material anhidro.
- **Corte boca de pescado:** Corte cóncavo transversal a la caña de bambú.
- **Corte pico de flauta:** Corte transversal a la caña de bambú que no llega en ángulo recto.
- **Corte recto:** Corte plano transversal a la caña de bambú.
- **Culmo:** Eje aéreo segmentado del bambú que emerge del rizoma. El culmo consta de cuello, nudos y entrenudos. El cuello es la zona de unión entre el rizoma y el culmo; los nudos son los puntos de unión de los entrenudos; los entrenudos son las porciones de culmo comprendidas entre los nudos.
- **Curado:** Tratamiento natural que busca conservar las características y propiedades de las cañas de bambú, evitando el deterioro prematuro del material.
- **Denudado:** Proceso de retirar los tabiques o diafragmas de las cañas de bambú.
- **Descortezado:** Proceso de retirar la parte externa de la caña o latilla de bambú.
- **Desganche:** Eliminación de las ramas del tercio inferior del culmo sin causar daño al mismo.
- **Deshije:** En las plantas de bambú, procedimiento por el cual se separan manualmente o con unas tijeras desinfectadas los nuevos hijos que nacen de la planta madre.
- **Diámetro externo:** Diámetro de la sección transversal de una caña de bambú medido desde dos puntos opuestos en la superficie externa.

- **Espesor de la pared:** Grosor de la pared de una probeta de bambú.
- **Guadua madura o “hecha”:** *Guadua* de, al menos, 5 años de edad, que presenta tallo verde blanquecino, con presencia de abundantes manchas de líquenes y musgos en los entrenudos y sobre los nudos, sin que haya pubescencia sobre el culmo ni presencia de hojas caulinares en la base.
- **Hidrosoluble:** Que puede disolverse en agua.
- **Hoja caulinar:** Hoja de forma triangular y pubescente por el lado abaxial (envés). Está constituida por: vaina, lígula y lámina. Envuelve y protege el culmo de bambú durante los primeros meses de desarrollo.
- **Humedad de equilibrio:** Valor que alcanzan los cuerpos en contenido de humedad en condiciones naturales, según la temperatura, humedad relativa del sitio y durante un tiempo determinado.
- **Lata:** Sección longitudinal de una pieza del culmo con cortes definidos, que conserva o no internamente los diafragmas de los nudos y externamente la corteza.
- **Lateado:** Proceso mediante el cual se hacen cortes longitudinales paralelos en el culmo.
- **Lijar:** Pulir una superficie con un abrasivo.
- **Luz:** Espacio libre entre los soportes en el equipo utilizado para el ensayo de flexión estática.
- **Mancha:** Agrupación de culmos de bambú (habitualmente de una misma especie) que crecen cerca los unos de los otros, formando una colonia.
- **Muestra:** Probeta o espécimen destinado a ser sometido a un ensayo de laboratorio.
- **Muestreo:** Actividad de tomar muestras.
- **Muestreo aleatorio:** Muestreo consistente en la selección aleatoria de un determinado número de unidades muestrales donde todas tienen la misma probabilidad de ser elegidas.
- **Perno:** Tornillo.
- **Plántula:** Resultado de la germinación de una semilla de bambú o de una yema de rizoma.
- **Población:** En referencia al bambú, conjunto de culmos que comparten una característica común en un área determinada.
- **Postcosecha:** Etapa posterior a la cosecha, que involucra procesos de acondicionamiento y de adecuación de los culmos previos a su utilización como materia prima.
- **Probeta:** Segmento o pieza de bambú que se usa para ensayos o pruebas de laboratorio, con medidas específicas.
- **Propagación:** Proceso de reproducción. Puede ser sexual o asexual.
- **Propagación asexual o vegetativa:** Propagación a partir de partes vegetativas de la planta, como ramas, yemas, tallos y rizomas.

- **Propagación sexual:** Propagación a partir de la semilla sexual.
- **Preservación:** Acción o efecto de proteger.
- **Pubescencia:** Presencia de pelos o velloidad.
- **Renuevo:** Nuevo individuo que emerge del suelo, producto de la propagación vegetativa, y cubierto siempre de hojas caulinares.
- **Riendas:** Ramas con espinas que se desarrollan en los entrenudos bajos del culmo y que se conocen también con el nombre de ganchos.
- **Rodal:** Conjunto de culmos que pueblan un terreno diferenciándolo de los colindantes.
- **Secado:** Acción o efecto de extraer la humedad.
- **Suelo franco-arenoso:** Suelo generalmente bien drenado y cuyos constituyentes pueden variar dentro de los siguientes rangos: arcilla (del 0 al 20%), limo (del 0 al 50%) y arena (del 43 al 85%).
- **Tallo:** Eje principal de las plantas que sirve como estructura de sostén para las diferentes partes de la misma y que está unida a la raíz. En el bambú se denomina culmo.
- **Unión pernada:** Unión en la que los elementos conectores entre las piezas de bambú son uno o varios pernos metálicos roscados que atraviesan la caña de bambú. El corte de los extremos de la caña de bambú suele ser recto, boca de pescado o pico de flauta.
- **Vivero:** Espacio donde se obtienen las plántulas para después trasplantarlas al campo o a su lugar definitivo. El objetivo principal del vivero es proteger las plántulas y asegurar las mejores condiciones para su desarrollo inicial.

7.2. ANEXO 2: SIGLARIO

- **AECID:** Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
- **ANOVA:** Técnica de Análisis de Varianza
- **ARCASIA:** Consejo Regional de Arquitectos de Asia
- **AREP:** *Afrancamente Research Poles of Exchange*
- **AsIB:** Asociación Ibérica del Bambú
- **ASIPP:** *Acoustic Signal Pre-Processor*
- **ASTM:** *American Society for Testing and Materials*
- **BICU:** Universidad India y Caribeña Bluefields
- **BNC:** *Bayonet Neill-Concelman*
- **Caemba:** Casas Emergentes de Bambú
- **CASAS:** Construcciones y Arquitectura con Soluciones Alternativas Sustentables
- **CMNUCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático
- **CoG:** Centro de Gravedad
- **CONICET:** Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas
- **COP:** Conferencia de las Partes
- **COPADE:** Comercio Para el Desarrollo
- **CSIC:** Consejo Superior de Investigación Científica
- **DAGRD:** Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres
- **EA:** Emisión Acústica
- **EDU:** Empresa de Desarrollo Urbano
- **ETFE:** Etileno-TetraFluoroEtileno
- **ETSIE:** Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación
- **FAO:** Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
- **FAUBA:** Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires
- **FEADER:** Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural
- **FIDA:** Fondo Internacional de Desarrollo Agrícola
- **FRA:** Evaluación de los Recursos Forestales Mundiales
- **FSC:** *Forest Stewardship Council*
- **GaK:** *Guadua angustifolia Kunth*
- **GIZ:** Cooperación Técnica Alemana
- **GO:** Grupo Operativo

- **HPP:** *Hentrich-Petschnigg & Partner*
- **IDIE:** Investigación y Desarrollo en Ingeniería de Edificación
- **IFAPA:** Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera de Andalucía
- **INBAR:** Organización Internacional del Bambú y Ratán
- **IVUC:** Instituto de Vivienda, Urbanismo y Construcción
- **MDF:** Fibropanel de Densidad Media
- **MIO:** Masivo Integrado de Occidente
- **NSR:** Norma Sismo Resistente
- **NTC:** Norma Técnica Colombiana
- **ODM:** Objetivos de Desarrollo del Milenio
- **ODS:** Objetivos de Desarrollo Sostenible
- **OIMT:** Organización Internacional de las Maderas Tropicales
- **OMS:** Organización Mundial de la Salud
- **ONU:** Organización de las Naciones Unidas
- **PEFC:** *Programme for the Endorsement of Forest Certification*
- **PFNM:** Producto Forestal No Maderable
- **PLA:** Ácido Poliláctico
- **PLB:** *Pencil Lead Break*
- **PVC:** Cloruro de Polivinilo
- **RICS:** *Royal Institution of Chartered Surveyors*
- **RNE:** Reglamento Nacional de Edificaciones
- **SBAU:** Bienal de Arquitectura y Urbanismo de Seúl
- **SEM:** Microscopía Electrónica de Barrido
- **SENA:** Servicio Nacional de Aprendizaje
- **UE:** Unión Europea
- **UGR:** Universidad de Granada
- **UNAL:** Universidad Nacional de Colombia
- **USMP:** Universidad de San Martín de Porres
- **UTP:** Universidad Cooperativa de Colombia – Pereira
- **WAF:** *World Architecture Festival Awards*
- **ZERI:** *Zero Emissions Research and Initiatives*

7.3. ANEXO 3: SIMBOLOGÍA

- **A:** Amplitud de la señal EA.
 - **A:** Ancho de la probeta.
 - **AN:** Ancho de la probeta en el nudo.
 - **C:** Compresión.
 - **C:** Elemento de bambú almacenado en cámara climática.
 - **Dur:** Duración de la señal EA.
 - **E:** Energía de la señal EA.
 - **E:** Espesor de la probeta.
 - **EN:** Espesor de la probeta en el nudo.
 - **F:** Flexión.
 - **L:** Longitud total de la probeta.
 - **M:** Posición en la que se realizó la prueba PLB.
 - **MOR:** Módulo de rotura.
 - **N:** Probeta anudada.
 - **O:** Elemento de bambú expuesto al aire libre.
 - **S:** Sensor.
 - **T:** Tracción.
 - **UL:** Porción de ensayo.
 - **UN:** Probeta sin nudo.
 - **W:** Ancho de la probeta.
 - **x:** Ubicación de la señal EA.
-
- **A:** Área de la sección donde se aplica la carga.
 - **b:** Ancho de la probeta en el ensayo de flexión estática.
 - **CoG:** Centro de gravedad del espectro de señales EA, también llamada frecuencia centroide.
 - **E_b:** Módulo de elasticidad en flexión estática.
 - **E_c:** Módulo de elasticidad en compresión vertical paralela a las fibras.
 - **E_t:** Módulo de elasticidad en tracción vertical paralela a las fibras.
 - **f:** Frecuencia.
 - **f_b:** Resistencia a flexión estática.

- f_c : Resistencia a compresión vertical paralela a las fibras.
 - f_t : Resistencia a tracción vertical paralela a las fibras.
 - f_v : Resistencia a cortante.
 - F_{ult} : Carga máxima alcanzada durante el ensayo.
 - L : Distancia entre soportes en el ensayo de flexión estática.
 - NL : Longitud del nudo en el caso de probetas anudadas.
 - P : Carga máxima en flexión estática.
 - S : Magnitud de la FFT (Transformada Rápida de Fourier).
 - t : Espesor de la probeta.
 - W_0 : Ventana temporal designada como filtrado de las señales EA.
-

- la : Utilizado como subíndice, indica que una característica o propiedad ha sido calculada en relación al área de los puntos de aplicación de la carga.
 - ms : Utilizado como subíndice, indica que una característica o propiedad ha sido calculada en relación al área del centro geométrico de la probeta.
-

- $máx$: Utilizado como subíndice, indica el valor máximo de una característica o propiedad.
 - $mín$: Utilizado como subíndice, indica el valor mínimo de una característica o propiedad.
-

- **20**: Utilizado como subíndice, indica el valor de una propiedad o característica al 20% con respecto al valor máximo alcanzado en el ensayo.
 - **40**: Utilizado como subíndice, indica el valor de una propiedad o característica al 40% con respecto al valor máximo alcanzado en el ensayo.
-

- δ : Espesor de la pared del culmo.
- Δ : Análisis estadístico.
- ε_b : Deformaciones por flexión estática.
- ε_t : Deformaciones por tracción vertical paralela a las fibras.
- \varnothing : Diámetro de la probeta.

