

Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Occidente

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial 15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación del 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano
Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables



**Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes
claros en comunidades rurales de Jalisco**

TESIS que para obtener el **GRADO** de
MAESTRO EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presenta: **ARQ. LUCAS ALBERTO HENQUÍN**

Tutor **DR. ING. NAYAR CUITLÁHUAC GUTIÉRREZ ASTUDILLO**

Tlaquepaque, Jalisco. Julio de 2023.

Resumen

Esta investigación propone un sistema estructural capaz de satisfacer demandas espaciales de cubiertas de grandes claros, valiéndose de una especie nativa de bambú. Para ello, se tuvo en cuenta los recursos técnicos-materiales de las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco, y las iniciativas locales que buscan reducir el impacto medioambiental. Actualmente, no existen sistemas estructurales tradicionales capaces de salvar grandes claros. Esta investigación, tiene un abordaje mixto y secuencial, la primera etapa, de carácter cualitativo, está constituida por entrevistas abiertas y un registro fotográfico, orientada a determinar aspectos relevantes que favorezcan la difusión del sistema. La segunda etapa, de carácter cuantitativo, está compuesta por evaluaciones de procesos constructivos y ensayos mecánicos de especies disponibles en el territorio. Entre los resultados más relevantes, se destaca la presencia de diversas especies de bambú con aplicaciones estructurales, en especial la *Otatea acuminata*, de la que no se halló registro de su uso en estructuras como elemento principal, y que presenta un desempeño mecánico similar a otras especies de bambú ampliamente aceptadas para este uso y que, además, han demostrado tener ventajas constructivas. También se construyó un prototipo en el territorio que superó ampliamente los claros salvados por las estructuras construidas con técnicas tradicionales, tales como tejabanos cubiertos con hoja de palma. La versatilidad del sistema de arcos propuesto, se debe a las múltiples variantes estructurales a las que puede ser aplicado. La investigación concluye con la publicación de una guía de construcción del sistema que, posteriormente, fue distribuido en localidades del suroccidente de Jalisco.

Palabras clave: Estructura de Bambú, ensayo mecánico, *Otatea acuminata*, cubiertas de grandes claros, comunidad rural, Jalisco.

LGAC 3.1: Transferencias tecnológicas para el mejoramiento del hábitat. La innovación en tecnología para dispositivos, equipos y materiales.

Abstract

This research proposes a structural system capable of meeting spatial demands for large-span roofs, using a native species of bamboo. To do so, the technical-material resources of rural communities in the southwest of Jalisco, as well as local initiatives seeking to reduce environmental impact, were taken into account. Currently, there are no traditional structural systems capable of spanning large distances. This research has a mixed and sequential approach. The first stage, qualitative in nature, consists of open interviews and photographic documentation aimed at determining relevant aspects that favor the diffusion of the system. The second stage, quantitative in nature, is composed of evaluations of construction processes and mechanical tests of species available in the territory. Among the most relevant results, the presence of various species of bamboo with structural applications stands out, especially *Otatea acuminata*, for which there was no record of its use as the main element in structures, and which presents mechanical performance similar to other bamboo species widely accepted for this use and which have also demonstrated constructive advantages. A prototype was also built in the territory that far exceeded the spans saved by structures built with traditional techniques, such as palm leaf-covered roofs. The versatility of the proposed arch system is due to the multiple structural variations to which it can be applied. The research concludes with the publication of a construction guide for the system, which was subsequently distributed in localities in the southwest of Jalisco.

Keywords: Bamboo structure, mechanical test, *Otatea acuminata*, large span roofs, rural community, Jalisco

Agradecimientos

A Marcela, con quien inicié este gran proyecto sin saberlo, hace ya varios años atrás. A Laura, con quien compartí los momentos más importantes de los últimos años de mi vida. A mi familia, quienes me han llenado de cariño y afecto, además de haberme transmitido los valores que ordenan mi vida. A mi director de investigación, Dr. Nayar Gutiérrez, por el apoyo permanente a lo largo de toda la investigación y de quién he aprendido conocimiento valioso que será de gran utilidad en el futuro.

A la Dra. Mónica Solórzano y al ITESO, por creer en mí y darme la oportunidad de ser parte de esta gran institución. Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología -CONAHCYT-, por brindarme la oportunidad de llevar adelante mis estudios con dedicación plena. Al Fondo de Apoyo a la Investigación -FAI- del ITESO, que financió parte de esta investigación.

Y finalmente, a las personas de las diferentes localidades de Jalisco, que colaboraron con este proyecto y que muy amablemente compartieron sus experiencias conmigo, sin el apoyo de ellos, este proyecto no hubiera sido posible. Anhele con el corazón que este trabajo vuelva al territorio y tenga una utilidad real. A todos, mi más sincera gratitud.

Contenido

Glosario.....	8
CAPÍTULO I: Abordaje heurístico	9
1.1 Introducción	9
1.2 Justificación de la investigación.....	10
1.3 Problemática regional	13
Problema central	14
1.4 Hipótesis de trabajo	16
1.5 Preguntas de investigación	16
1.6 Objetivos de la investigación	17
Objetivo principal.....	17
Objetivos secundarios.....	17
1.7 Metodología	18
1.8 Cronograma de trabajo	19
1.9 Limitaciones.....	19
CAPÍTULO II: Sustentabilidad y Antecedentes	20
2.1 Sustentabilidad: Impacto medioambiental y socioeconómico	20
Impacto medioambiental.....	21
Especies adecuadas para la reproducción	23
Impacto socioeconómico	25
El bambú en México.....	27
2.2 Características físico-mecánicas del bambú.....	28
Anisotropía e irregularidad geométrica.....	30
Durabilidad y conservación.....	31
Complejidad de las uniones	33
Calidad de los culmos utilizados en estructuras	38
2.2 Caracterización del sistema estructural a desarrollar.....	39
¿Por qué un arco?	41
Sistema estructural de forma activa: el arco	42
Definición del término <i>grandes claros</i>	46
Experiencias con estructuras de bambú de grandes claros.....	47
CAPÍTULO III: Potencial aplicabilidad del sistema en el territorio.....	51
3.1 Introducción	51
3.2 Metodología	52
3.3 Resultados. Entrevistas y registro fotográfico	54
El Limón.....	54

Cuzalapa	61
Chiquilistlán.....	67
El Fresnito y El Rodeo.....	70
3.4 Hallazgos.....	72
Relación Comunidad - Bambú.....	72
Potencial aplicación	73
Manejo de la técnica.....	73
3.5 Conclusiones sobre la potencial adopción del “otate” para su uso en estructuras	74
CAPÍTULO IV: Ensayos de materiales y componentes del sistema estructural.....	78
Introducción.....	78
4.1 Evaluación de arcos de sección compuesta.....	79
Metodología: Nervios del arco.....	80
Resultados: Evaluación comparativa	85
Hallazgos	88
4.2 Ensayo a flexión para tres especies locales.....	90
Metodología.....	90
Resultados de ensayo para esfuerzo último a flexión	91
Hallazgos	92
4.3 Ensayo a flexión para <i>Otatea acuminata</i>	93
Metodología.....	93
Resultados.....	95
Hallazgos	95
4.4 Ensayo a compresión para <i>Otatea acuminata</i>	96
Metodología.....	96
Resultados.....	97
Hallazgos	98
4.5 Ensayo a flexión para uniones	99
Metodología.....	100
Resultados.....	101
Hallazgos	102
4.6 Conclusiones sobre el uso de “otate” en estructuras	102
CAPÍTULO V: Ejecución de un sistema estructural en el territorio	104
Introducción.....	104
5.1 Diseño del sistema estructural	105
Metodología.....	105
Resultados de modelos analógicos.....	111

Hallazgos de modelos analógicos	114
5.2 Ejecución del proyecto	115
Metodología.....	115
Resultados del proyecto ejecutado	121
Hallazgos del proyecto ejecutado.....	123
CAPÍTULO VI: Conclusión general e información de apoyo	127
6.1 Conclusiones	127
6.2 Propuesta de investigación futura	131
ANEXOS	134
Anexo 1: Tabla de entrevistas y registro fotográfico	134
Anexo 2: Fotografías del proyecto finalizado	134
Anexo 3: Guía de construcción de arcos de bambú.....	135
Anexo 4: Cartas de vinculación social	140
REFERENCIAS	148

Glosario

- *Arco de sección compuesta*: Compuesto por dos o más culmos en su sección transversal, comportándose como un único elemento estructural.
- *Basa*: En relación a su distancia al suelo, segundo segmento del tallo principal del bambú.
- *Bambú*: Grupo de plantas leñosas, pertenecientes a la subfamilia *Bambusoideae*.
- *Cepa*: En relación a su distancia al suelo, primer segmento del tallo del bambú.
- *Estructura*: conjunto de componentes interconectados entre sí, capaces de transferir fuerzas a sus apoyos.
- *Macolla*: Racimo de culmos de bambú que crecen en un área pequeña.
- *Macro túneles*: Túneles compuestos por piezas metálicas y superficies plásticas utilizados en la agricultura protegida.
- *Nervios del arco sección compuesta*: Sucesión de culmos que se unen por sus extremos y que forman una línea, que hace parte de un conjunto de nervios, con el que se conforma un arco.
- *ODS*: Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- *Sistema Estructural*: Diagrama de operaciones que realiza una estructura para lograr una transmisión de cargas de las fuerzas que actúan sobre dicha estructura, a sus apoyos.
- *Sobrebasa*: En relación a su distancia al suelo, tercer segmento del tallo del bambú.

CAPÍTULO I: Abordaje heurístico

1.1 Introducción

El propósito de este *Reporte de Investigación Aplicada* es diseñar, desarrollar, ensayar y construir un sistema estructural de bambú, adecuado a los recursos técnicos y materiales de las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco, utilizando una de las especies presente en la región. Se espera que este sistema estructural, pueda ser replicado por estas comunidades, con el fin de poner a disposición de los usuarios una alternativa plausible, capaz de atender demandas espaciales de mayor escala.

Todas las comunidades visitadas han incorporado prácticas productivas que buscan reducir el impacto medioambiental de sus ecosistemas. Es evidente el interés manifiesto de un sector de estas comunidades por promover modelos de producción y desarrollo que consideren el bienestar de los habitantes y sus ecosistemas. En este sentido, la incorporación del bambú a las plantaciones locales no solo trae beneficios relacionados al mejoramiento de suelos a partir del aporte de materia orgánica, la capacidad de retención e infiltración paulatina del agua y la generación de microclimas adecuados para plantaciones a la sombra, sino que además diversifica la siembra. Por otra parte, la alta productividad del material también lo hace más económico y le otorga una alta tasa de captura de CO₂ en comparación con otros recursos maderables (Peña & Tokatlian, 2013; Bali, 2021; Carmiol, 2009).

La aplicación del bambú a sistemas estructurales resulta oportuna, debido a las propiedades físico-mecánicas de algunas especies, así como su ligereza, fácil montaje, y la demanda de herramientas livianas que evita el uso de maquinaria especializada (Arcocha et al., 2015). Sin embargo, conlleva una serie de dificultades técnicas aún en proceso de desarrollo. Entre ellas, se menciona la inexistencia de normativas locales, manuales y estudios completos, detallados y de gran aceptación y difusión como sí existe para la aplicación de otros materiales, como la madera, el acero o el concreto.

La propuesta en cuestión, busca representar una alternativa concreta y adecuada a estas comunidades en comparación con tecnologías industrializadas. La importancia de salvar grandes claros radica en la posibilidad de aplicar estas estructuras a espacios de carácter comunitario o productivo, ofreciéndose como una posibilidad de desarrollo sustentable.

1.2 Justificación de la investigación

El estudio y desarrollo de sistemas estructurales de bambú para cubiertas de grandes claros, resulta pertinente en el contexto rural del sector suroccidental de Jalisco, debido a la carencia de alternativas tecnológicas, adecuadas a los recursos técnicos y materiales de esta comunidad, para atender demandas espaciales actualmente resueltas de manera precaria. La importancia de reducir el impacto medioambiental del sistema estructural, radica en que un sector de estas comunidades busca promover formas de desarrollo menos agresivas con los ecosistemas locales.

Las plantas conocidas localmente como “bambú” u “otate”, están presentes en la región de manera silvestre o en siembras. Muchas de estos especímenes tienen propiedades físico-mecánicas adecuadas para ser utilizados en estructuras. En las consultas realizadas a las diversas comunidades, se expresó que el principal motivo por el cual no se utiliza esta tecnología aplicada al campo edilicio, está relacionado al desconocimiento que se tiene sobre la producción, manejo y propiedades del material.

Tanto la manufactura de bambú, como el uso de sistemas estructurales basados en arcos livianos, son familiares para estas comunidades. En el caso del bambú, su principal aplicación es la confección de artesanías, como sombreros y canastos, y de manera accesoria en objetos como cercos, tutores en siembras, jaulas, utensilios o espacios precarios de uso secundario, como bodegas. En el caso de los arcos livianos, este es muy utilizado en la construcción de macro túneles para agricultura protegida, que caracteriza una parte del paisaje rural de Jalisco.

Todas las comunidades visitadas durante el desarrollo de esta investigación, cuentan con programas o iniciativas que tienden a promover procesos productivos o tecnologías menos agresivas con los ecosistemas locales.

El Limón, luego de 20 años de promoción de huertos comunitarios, se proclamó como el primer municipio agroecológico, bajo una declaración que establece la promoción de prácticas que tienden a fomentar técnicas ecológicas relacionadas al trabajo de la tierra (Comisión Colegiada y Permanente de Fomento Agropecuario, Forestal y Piscícola, 2021). En Cuzalapa, un grupo de mujeres indígenas autoorganizadas, lleva adelante la organización “Color de la Tierra”, dedicada a producir café orgánico (Color de la Tierra. Café., 2022). La Universidad Jesuita de Guadalajara en conjunto con el ayuntamiento de Chiquilistlán, buscan promover sistemas constructivos tradicionales con el fin de diversificar las técnicas constructivas locales, a través de un programa enmarcado en el Proyecto de Aplicación Profesional. En el caso de El Fresnito y El Limón, la Universidad de Guadalajara lleva adelante el programa Kuautlali (Macías Macías & Sevilla García, 2021), con ocho años de funcionamiento, que tiene el propósito de difundir técnicas agroecológicas, en un contexto de producción intensiva de aguacates y berries con severas consecuencias en la reserva de acuíferos.

Por lo expuesto, se puede afirmar que existe un sector de la comunidad regional, que manifiesta interés por formas de desarrollo de menor impacto medioambiental que las industrializadas.

La incorporación del bambú a las plantaciones locales, no solo trae beneficios relacionados al mejoramiento de suelos a partir del aporte de materia orgánica, la capacidad de retención e infiltración paulatina del agua y la generación de microclimas adecuados para plantaciones a la sombra, sino que además diversifica la siembra. Por otro lado, la velocidad de crecimiento del material lo hace económico y le otorga una alta tasa de captura de CO₂ en comparación con otros recursos maderables.

Resulta relevante comprender el contexto económico de las comunidades rurales en Jalisco. Desde una perspectiva histórica el crecimiento de la producción agrícola se centra en empresas cada vez más eficientes, que logran estándares de productividad con los que los pequeños y medianos productores no pueden competir (Grammont, 2010). Además, el sector de la agricultura emplea a más de la mitad del personal de manera transitoria (IIEG - Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco, 2021) y los subsidios oficiales recibidos entre el 2006 y el 2012 se concentran en más del 60% en los grandes productores (Núñez Olivera et al., 2020).

Este fenómeno de concentración de la riqueza, obliga a los pequeños y medianos productores a diversificar la fuente de trabajo, ya que los ingresos generados por actividades agropecuarias son cada vez más escasos (Grammont, 2010). Por ello, la producción de bambú se presenta como una oportunidad de manufactura de diversos tipos de productos. La Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) señala que, Estados Unidos importa productos derivados del bambú por un valor de 336 millones de dólares, lo que representa una apuesta de desarrollo a mediano y largo plazo.

Por último, resulta oportuno señalar el compromiso asumido por México en su búsqueda por alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sustentable (ODS) planteados por la ONU, por lo que el desarrollo de investigaciones que buscan ampliar los conocimientos de materiales con beneficios medioambientales resulta de interés. El último reporte presentado por las Naciones Unidas, señala la necesidad urgente y concreta de implementación de medidas de mitigación y adaptación al cambio climático. El Acuerdo de París plantea el límite de calentamiento global en 1.5° C°, y afirma que el mundo está muy lejos de cumplir con este objetivo. Si bien, las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), producidas por países desarrollados han disminuido 6.5% entre el año 2000 y el 2018, las emisiones de los países en vía de desarrollo han aumentado 43.2% entre los años 2000 y 2013, fenómeno relacionado a una mayor industrialización y al aumento de la producción económica en estos países (ONU, 2020).

De acuerdo con la Organización Internacional del Bambú y Ratón – (INBAR, 2015)-, la planta de bambú, al igual que el resto de las especies, almacenan carbono. En términos comparativos, el bambú almacena una cantidad similar de carbono que los árboles. Sin embargo, el bambú tiene un crecimiento tan acelerado que puede alcanzar 25 tC/ha anual; si este es cosechado con regularidad puede alcanzar valores de entre 200 y 400 tC/ha anual, valor superior a gran parte de las especies arbóreas maderables.

1.3 Problemática regional

Causas del problema central

Durante las entrevistas realizadas, se manifestó un desconocimiento acerca del uso del bambú en estructuras, que les permitiría aprovechar los recursos que actualmente poseen en el territorio para satisfacer demandas edilicias propias. Además, una parte de los entrevistados afirmó que existe una creencia de que los materiales industrializados poseen mejores condiciones de durabilidad y calidad.

Tampoco se registró programas de promoción y difusión del uso del bambú en sistemas estructurales de grandes claros, o manuales de construcción ampliamente aceptados o convalidados entre los constructores de la región.

Como se mencionó, un sector de esta comunidad busca formas de desarrollo que disminuyan el impacto medioambiental de los ecosistemas locales y que, al mismo tiempo, se adecúe a los recursos materiales propios. El uso del concreto o el acero en grandes estructuras, implica la contratación de mano de obra especializada y equipos, en algunos casos sofisticados, tales como mezcladoras, soldadoras o el montaje de cimbras, además del uso de otros materiales como agua, arena, piedras y aditivos, así como el transporte desde los centros de distribución hasta el lugar de ejecución del proyecto. De acuerdo con el Catálogo general de precios unitarios 2021 de la CONAGUA, el valor del metro cúbico de Concreto varía entre \$2200 y \$2500 (hecho en obra, incluye: suministro de materiales, acarreos, colocación, vibrado, curado con agua, mano de obra, equipo y

herramienta), mientras que los valores del acero fluctúan entre \$42 y \$45 por Kg (Acero de refuerzo diferentes diámetros, incluye: materiales, acarreos, elevaciones, cortes, traslapes, desperdicios, habilitado, amarres, mano de obra, equipo y herramienta) ninguno incluye (CONAGUA, 2021).

De acuerdo con lo señalado por una parte de las personas entrevistadas, los costos implicados en la ejecución de cubiertas de grandes claros, son sencillamente inviables para gran parte de la población. En relación a la propuesta de promover sistemas estructurales alternativos a los industrializados, Rodolfo Gonzales, campesino y líder social de la localidad de El Limón afirma:

"Puedo asegurar que se suman muchos albañiles, jornaleros, chalanos a este tema, a aprenderlo (técnica del bambú) (...) todos están con esta misma problemática, de que los precios son muy caros para construir, no pueden hacer una casa porque todo está caro, porque el cemento está caro, porque el acero está por las nubes, entonces, a ellos les caería de lujo una alternativa constructiva. Sin dudas, lo puedo asegurar"

Como se mencionó, existe una tendencia entre medianos y pequeños productores a diversificar la fuente de ingreso económico, a través de un fenómeno denominado "pluriactividad" (Grammont, 2010) y que viene dado por procesos de tecnificación creciente de la agricultura por parte de grandes empresas productoras.

Problema central

Existe una carencia de alternativas de sistemas estructurales no industrializados, aplicable a cubiertas de grandes claros, que considere los recursos técnicos y materiales de las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco, así como su impacto medioambiental.

Consecuencias del problema central

Esta situación compromete el desarrollo social y económico de aquellos sectores de la comunidad rural más vulnerables, ya que esta demanda espacial se resuelve de manera precaria o simplemente no se atiende, postergando las necesidades de estas comunidades. Aquel sector de la población para el que resulta difícil acceder a un crédito financiero, ve imposibilitada la realización de proyectos que atiendan las necesidades propias.

Como se menciona en las entrevistas expuestas en el CAPÍTULO III, existe una creencia de que los materiales industrializados poseen mejores prestaciones que los materiales no industrializados, por lo que se desestima el uso de este tipo de materiales, que representan una oportunidad de diversificación de técnicas constructivas que ofrezcan otras ventajas.

La huella de carbono de algunos materiales como el acero, el concreto o la madera son susceptibles de ser reducidas a través de la sustitución por recursos como el bambú que, con un adecuado manejo, logran tasas de captura de carbono superior a la de la mayor parte de las especies maderables, incluso aquellas de crecimiento rápido. Un estudio apoyado por el INBAR, comparó el bambú *Phyllostachys*, con otras especies arbóreas de rápido crecimiento y reveló que el bambú acumula valores similares, sin embargo, si se considera la tasa de crecimiento y la productividad anual, este almacena más del 41% que el pino y el 21% del eucalipto (Torres et al., 2019, p. 392). Se han realizado experimentos similares en China, donde se compara la capacidad de almacenaje de carbono en relación a las especies maderables de rápido crecimiento, obteniéndose resultados competentes (Yiping et al., 2010). Debe considerarse que, a diferencia de las especies arbóreas, el bambú se regenera a partir de los rizomas bajo tierra, por lo que no necesita ser sembrado durante largos períodos, que en algunos casos alcanzan el siglo.

Por último, la producción de materiales industrializados es un negocio que concentra la riqueza en pocas empresas que tienen el oligopolio de estos materiales de construcción. La producción local de bambú, representa una oportunidad de crecimiento económico para pobladores locales. Una investigación desarrollada por la UNAM acerca de las cementeras de México señala que

la estructura de mercado, en la que opera la industria del cemento, se puede considerar como un oligopolio ya que impera un producto homogéneo y las empresas son interdependientes para fijar la producción o los precios. La industria del cemento todavía se encuentra altamente concentrada en un grupo de seis empresas que aún hoy dominan el mercado nacional: Cemex, Grupo Cementos de Chihuahua, Cemento Moctezuma, Holcim-Apasco, Cruz Azul y Cementos Fortaleza. (Vásquez & Corrales, 2016)

1.4 Hipótesis de trabajo

Es posible construir un sistema estructural de bambú, capaz de salvar grandes claros, considerando los recursos técnicos y materiales locales, por lo que las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco, dispondrán de un sistema adecuado sus posibilidades, que pueda atender necesidades espaciales que requieran grandes superficies.

1.5 Preguntas de investigación

- 1- ¿Cuáles son las especies de bambú presentes en el territorio, que pueden ser utilizadas en el sistema estructural a desarrollar?
- 2- ¿Cuáles son las características específicas que debe incorporar la propuesta, para favorecer la difusión del sistema estructural en estas comunidades?
- 3- ¿Cuál es la geometría y configuración idónea del sistema estructural, para salvar grandes claros teniendo en cuenta los materiales disponibles?
- 4- ¿Cuál es el desempeño mecánico de los componentes más relevantes del sistema estructural, y de la especie adoptada?
- 5- ¿Cuán superior es la capacidad de salvar claros del sistema propuesto en relación a los sistemas habitualmente utilizados en estas comunidades?

1.6 Objetivos de la investigación

Objetivo principal

Proponer un sistema estructural para cubiertas de grandes claros, utilizando materiales presentes en el territorio y que, además, tenga en cuenta los recursos técnicos y demandas medioambientales de las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco.

Objetivos secundarios

- 1- Realizar una revisión documental de literatura relacionada a la idoneidad medioambiental de esta familia de plantas, sus características físico-mecánicas y de aspectos relevantes del sistema estructural al que se aplicará:

Este objetivo, con el fin de conocer la pertinencia medioambiental de este material, sus propiedades físico-mecánicas y detalles constructivos avalados por la normativa vigente, que sirvan de referencia para la ejecución del sistema.
- 2- Detectar aquellas características constructivas que favorezcan la difusión de la propuesta e incorporarlas al diseño del sistema estructural:

Para ello, se realizarán entrevistas de actores clave, que puedan señalar aspectos relevantes que deban ser tenidos en cuenta durante la etapa de diseño, así como el registro de estructuras existentes que puedan ser utilizadas como referencia.
- 3- Buscar y detectar aquellas especies presentes en el territorio, con potencial aplicabilidad al sistema estructural a desarrollar:

A través de un registro fotográfico, y de ser posible, la identificación de las especies que permitan considerarlas como potenciales alternativas.
- 4- Dilucidar la relación que estas comunidades tienen con la planta, así como vacancias de espacios en los que se podría aplicar esta tecnología:

Que se realizará durante las entrevistas.

- 5- Evaluar cuál de las especies disponibles en el territorio resulta más adecuada para utilizar en la propuesta:

Para lo que se realizará una comparación del proceso constructivo de dos prototipos, teniendo en cuenta los aspectos determinados en el objetivo secundario N°2.

- 6- Determinar cuál es el desempeño mecánico de la especie seleccionada, teniendo en cuenta el sistema estructural en el que se utilizará:

Es objetivo se alcanzará a través de ensayos mecánicos, que garanticen la idoneidad de la especie adoptada.

- 7- Construir un sistema estructural de grandes claros en el territorio:

Que permita dilucidar aquellos aspectos relevantes del proceso constructivo y del sistema estructural en sí, que puedan ser mejorados en la propuesta final.

- 8- Elaborar una guía básica, pero suficiente, para la ejecución del sistema estructural desarrollado:

Que favorezca la difusión del sistema, considerando por lo menos dos alternativas tipológicas, una lineal y otra central, que puedan ser aplicadas a diferentes usos. Estas propuestas tipológicas tendrán información general que oriente al constructor a tomar decisiones ajustadas a sus necesidades.

1.7 Metodología

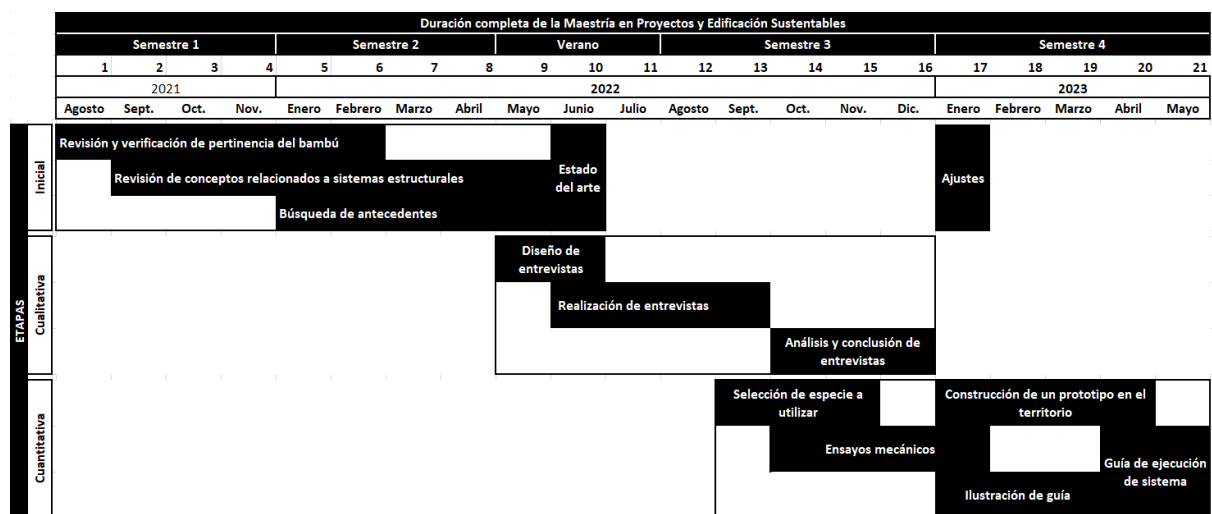
El procedimiento metodológico de esta investigación es mixto y secuencial. Se establecieron dos etapas principales: la primera de carácter cualitativo, que tiene por objetivo establecer las variables que sirvieron como directrices para el diseño del sistema, así como determinar aquellas especies de potencial aplicabilidad; y una segunda etapa es de carácter cuantitativo, que está centrada en el diseño, desarrollo y ensayo del sistema estructural en sí. Cada una de las

metodologías aplicadas, se encuentran desarrolladas en detalle en su respectivo capítulo, con el propósito de simplificar la comprensión.

1.8 Cronograma de trabajo

A continuación, se presenta el cronograma general de trabajo en el que se expone la duración de cada actividad llevada a cabo a lo largo de toda la investigación.

Tabla 1 Cronograma de trabajo



1.9 Limitaciones

Este trabajo de investigación no busca realizar una identificación exhaustiva de especies de bambú en el territorio, ni determinar su geolocalización precisa. El esfuerzo se centró en identificar aquellas especies de bambú disponibles en el campo de trabajo, que posean propiedades favorables para su utilización en sistemas estructurales.

El diseño del sistema estructural busca determinar aquellas especies adecuadas para su uso, evaluar alternativas en los procesos constructivos y la configuración general de los nervios y culmos que lo constituyen, dejando de lado componentes no menos importantes, pero que resultan accesorios para el propósito general de este trabajo, como las cimentaciones, sus anclajes, la cubierta en sí y la envolvente perimetral de los potenciales espacios a construir.

En el mismo sentido, se señala que las uniones evaluadas durante el proceso de desarrollo de esta investigación, fueron adoptadas de diferentes normativas existentes, referente al diseño de estructuras de bambú. Un abordaje de estos componentes del sistema estructural requiere estudios específicos. Por otro lado, la propuesta final no tiene aplicaciones específicas de uso. Se propone un sistema que puede ser aplicado a cubiertas livianas destinadas a múltiples propósitos.

Finalmente, se señala que el sistema estructural propuesto se considera susceptible de ser mejorado. En las comunidades visitadas, existen artesanos que trabajan este material hace generaciones, sus aportes resultarían de gran utilidad.

CAPÍTULO II: Sustentabilidad y Antecedentes

2.1 Sustentabilidad: Impacto medioambiental y socioeconómico

La implementación del bambú a sistemas estructurales resulta de gran interés ya que presenta ventajas medioambientales en relación con otros tipos de tecnologías, como la madera o el acero, usualmente utilizados en estructuras que buscan salvar grandes claros.

Las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco, actualmente, llevan adelante diferentes modelos de desarrollo que buscan reducir el impacto medioambiental generado por las actividades productivas. El Limón es el primer municipio agroecológico de Jalisco, desde el ayuntamiento, se fomentan programas agroecológicos con el fin de difundir técnicas de trabajo de la tierra menos agresivas con su entorno inmediato (Red intercontinental de promoción de la economía social solidaria, 2022). Actualmente, autoridades municipales y campesinos operan en el marco de una declaratoria que establece el carácter ecológico del trabajo de la tierra (Comisión Colegiada y Permanente de Fomento Agropecuario, Forestal y Piscícola, 2021). La organización “Color de la tierra. Café”, ubicada en Cuzalapa, está constituida por mujeres indígenas que comercializan café orgánico, evitando los intermediarios que condicionen los precios de venta (Color de la Tierra. Café., 2022). La Universidad Jesuita de Guadalajara, a través del Programa de Aplicación Profesional -PAP-

busca promover técnicas tradicionales de construcción en la localidad de Chiquilistlán. El proyecto Kuautlali (2021), llevado adelante por la Universidad de Guadalajara -UDG- promueve técnicas agroecológicas de hortalizas en un trabajo conjunto entre investigadores, alumnos y productores locales en las localidades de El Rodeo y Zapotlán el Grande.

La mayor parte de estas iniciativas llevan años funcionando y buscan afianzar modelos alternativos de producción. Por este motivo, resulta pertinente la exploración, definición y difusión de un sistema estructural, basado en recursos disponibles en el territorio que, además de poseer cualidades atractivas en términos medioambientales, favorece la ejecución de cubiertas que pueden ser utilizadas para cubrir demandas sociales y económicas de estas comunidades.

Impacto medioambiental

El bambú pertenece a la familia de la poáceas o gramíneas, es decir, es un tipo de grama. Su altura varía desde solo algunos centímetros hasta especies que pueden alcanzar los 30 o 40 metros, con tallos de hasta 30 centímetros de diámetros. Se tienen registradas más de 1500 especies, de las cuales, la mayoría son bambúes leñosos y el resto herbáceo (Dransfield et al., 2016; Clarck et al., 2015).

Es diverso y adaptable a diferentes climas, alturas y sustratos. La distribución natural abarca una franja tropical y subtropical de entre 46° latitud norte y 47° latitud sur y puede ser encontrado en África, Asia y en América. Los únicos continentes que no poseen esta planta de manera nativa son Europa y la Antártida (Peña & Tokatlian, 2013). La versatilidad de esta planta de adaptarse a diferentes climas, temperaturas y altitudes, representa una oportunidad de explotación de sus aptitudes como material con múltiples aplicaciones, entre los cuáles resulta particularmente interesante el de la edificación.

Su característica más atractiva, está relacionada con la velocidad con la que crece. El bambú es una planta tres veces más rápida que las especies arbóreas utilizadas para la producción de madera (Peña & Tokatlian, 2013). Esta característica le otorga dos ventajas fundamentales sobre sus

competidores: tienen una alta tasa de captura de dióxido de carbono y logran altos niveles de productividad, lo que además favorece precios asequibles.

La velocidad a la que se desarrolla afecta su desempeño productivo, según la especie y el manejo, puede ser cosechado hasta dos veces por año, después de la primera cosecha, la que se da en un lapso de 2 a 5 años, para alcanzar una productividad 4 a 5 veces mayor a la de muchas especies maderables utilizadas en el mercado. Con un manejo adecuado que impida su floración, puede ser producido por más de un siglo con la misma planta (Peña & Tokatlian, 2013).

Entre los servicios ecosistémicos más relevantes, se señala su capacidad de protección a cuencas y taludes en situación de riesgo, ya que su extenso sistema de rizomas cohesiona el sustrato, lo que evita procesos erosivos y el deslizamiento del terreno. También mejoran la calidad del sustrato, ya que producen una gran cantidad de hojarasca, que se acumula sobre el suelo y forma una capa de materia orgánica que aporta hidrógeno, carbono y otros nutrientes al suelo, lo que hace que sea más fértil. El bambú, contribuye a la regulación del agua en ecosistemas, ya que almacenan agua en sus culmos y rizomas, la que retorna progresivamente a su entorno, esto favorece la generación de un microambiente húmedo y de procesos de filtración de agua en el sustrato (Bali, 2021; Carmiol, 2009).

Las características físico-mecánicas de sus culmos lo distinguen como un material con potencial utilización no solo en productos para construcción, sino también como piezas portantes, es decir, puede ser utilizado en estructuras (Arcocha et al., 2015), característica que resulta especialmente interesante en comunidades de alta vulnerabilidad.

El bambú es un recurso mediante el cual los países pueden combatir los efectos negativos del calentamiento global, ya que contribuye directamente con el ODS 13 -Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático-. Este es un recurso que almacena carbono a gran escala, por lo que las plantaciones de bambú bien manejadas tienen la capacidad de capturar el carbono a una tasa mayor que ciertas especies arbóreas (Fonseca-González & Rojas Vargas, 2016). De acuerdo con una investigación del INBAR (2015), esta cifra es de casi 13 toneladas de carbono por hectárea por

año. Los productos de bambú tienen una huella de carbono baja o incluso negativa en su ciclo de vida.

El bambú tiene un amplio rango de usos en productos de diversos tipos, tales como madera contrachapada laminada, mobiliario, utensilios, cercos, combustible, artesanías, instrumentos musicales, papeles, textiles, alimentos y bebidas. También es aplicable a la edificación, con numerosas experiencias en construcciones tales como casas, puentes, interiorismo y elementos como muros, cubiertas, pisos, paneles divisorios y en estructuras (Rodríguez Romo, 2006; Ordoñez Candelaria, 1999).

El bambú es un material naturalmente liviano y no requiere maquinaria especializada para trabajarlo, por lo que resulta más fácil de procesar que muchas de las maderas lo que, en términos de fuerza física necesaria para trabajar estas piezas, pone en igualdad de condiciones a las mujeres agricultoras que, en el caso de América Latina y el Caribe, no supera el 35% de la mano de obra rural y en el caso de México está por debajo del 16% de trabajadores de la tierra (CEPAL, 2021).

Esta planta representa una fuente de energía asequible y limpia (ODS 7), ya que es un recurso de biomasa de relevancia mundial. De acuerdo con el INBAR (2022), puede ser utilizada directamente como leña o convertirse en gas para la generación de energía térmica y eléctrica. Se estima que el 38% de la población mundial depende de biomasa sólida para cocinar. Esta planta, de rápido crecimiento, no requiere volver a sembrarse y recupera su follaje rápidamente, por lo que genera un suministro continuo de biomasa, lo que aminora las presiones antropogénicas sobre los bosques.

Especies adecuadas para la reproducción

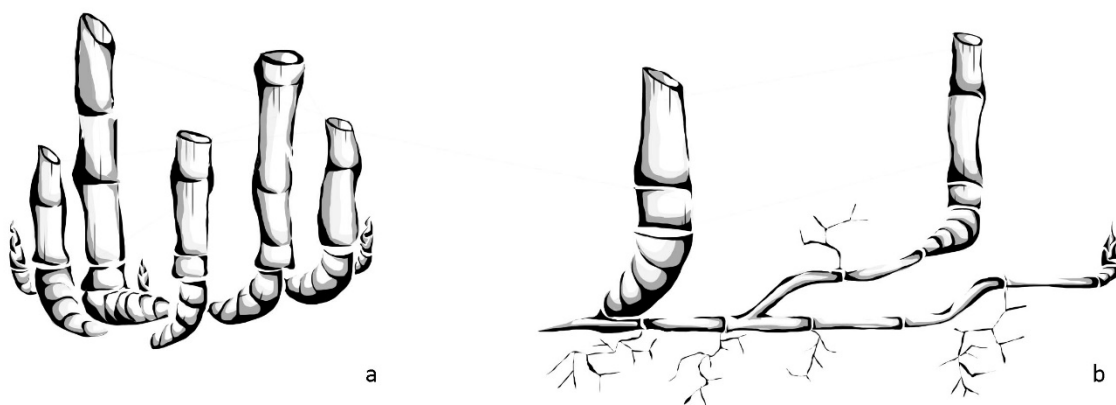
El manejo adecuado de estas plantaciones requiere de una correcta selección de especies ya que algunas pueden representar una amenaza para los ecosistemas locales y su biodiversidad.

El cuerpo vegetativo del bambú se divide en dos partes, la porción subterránea y la aérea. En cuanto a sus raíces, los brotes de esta planta se desarrollan en un denso y robusto sistema de

rizomas de los cuales se pueden distinguir dos categorías principales, los monopodiales, consideradas especies invasoras y los simpodiales. Los rizomas monopodiales poseen la característica de crecer horizontalmente a gran velocidad, y pueden generar a cada yema un culmo (tallo exterior) o un nuevo trayecto de la red rizomal. Este tipo crecimiento suele darse en zonas templadas. Los rizomas simpodiales son más cortos y gruesos, los culmos en la superficie crecen próximos unos a otros en forma compacta y se propagan de manera circular de manera definida, dependiendo de cada especie. Estos son usuales en zonas tropicales y no son considerados invasoras ya que crecen de manera compacta (Peña & Tokatlian, 2013).

Resulta conveniente un sistema de raíces compacto ya que incrementa la productividad en la superficie destinada a la plantación, reduciendo la presión antropogénica sobre bosques nativos. En este sentido, el sistema de rizomas, dependiendo de la forma en que crecen y la distancia entre los nudos, se dividen en leptomorfos –propio de sistemas monopodiales–, que presentan entrenudos largos, paquimorfos –asociado a sistemas simpodiales–, con entrenudos más cortos y gruesos y anfimorfos, que resultan de la combinación de ambos. El caso de las guaduas, especies utilizadas para su aplicación a estructuras, presentan rizomas paquimorfos, sin embargo, algunas resultan más compactas que otras (Bali, 2021).

Figura 1. Tipos de sistemas de rizomas.



Nota. a- Sistema simpodial y b- Sistema monopodial.

La parte aérea, está constituida por culmos, ramas laterales, follaje e inflorescencias, esta última en caso de encontrarse en fase de reproducción sexual. Los culmos, es decir, el tallo principal

del bambú, es la parte que se utiliza en estructuras y edificaciones, siendo relevante para su desempeño mecánico, el diámetro y los espesores de las paredes. Este es compuesto por nudos, que son sólidos y entre nudos, que son huecos o sólidos dependiendo de la especie.

Impacto socioeconómico

Desde una perspectiva histórica Grammont (2010), señala que el crecimiento de la producción agrícola se ha centrado en empresas cada vez más eficientes, con altos estándares de productividad. Este modelo tiende a polarizar, ya que se excluye aquellas unidades productivas incapaces de competir con el mercado global, es decir, la concentración de la producción del sector agropecuario se ubica en las cadenas productivas de alto rendimiento.

De acuerdo con una reciente ficha informativa emitida por el Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco -IIEG- (2022), los empleos generados por el sector de la agricultura, ganadería, silvicultura y pesca ocupan el primer puesto, por sobre los sectores del comercio, la construcción y otras ramas. Sin embargo, la misma entidad, señala que dentro de los subsectores que conforman el sector primario, la agricultura emplea a más de la mitad de las personas de manera eventual (2021).

La Revista Mexicana de Agronegocios (Núñez Olivera et al., 2020), presentó un estudio del sector agropecuario en el estado de Jalisco, en el que se halló que los productores señalan como principal problemática, la carencia de recursos económicos, ciclo tras ciclo, relacionados a insumos para la preparación del predio. Otro fenómeno es el de la incertidumbre en el precio de los alimentos cosechados, donde las ganancias del productor son las que tienden a reducirse. Por último, se indica que los porcentajes de apoyos y subsidios oficiales recibidos en el período 2006 – 2012 son del 12% para pequeños productores; 28% para medianos productores, y 60% para grandes productores, lo que tiende a consolidar este modelo inequitativo de producción de la tierra.

Este fenómeno de concentración de la riqueza, promueve la pluriactividad campesina, es decir, aquellas actividades realizadas fuera del predio productivo. Esta no solo se ha incrementado entre los campesinos, sino que, además, los ingresos provenientes de actividades agropecuarias han disminuido en relación a los provenientes de las no agropecuarias. En otras palabras, los campesinos subsisten diversificando sus actividades laborales. (Grammont, 2010)

En la región suroccidental de Jalisco, existen varias especies de bambú, entre las más utilizadas se pueden señalar las conocidas localmente como “otate” y “bambú”, que hacen referencia a la *Otatea acuminata*, *Guadua angustifolia*, *Bambusa bambos*, *Bambusa oldhamii*, entre otras especies, muchas de ellas son utilizadas con fines estructurales debido a su favorable desempeño físico-mecánico. Por lo general, estas son extraídas de plantas silvestres próximas a las localidades o de algunos especímenes presentes en el casco urbano, por aquellos miembros de la comunidad que las necesiten para un uso específico. En general, se desconocen tratamientos que garanticen su vida útil prolongada, así como las técnicas para un correcto manejo de las plantaciones.

La escasa demanda del material en ciudades próximas, resulta problemática para su reproducción ya que no existen estimulantes que la dinamicen, y esto trae como consecuencia el desinterés de los productores por implicarse en este tipo de plantaciones. Según comerciantes de bambú en la ciudad de Guadalajara, estas son utilizadas de manera decorativa, dejando de lado la enorme cantidad de aplicaciones que tiene.

Sin embargo, la Organización para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020) señala en su reporte de evaluación de recursos forestales globales, que el área ocupada por esta planta, creció casi el 50% entre el año 1990 y el 2020, y alcanzó una superficie de 35 millones de hectáreas en el mundo. En este contexto, Asia es la gran productora, con casi 25 millones de hectáreas seguida por Suramérica, África, Norteamérica y América Central. De las importaciones globales de productos derivados del bambú, el 23% fueron realizadas por Estados Unidos, por un valor de 336 millones de

dólares. Esto deja en evidencia la importancia de este material en el continente oriental, principalmente India y China, pero también el incremento en la producción y consumo del material en el continente americano, lo que mejora las perspectivas de rentabilidad a mediano y largo plazo.

El bambú en México

A principio del siglo XXI, se registraron 35 especies de bambúes leñosos en el país y en los últimos años, ese número alcanzó las 52 especies registradas, de las cuales 34 son especies endémicas, es decir, que crecen exclusivamente en este territorio. Hasta el momento, solo los estados de Baja California, Baja California Sur, Coahuila y Tlaxcala no cuentan con al menos alguna especie de bambú (Ruiz Sánchez, 2019).

El bambú ha sido utilizado como material para edificaciones desde mucho tiempo atrás, asentamientos anteriores a las culturas mesoamericanas ya lo utilizaban con múltiples propósitos y posteriormente también fue utilizado por algunos pueblos mesoamericanos. Durante la época de la conquista española, los europeos consideraron el material como de inferior calidad, por lo que su aplicación quedó relegada a las culturas originarias, quienes aún lo utilizan (Cedeño Valdiviezo & Irigoyen Castillo, 2011).

Actualmente el bambú se siembra en varios estados de México, su producción ha aumentado considerablemente las últimas décadas, sin embargo, una investigación llevada a delante en Puebla concluye que, el material es poco redituable debido a la ausencia de un mercado que estimule dicha producción (Aguirre Cadena y otros, 2018). Esto plantea un problema que podría ser recurrente en el contexto mexicano, lo que sugiere abordar la producción de esta planta, tomando este aspecto como parte del proceso productivo.

Otra investigación llevada a cabo en el mismo sitio, revela que la crisis cafetera que atraviesan los productores de la Sierra Nororiental de Puebla, ha obligado a diversificar sus cultivos, por lo que se han incorporado sistemas agroforestales con el fin de paliar la situación económica, de esta forma se producen múltiples *productos* comercializables procedente de un único sistema

agroforestal. Si bien la mayor parte de los agricultores utilizan el bambú como cerco vivo o con el fin de darle sombra al cafetal, “la mayoría de los productores manifiesta interés en ampliar sus cultivos de bambú debido a su valor económico y la protección al cafetal”. La producción de bambú ha crecido en un 60% entre 1990 y 2009. (Pérez García y otros, 2009).

Son ocho los géneros de bambúes leñosos mexicanos, *Arthrostylidium*, *Aulonemia* y *Merostachys*, con una sola especie, *Rhipidoclaum*, con cuatro especies, *Olmeca*, con cinco especies, *Guadua* con siete especies, *Otatea*, con once especies y *Chusquea* con veintidós especies. De ellas, la *Guadua aculeata*, llamada carrizo o caña brava, es la especie de mayor tamaño y llega a crecer hasta 20 m de altura y 18 cm de diámetro (Ruiz Sánchez, 2019).

Los bambúes leñosos se encuentran presentes en más de la mitad del territorio mexicano. Los estados con mayor diversidad de bambú son Chiapas, Veracruz, Oaxaca, Guerrero, Jalisco y Nayarit (Aguirre Cadena y otros, 2018).

2.2 Características físico-mecánicas del bambú

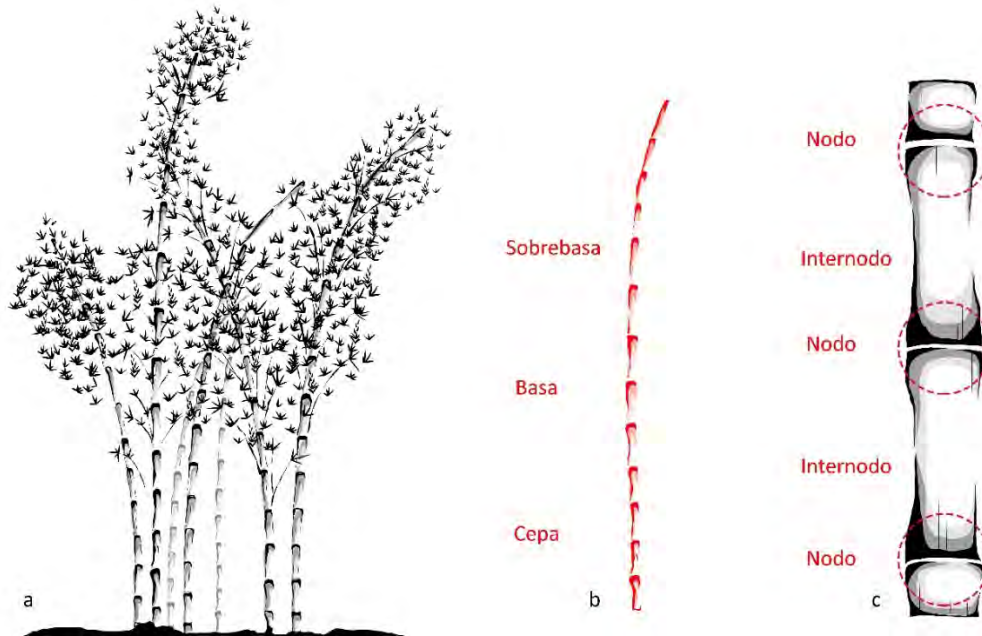
Los elementos lineales en estructuras de bambú son usualmente ejecutados con lo que se conoce como culmo, que es el tallo principal de la planta. Este posee diferentes características que condicionan su aplicación, entre las cuales se señala el carácter lineal de su geometría, la presencia de nodos con distancias irregulares entre sí, cuya presencia le otorga mayor estabilidad y rigidez al culmo y que salvo esos, el resto de la planta es hueca.

Debido a su conicidad, el culmo es subdividido en tres partes con el fin de agrupar segmentos con diferentes características. La *cepa* es el primer segmento basal de culmo de guadua, con longitudes que varían dependiendo de la especie. Este segmento suele presentar mayor diámetro y mayor espesor de paredes. La *basa* es el segundo segmento del culmo, se ubica entre la cepa y la *sobrebasa*, que es el tercer segmento del culmo y el que menor diámetro posee en comparación con los dos segmentos anteriores.

Esta última característica depende de la especie, la *Otatea acuminata*, un tipo de bambú que crece naturalmente en México, y que se caracteriza por tener una sección sólida en todo su

desarrollo. En este sentido, resulta oportuno señalar que las propiedades físico-mecánicas y algunas características fisonómicas del bambú, se alteran en mayor o menor medida de acuerdo a la especie, el tiempo de maduración y el lugar donde crece.

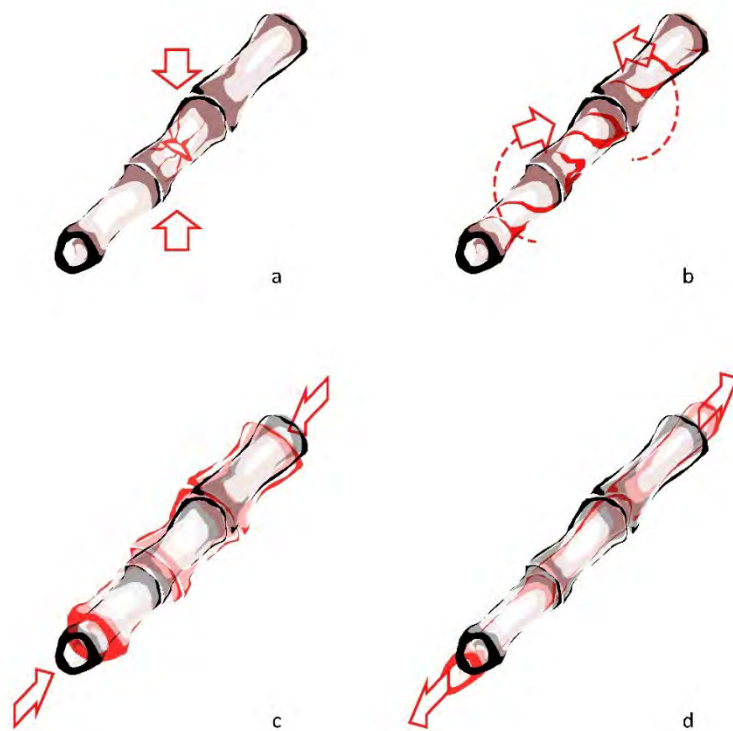
Figura 2. Partes de la planta de bambú.



Nota. a- Macolla de bambú. b- Culmo. c- Nodos en internodos.

Su sección anular es la responsable de que su módulo de torsión sea igual en cualquier sentido, es decir, mecánicamente, tiene la misma respuesta para esfuerzos que tiendan a retorcerlo sobre su eje axial. También posee un buen desempeño físico-mecánico para esfuerzos de tracción y compresión, y una baja resistencia a esfuerzos de cortantes y de compresión perpendicular (Lic. Peña y otros, 2015, pág. 177).

Figura 3. Comportamiento del culmo sometido a diferentes esfuerzos.



Nota. a- Culmo sometido a esfuerzos cortantes o compresión perpendicular, b- a esfuerzos de torsión, c- a esfuerzo de compresión y d- a esfuerzos de tracción.

Anisotropía e irregularidad geométrica

El bambú es un material anisótropo, es decir, posee propiedades que varían a lo largo de cada pieza, esto implica que se expande y contrae de manera desigual considerando las direcciones longitudinal, radial y tangencial. Otro condicionante de esta propiedad es que su desempeño mecánico resulta irregular a lo largo de cada elemento, lo que implica que, cuando se busca curvar un culmo con el fin de transformarlo en un arco, la pieza tiende a tener diferentes radios de giro a lo largo de su eje axial, que representa un problema si se busca alcanzar una geometría regular y precisa.

Además, cada culmo presenta irregularidades en su geometría general, su diámetro, el espesor de las paredes y la distancia entre sus nudos cambia a lo largo de la pieza, lo que implica que su manufactura requiera conocimiento previo y de habilidades para resolver problemas de

ensambles, que garanticen la correcta transferencia de esfuerzos entre componentes. En este sentido, vale señalar que el conocimiento que algunas comunidades tienen sobre el bambú es clave. La normativa internacional ISO 22156 (2021), dedicada a estructuras de bambú, menciona que la experiencia de generaciones previas puede ser considerada como una norma informal, no necesariamente codificada por estándares internacionales.

Durabilidad y conservación

En lo que respecta a su durabilidad y conservación, se deben tomar en cuenta dos aspectos fundamentales para evitar el ataque de insectos u hongos. El primero está relacionado al momento de la cosecha y el método de preservación del material y el segundo a los criterios de diseño implementados, que tiendan a proteger el material:

- 1- Durante la cosecha, se deben seleccionar culmos en buen estado, descartando aquellos en el que se detecte la presencia de animales o insectos que hayan dañado el culmo, afectando capacidad físico-química de la pieza. Esta se debe realizar en el momento inmediatamente posterior a la luna llena (cuarto menguante). Luego, se da inicio al proceso de secado y su posterior conservación, para lo cual existen diferentes tipos de técnicas, tales como la preservación por inmersión, por calor, por ahumado, por lodo, por agua de mar, por inyección, por presión, por avinagrado, entre otras (Minke, 2016; NEC, 2016).

Hidalgo (Bamboo. The gift of the gods, 2003, págs. 148-153), dedica un apartado específico para los tratamientos químicos realizados al bambú. Entre los cuales separa aquellos tratamientos conocidos como temporales, que tienen el propósito de ser preventivos y aquellos tratamientos a largo plazo, entre los que realiza una distinción entre bambú seco y húmedo. Aquí se exponen aquellos tratamientos para culmos secos, con un contenido menor al 12%, de acuerdo a lo expuesto en la normativa consultada (ISO, 2021) más adecuados para culmos enteros.

Con el propósito de sintetizar la información presentada, sólo se considerará un tratamiento frecuente en México y Sudamérica, utilizando como referencia la Norma Técnica Ecuatoriana (NEC, 2016), que establece la siguiente secuencia de actividades para culmos de *Guadua angustifolia kunth*:

- Perforación longitudinal de diafragmas interiores de los culmos utilizando una varilla de acero de 12 mm de diámetro (1/2") a 16 mm de diámetro (5/8").
- Lavado exterior de culmo, con el propósito de no contaminar el líquido preservante. Se deben utilizar líquidos no abrasivos que eviten deteriorar la epidermis¹ del culmo.
- Se introducen los culmos a un tanque de preservación, donde previamente se colocó líquido preservante, usualmente bórax y ácido bórico, de acuerdo con las instrucciones de fabricante. La normativa sugiere que cada 96 lts de agua, se utilice 2 Kg de cada uno de los químicos, y que estos sean diluidos en recipientes de 5 galones a una temperatura de entre 50°C y 80°C.
- La inmersión debe ser realizada de forma que el extremo superior del culmo quede sobre la superficie para que las burbujas de aire se desplacen en el sentido de las fibras.
- Luego, se deben dejar un mínimo de 5 días en condiciones de temperatura ambiente o 6 horas aplicando una temperatura de entre 60°C y 80°C, para luego extraerlos y secarlos.
- Posterior extracción, son dispuestos de manera inclinada con la cepa hacia arriba, para escurrir el exceso de líquido preservante, antes de ser trasladado al sitio final de secado.
- Para que los culmos tengan una capacidad de absorción de preservante, el contenido de humedad, debe ser del 30%.

¹ Membrana exterior constituida por una capa de células desprovistas de clorofila, que impide la deshidratación del culmo.

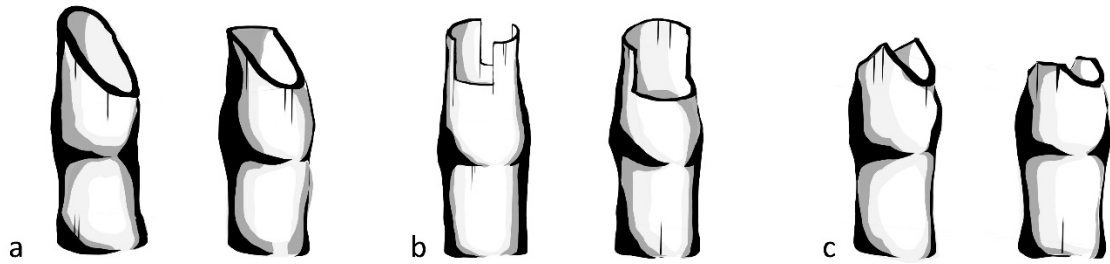
2- El segundo aspecto está relacionado con la protección de los elementos que componen la estructura ante la acción de los agentes climáticos. El bambú es un material poroso e higroscópico por lo que si la humedad se acumula en su interior, esta afectará sus propiedades físico-mecánicas (NEC, 2016). La radiación ultravioleta también altera el desempeño portante del material, comprometiendo su durabilidad y estabilidad a largo plazo. Lo más adecuado es contemplar este aspecto durante el proceso de diseño, incorporando estrategias que garanticen el resguardo a través de voladizos perimetrales que impidan la radiación solar directa, así como el contacto con el agua durante las precipitaciones. También se debe tener en cuenta implementación de apoyos que despeguen la estructura del suelo, de modo tal de separarlo de la humedad proveniente de este (Bárceñas Pazos et al., 2002). Se establece una altura mínima de 20 cm sobre nivel de suelo acabado, con el fin de salvaguardar el culmo de la humedad (NEC, 2016, p. 50).

Complejidad de las uniones

Las uniones en estructuras de bambú son uno de los aspectos más complejos a resolver, su ejecución requiere de conocimientos previos ya que, si la pieza es manipulada de manera inadecuada, se expone a fracturas, comprometiendo directamente su desempeño físico-mecánico del conjunto. Debido a la gran variedad y complejidad de uniones, este apartado aborda aspectos generales, que son relativos al sistema propuesto.

Existe una variedad acotada de formas en las que se puede cortar un culmo, con las que, posteriormente, se fabrican las uniones. A continuación, se exponen las más comunes (NEC, 2016; Bárceñas Pazos et al., 2002)

Figura 4. Cortes frecuentes en el uso del bambú.

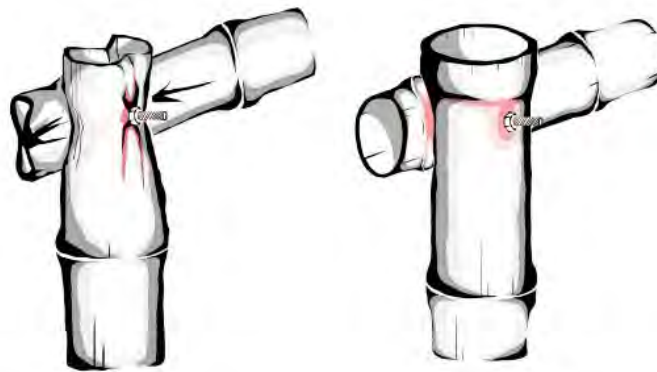


Nota. Este tipo de cortes toman como referencia aquellas especies en las que los internodos son huecos. También se pueden encontrar pequeñas variaciones o combinaciones de los cortes aquí presentados. a- Corte a bisel y pico de flauta, b- Corte recto con dos orejas y con una oreja y c- boca de pescado.

Parte de la complejidad radica en que el bambú es un elemento de sección circular no regular, hueco y con nodos a distancias variables. Estas “deformaciones” hacen de cada unión una pieza única que, aunque se repite la misma lógica de diseño de la conexión, requiere de habilidad para garantizar su correcto ensamble.

Debido a que los nodos del bambú poseen mejor resistencia a los esfuerzos cortantes, las uniones deben ser resueltas próximos a estos (**Figura 5**), lo que representa un problema frecuente en la construcción de estructuras con elementos de dimensiones estandarizadas, ya que no siempre es posible garantizar que los culmos de idéntica dimensión, inicien y terminen con nodos. Cuando la unión es resuelta en un extremo sin nodo, esta tiende a ser aplastada.

Figura 5. Comportamiento del culmo bajo carga en internodo y nodo.



Nota. Las uniones resueltas en el internodo tienden a aplastarse. Estas deben ser resueltas en el nodo.

La complejidad con la que se resuelvan las uniones también resulta problemática en determinados contextos, ya que en muchos de los lugares donde estas se realizan, no existen equipos sofisticados o mano de obra especializada. Por lo que, para alcanzar los objetivos de esta investigación, los diseños simples y prácticos tienen un valor agregado.

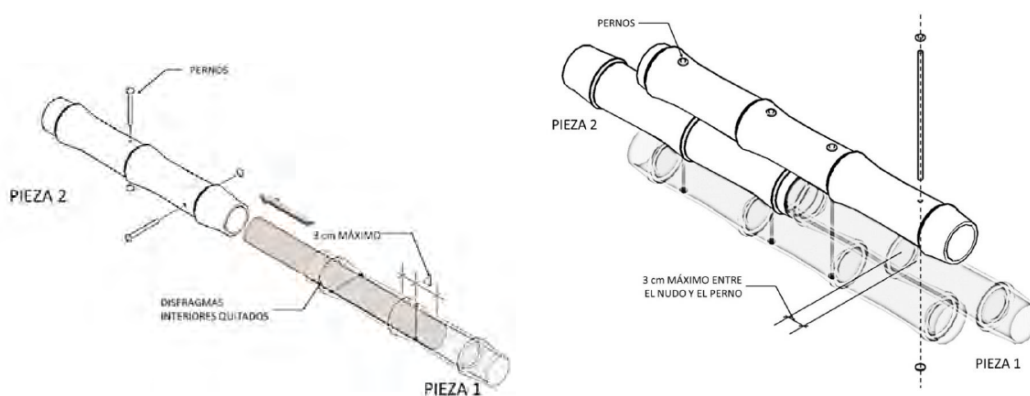
Existe variedad de uniones que pueden ser clasificadas de acuerdo a su geometría, sus componentes o la forma en que transfieren cargas. En este trabajo, se tienen en cuenta aquellas que resulten oportunas para la configuración de arcos de sección compuesta. Son dos los tipos de uniones que fueron consideradas:

- 1- Uniones longitudinales: Aquellas que conectan los culmos por sus extremos.

La Normativa Ecuatoriana de la Construcción (2016) dedicada a la construcción con Guadua y Norma Técnica E100 de Perú (2012), establece tres tipos de conexiones longitudinales, de los cuales dos resultan pertinentes para esta investigación, ya que se evita el uso de elementos metálicos que complejicen la manufactura e incrementen los precios.

El primero es utilizando una pieza de madera al interior de los culmos que se conectan, y utilizar dos conectores de 9 mm como mínimo, aplicado perpendicularmente entre sí. El segundo caso requiere de dos culmos paralelos, uno ubicado en la parte superior y otro en la inferior. En ambos casos los pernos deben estar a un máximo de 30 mm de los nudos.

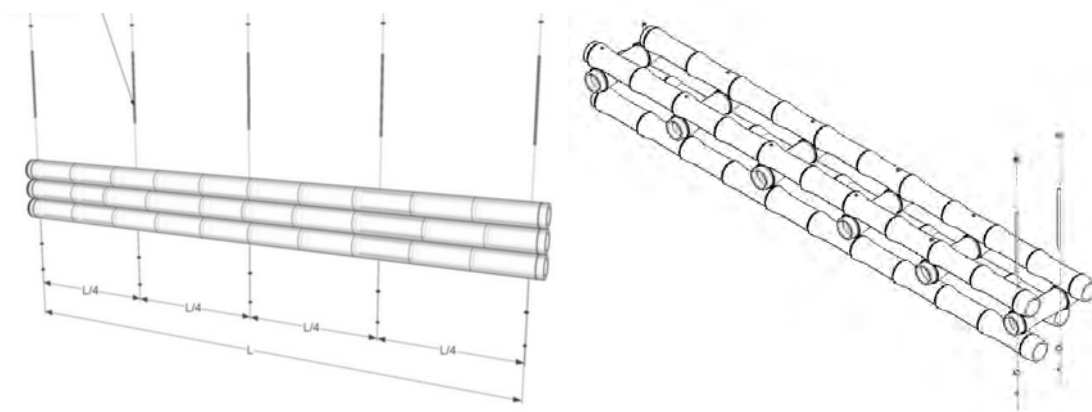
Figura 6. Conexiones longitudinales. Normativa NEC.



Nota. Unión resuelta con pieza central de madera y unión resuelta con dos culmos. Existe una variante compuesta por barras de acero, esta fue desconsiderada por su costo e impacto medioambiental. Adoptado de Normativa Técnica Ecuatoriana (NEC, 2016, p. 58 y 59)

La misma normativa señala que, para el caso de vigas compuestas, estas deben estar unidas con zunchos o con pernos espaciados como mínimo, un cuarto de la luz de la viga. Además, deben estar atravesados por conectores y los internodos estar rellenos con mortero de cemento, evitando el aplastamiento por compresión perpendicular. Las uniones deben estar traslapadas entre sí, es decir, que los puntos donde se interrumpe los culmos estén alternados unos con otros.

Figura 7. Tipologías de vigas compuestas.

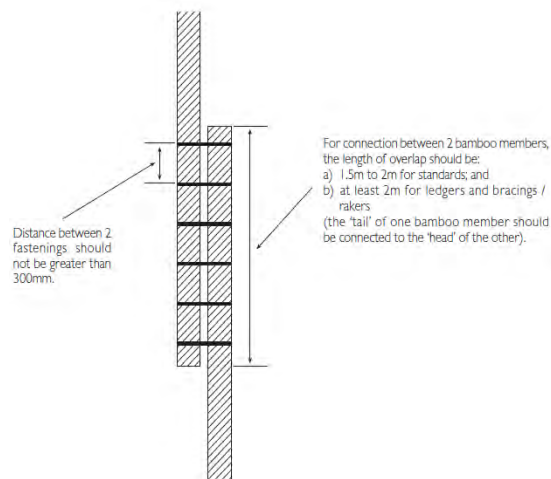


Nota. Resueltas con conectores verticales. Se debe considerar que cada internodo debe estar relleno con mortero de cemento. Adoptado de Normativa Técnica Ecuatoriana (NEC, 2016, p. 66) y Normativa Técnica E100 Peruana (E100, 2012, pág. 11).

- 2- Unión zunchada: Aquella que vincula tangencialmente los elementos que constituyen la sección compuesta del arco.

El Código de seguridad para andamios de bambú (2017), señala que, para conectar dos culmos de manera tangencial, estos deben superponerse entre 1.50 a 2.00 m para elementos estándar y de al menos 2.00 m para refuerzos y puntales, indicando que la basa del culmo debe estar conectada con la cepa de la siguiente pieza (**Figura 8**). Además, la distancia entre los zunchos debe ser de máximo 30 mm.

Figura 8. Unión apropiada para dos culmos de bambú en andamios



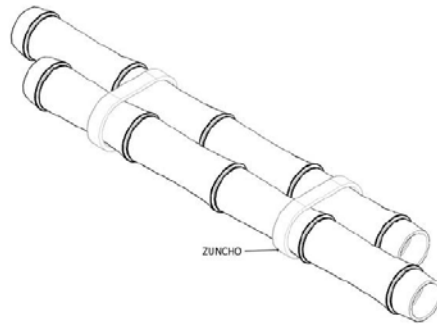
Nota. Las dimensiones expuestas no deben ser escaladas. (Labour Department, 2017, pág. 43)

El manual aprueba el uso de nylon de al menos 6 mm de diámetro y de un largo de 2 m, para una tensión máxima de 50 kgf, con una tasa de elongación menor al 20%. La cuerda debe ser tratada para no perder capacidad portante con el paso del tiempo. También puede utilizarse cuerdas de bambú con este propósito, señalando que estas cuerdas deben tener entre 0.5 y 1 mm de espesor y de 5 a 7 m de ancho.

Otros autores sostienen que el material que compone el zunchos puede ser plástico, metal, caucho, fibras vegetales, entre otros. En el caso de aquellos compuestos por materiales orgánicos, pueden ser realizadas de tiras de bambú, palma, ratán, lianas o cualquier material flexible y resistente. La ventaja de este tipo de uniones es que, al igual que los culmos, son materiales que pueden ser obtenidos de la misma plantación, no obstante, debe considerarse el ataque de agentes biológicos. Algunos de estos materiales, como el caso del ratán, requieren mano de obra especializada. Se recomienda que el amarre esté verde o húmedo con el fin de que cuando se seque se contraiga y le otorguen mayor firmeza a la unión. (Bárceñas Pazos et al., 2002).

La función del zunchos es que los elementos que componen el arco trabajen de manera conjunta, por lo que el zunchos en sí, no está encargado de transferir esfuerzos, sino de mantener juntas las piezas de modo de distribuir las cargas a lo largo de todo el arco.

Figura 9. Unión con zunchos para culmos paralelos



Adoptado de Normativa Técnica Ecuatoriana (NEC, 2016, p. 58 y 59)

Calidad de los culmos utilizados en estructuras

Para garantizar la calidad del material, se utilizan los estándares presentados en lo indicado en las normativas referentes (E100, 2012; ISO, 2021; NEC, 2016) que establece que los culmos que serán utilizados durante la ejecución, deben cumplir una serie de requisitos indispensables de calidad, para garantizar su máximo desempeño mecánico:

- El culmo debe estar seco. El contenido de agua debe ser igual o inferior a la humedad del sitio donde se ejecute la obra, por ello, las piezas de bambú con las que se realice la estructura, deben estar al menos 15 días en obra antes de ser utilizadas.
- Se debe cumplir con los procesos de cosecha y preservación adecuados.
- Índice de deformación: Los culmos no deben presentar una deformación mayor al 0.33% (E100, 2012, pág. 34).
- Índice de conicidad: La conicidad de los culmos (disminución de su diámetro entre la cepa y sobrebasa) debe permanecer dentro de cierto rango. Este porcentaje es igual a la diferencia entre el diámetro menor y el superior dividido por la longitud del culmo y queda definida por Ecuación 1:

$$\%con = ((\varnothing_{max} - \varnothing_{min})/L) * 100$$

Donde la conicidad máxima admisible para la cepa es de 0.17, para la basa de 0.33 y para sobrebasa de 0.50.

- El culmo es un material que tiende a agrietarse longitudinalmente. Estas grietas deben estar contenidas entre nudos. Tampoco deben presentar rotura por aplastamiento en ningún segmento.
- Los culmos no deben presentar perforaciones causadas por insectos o aves. Tampoco se admiten culmos con algún segmento en estado de pudrición.

2.2 Caracterización del sistema estructural a desarrollar

Cuando nos referimos a sistema estructural, nos referimos al diagrama de operaciones que realiza una estructura para lograr una transmisión de cargas de las fuerzas que actúan sobre dicha estructura, a sus apoyos. “Se puede definir un *Sistema Estructural* como la unión estable de elementos diseñados para que funcionen como una unidad que soporta y transmite al terreno las cargas correspondientes, de una forma segura y sin exceder la resistencia de cada uno de los elementos” (Ching & Zuberbuhler, 2014, pág. 2). Por extensión, la estructura puede ser entendida como el conjunto de componentes interconectados entre sí, capaces de transferir fuerzas a sus apoyos, independientemente de la lógica o modo con la que las cargas sean transferidas.

Mientras que la estructura hace referencia a los elementos que componen el conjunto, el concepto de sistema estructural se centra a la forma en que esos elementos transfieren las cargas. Distinguir estas nociones resulta fundamental para tomar decisiones que favorezcan un desempeño adecuado en relación a su capacidad portante. Esta investigación, centra su desarrollo en el primer concepto: *Sistema estructural*, excluyendo del centro del análisis el funcionamiento de cada uno de sus componentes, como por ejemplo las uniones que no pertenezcan al sistema en sí, los apoyos, la cubierta, el cerramiento, así como la función y características específicas del espacio al que se destine dicho sistema.

De acuerdo con Engel (2003), en la naturaleza se pueden observar cuatro mecanismos tipificables a través de los cuales los sistemas estructurales transfieren las cargas. Estas agrupaciones se denominan familias de sistemas estructurales (Engel, 2003; Silver et al., 2014), y facilitan la interpretación de los parámetros que intervienen sobre la lógica de comportamiento de cada

esqueleto con el fin de optimizar la eficiencia estructural. Estas familias son clasificadas del siguiente modo:

- De vector activo.
- De sección activa.
- De superficie activa.
- De forma activa.

Sintéticamente, las estructuras de *vector activo* subdividen las fuerzas actuantes en vectores, se transfieren las cargas a través de una serie de componentes rígidos, cortos y rectos interconectados entre sí. Las fuerzas son subdivididas de forma unidireccional, es decir, a tracción o compresión. El ejemplo más usual es el de la cercha, como es el caso de los puentes para trenes o las mallas espaciales.

Las estructuras de *sección activa* basan sus propiedades en la sección de los componentes rígidos individuales, tales como vigas y columnas. En este caso, la transmisión de cargas se realiza a través de la movilización de fuerzas seccionales, las fuerzas son confinadas por la acción de la sección transversal de cada elemento. Estas estructuras son las más usuales en los edificios, usualmente compuesto por un sistema de columnas, vigas, pórticos y losas.

Las estructuras de *superficie activa* son sistemas de superficies expuestas a esfuerzos de tracción, compresión y cortantes, en la que la transmisión de carga se efectúa a través de sus superficies y la geometría que estas adoptan. Esta familia comprende las estructuras de láminas y láminas plegadas.

El sistema estructural desarrollado pertenece a la familia de *forma activa*. Este tipo de sistemas está compuesto por elementos flexibles y no rígidos, en la que la transmisión de cargas se lleva a cabo a través de su geometría. Estas adquieren una forma estable cuando entra en carga. Ejemplos clásicos son las estructuras neumáticas, de cables, de tiendas y de arcos. Sus componentes se hallan sujetos a tensión axial, ya sea de compresión o tracción-(Engel, 2003).

¿Por qué un arco?

Se evaluaron diferentes alternativas tipológicas de sistemas estructurales aptas para grandes claros, que sean compatibles con las especies de bambú disponibles en el campo de trabajo, así como con los recursos económicos y técnicos de este contexto. El arco resulta de particular interés para el desarrollo de la propuesta debido a:

- Los culmos que componen una macolla presentan curvaturas diferentes entre sí, solo un reducido porcentaje de estas piezas crecen de manera “recta”, por lo general, los productores de bambú tienen especial cuidado con este aspecto con el fin de maximizar sus producciones. En Jalisco y Colima existe una cantidad limitada de productores, por lo que resulta una ventaja contemplar la posibilidad de utilizar plantas silvestres, más propensas a presentar culmos curvos.
- La flexibilidad natural de este material, sugiere que aquellos arcos o partes de arcos que presenten curvaturas diferentes a las del promedio, pueden ser adecuadas forzándolas a través de métodos relativamente simples.
- Las uniones utilizadas en estructuras de *vector activo*, como por ejemplo las cerchas, presentan conexiones más complejas, ya que cada extremo de culmo debe ser cortado según una técnica específica, relleno con concreto, pernada y, en algunos casos, zunchado. Otra alternativa es desarrollar conexiones metálicas que sustituyan estas uniones, sin embargo, estas implican un incremento en el costo, un impacto medioambiental mayor y demandan conocimientos específicos de la herrería. Ambas alternativas resultan desventajosas para un sistema que pretende la simpleza y economía. En este sentido, las conexiones del arco resultan convenientes. De acuerdo con la Normativa de Construcción Ecuatoriana (2016) y a lo señalado en el apartado *Complejidad de las uniones*, se parecen culmos sin cortes específicos, que resultan conexiones simples y económicas.
- No existe una presencia abundante de bambú en Jalisco, por lo que otras alternativas tipológicas como las de *superficie activa*, por ejemplo, el tejido, resultan menos favorables si

el objetivo es difundir un sistema estructural, ya que las comunidades no contarán con suficiente material para resolverlas. En este sentido, la economía del material resulta una ventaja.

- El arco resulta simple de ejecutar en relación a otros sistemas. Simple, porque existe un amplio estudio de conexiones para vigas de sección compuesta fácilmente reproducibles, ya que no requieren habilidades en el manejo de cierras ni ensambles. También se dispone de un número considerable de alternativas de configuración de culmos en la normativa existente.
- El arco resulta versátil, porque el arco puede ser aplicado a diferentes tipologías estructurales. En este trabajo se estudian las estructuras de forma activa, teniendo en cuenta los conceptos de *doble curvatura* y *diagrid*, que favorece el uso de arcos en grandes claros, sin embargo, el arco puede ser reproducido de múltiples formas como, por ejemplo, los arcos utilizados en macro-túneles e invernaderos existentes en la región por lo que los agricultores y las comunidades locales, están familiarizados con este sistema estructural.

Sistema estructural de forma activa: el arco

Una vez identificado el sistema estructural más apropiado para la aplicación del bambú a sistemas estructurales capaces de salvar grandes claros teniendo en cuenta los recursos económicos, sociales y técnicos del contexto, cabe preguntarse acerca de la familia de curvas más adecuadas para conformar los arcos.

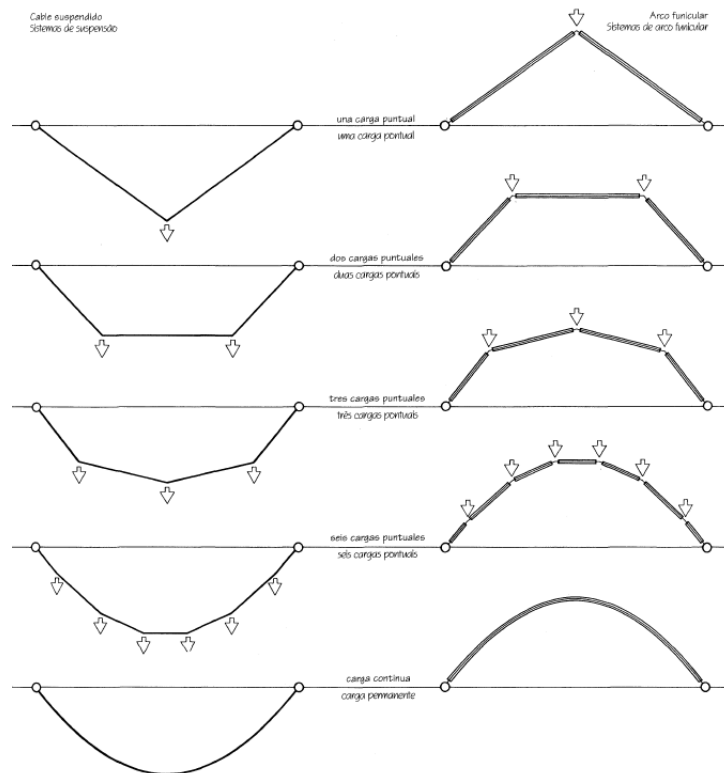
Dentro de las múltiples formas que puede adoptar un arco, la catenaria se presenta como una alternativa ventajosa, esta familia de curvas resulta de particular interés debido a algunas propiedades específicas. Fernández (2020), explica el uso de este grupo de curvas a lo largo de la historia, incluyendo su influencia en la arquitectura de Antoni Gaudí, en ella se define el concepto de *catenaria* de la siguiente manera:

Supongamos un elemento lineal con masa equidistribuida a lo largo de su longitud (por ejemplo, cuerdas, cables o cadenas), y sostengamos dicho elemento lineal solo por sus dos extremos. Como cualquier otro cuerpo, al verse sometido a la fuerza de la gravedad este adopta la forma de una curva concreta. En la literatura científica esta curva se ha denominado catenaria, nombre proveniente del latín catena (cadena). En sentido estricto, no es una curva, sino una familia de curvas, cada una de las cuales está determinada por las coordenadas de sus extremos y por su longitud. (Fernández Jiménez, 2020)

Las similitudes establecidas entre los arcos y los cables invertidos, están en el mismo origen de la teoría de los arcos. Ya en la década de 1670, Robert Hooke respondió a la pregunta de ¿Cuál es la forma ideal de un arco? Con la siguiente afirmación: “Del mismo modo que cuelga un hilo flexible, así pero invertido, se sostendrá el arco rígido” (Huerta, 2004)

El arco funicular puede ser considerado un cable portante invertido, solo absorbe compresiones de la misma magnitud en la que el cable portante absorbe esfuerzos de tracción. La geometría natural que adopta un arco que sólo ha de soportar su peso propio es, por ello, la catenaria invertida. La **Figura 10** ilustra el cambio de geometría adoptada por un cable en relación con el peso que carga.

Figura 10. *Relación entre geometría catenaria y funicular.*

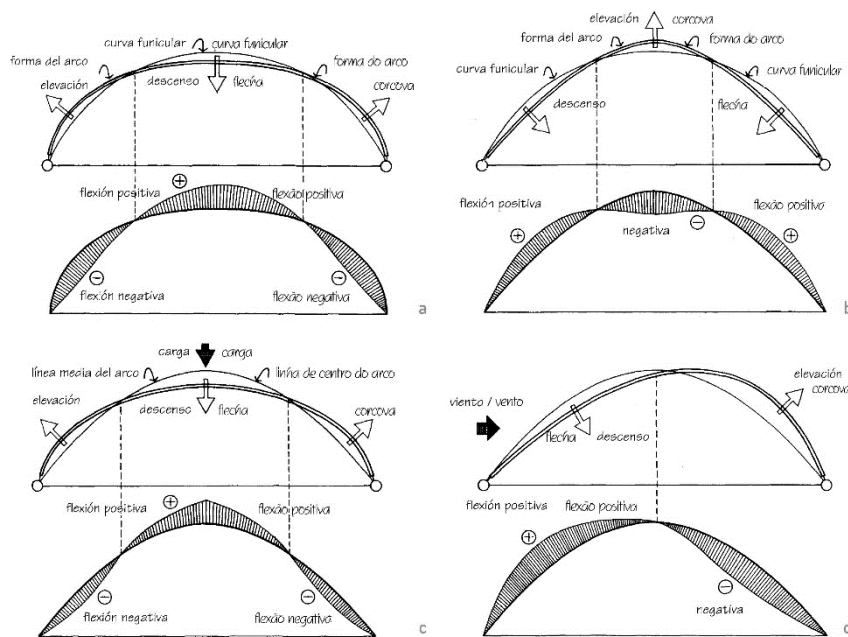


Nota. Cable portante expuesto a diferentes cargas (columna izquierda). Arco funicular expuesto a las mismas cargas (columna derecha). La geometría adoptada por ambos elementos es la misma pero invertida. Adoptado de (Engel, 2003, pág. 115).

Francis Ching (2014) define así al arco funicular como aquel cuya forma se adapta al recorrido eficiente de las cargas. Por ello, no se puede asignar una única forma funicular, sino que depende de las condiciones de carga, el largo del arco y la distancia entre sus apoyos.

Por esto, se puede afirmar que un arco funicular soporta esfuerzos de compresión, con lo que se reducen los esfuerzos a flexión en el elemento. No obstante, existen condiciones externas que alteran la geometría del arco y con ello la transmisión de cargas. La geometría de un arco funicular dado puede variar influenciado por diferentes factores como, por ejemplo, diferencia de altura entre sus apoyos producida por asentamientos, dilatación o contracción del material debido a cambios de temperatura o fuerzas que lo desestabilicen, como el viento o la actividad sísmica. Si la línea media del arco de la curva funicular se desplaza o si aparecen cargas nuevas, se presentan esfuerzos de flexión.

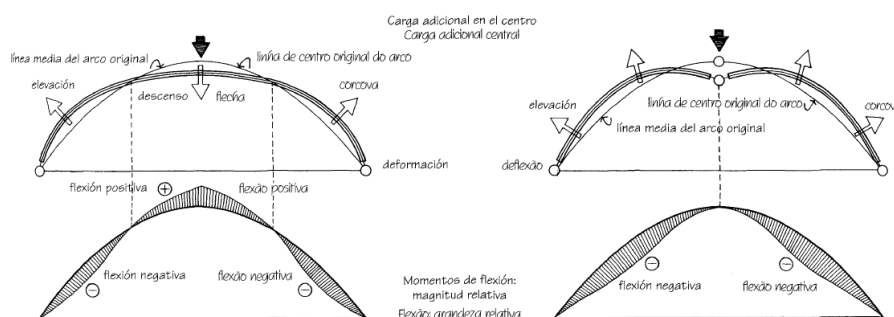
Figura 11. Desplazamiento de la línea media del arco.



Nota. Diagrama de momento flector: Por desplazamiento de línea media (a y b). Por incremento de cargas (c y d). Adoptado de (Engel, 2003, pág. 116).

Los tipos de apoyos y articulaciones dentro de sistemas estructurales son otro factor que altera el comportamiento mecánico de estos elementos, debido a que alteran la forma en que los esfuerzos son transmitidos entre las piezas que lo componen. La **Figura 12** presenta diagramas de momento flector para arcos biarticulados y triarticulados.

Figura 12. Arcos biarticulados y triarticulados



Nota. Diagrama de momento flector: Dos apoyos articulados (izquierda). Dos apoyos articulados más unión articulada (derecha). Adoptado de (Engel, 2003, pág. 117).

Los arcos biarticulados están diseñados como estructuras continuas, con dos articulaciones en sus apoyos. Las articulaciones evitan que se generen grandes esfuerzos de flexión, permiten que el arco rote ligeramente como una unidad cuando entra en carga, y que se flexione mínimamente cuando se dilate o contraiga por cambios de temperatura. Generalmente poseen un mayor diámetro en la clave. Por su parte, los arcos triarticulados están compuestos por dos secciones rígidas articuladas entre sí y articulados por su base. Estos son más susceptibles de generar esfuerzos de flexión debido a su movilidad (Ching & Zuberbuhler, 2014).

El mismo autor señala que, los apoyos del arco, es decir, aquellos componentes de la estructura encargados de recibir los extremos de cada arco y de transferir su carga al suelo, genera un empuje lateral mayor, en la medida en que su flecha sea menor, debido a que el ángulo con el que la carga incide sobre cada apoyo.

Definición del término *grandes claros*

De acuerdo con Francis Ching (2014), no existe una definición específica para determinar qué se entiende por estructura de grandes claros, por lo que el autor determina una luz salvada por el sistema superior a los 18 m. En este caso, el concepto se centra en la capacidad de una estructura de superar una distancia dada, sin embargo, en el marco de esta investigación, resulta oportuno establecer una relación entre el espesor del sistema estructural y el claro salvado, de modo tal que sea posible trabajar con modelos a escala que, sin desarrollar prototipos que aspiren a salvar espacios de más de 18 m, se pueda estudiar su comportamiento convenientemente y asegurar su factibilidad constructiva.

Otra ventaja de esta propuesta conceptual para el término “grandes claros”, es que el sistema estructural desarrollado puede ser usado en espacios de diferentes tamaños, haciendo el modelo más versátil. Por ejemplo, un claro de 4.00 m podría considerarse ordinario, sin embargo, si el espesor del sistema estructural que salva ese claro es mínimo en relación al claro salvado, se

deduce que el sistema puede ser aplicado a espacios de mayores dimensiones, ya que tiene un mejor desempeño en comparación con tecnologías similares.

Para determinar la relación espesor del sistema estructural - claro salvado, se propone utilizar de referencia ideal la proporción de un huevo de gallina criolla. En el estado de Michoacán, se realizó un estudio con el fin de determinar la calidad de los huevos de gallinas criollas, para lo cual se recolectaron más de 380 huevos de diferentes municipios. De estas muestras, se registraron diferentes datos tales como dimensiones generales, peso, coloración y se establecieron algunos indicadores (Juárez Caratachea y otros, 2010).

De acuerdo con el estudio, el promedio indicado para el diámetro transversal, -dimensión que interesa por sobre la longitudinal, ya que un huevo tiene mejor desempeño mecánico dispuesto en este sentido- es de 4.2 cm, mientras que el espesor promedio de la cáscara es de 0.28 mm.

Si se divide diámetro transversal de huevo por el espesor de la cáscara, hallamos que el sistema ideal salva 150 veces su espesor. Por lo que se puede afirmar que, para un huevo promedio de Michoacán, la relación entre el espesor de la cáscara y la distancia que cubre es de 1:150.

Si tomamos como referencia las estructuras de madera cubiertas con hojas de palma usualmente construidas en estas comunidades, determinamos que, para un claro de 5 m, se requiere un tronco con un diámetro mínimo de 20 cm. Si realizamos la misma operación, hallaremos que la relación entre el claro salvado y el espesor del sistema estructural es de 1:25.

En consecuencia, se espera que el desempeño mínimo del sistema estructural a desarrollar, sea de por lo menos el doble de estas estructuras, es decir, una relación mínima de 1:50

Experiencias con estructuras de bambú de grandes claros

Este apartado no tiene el propósito de realizar una mención exhaustiva de referentes de la construcción con bambú, ni de sus proyectos, en su lugar, resulta más provechoso revisar experiencias ejecutadas en México y Colombia, que resultan pertinentes debido a la similitud

geométrica del sistema estructural en sí, de sus componentes y del contexto de intervención de cada propuesta.

La *estructura espacial de bambú para la UNAM* (Rodríguez Cuevas & Rocha Gasparri , 2012)., centró sus esfuerzos en comprender el funcionamiento de una superficie funicular constituida por elementos de “Bambú Madake” (*Philostachys Bambusoide*). El domo se constituye de cuatro capas de nervios de bambú, de 5 cm de diámetro, con paredes de cinco milímetros de espesor, interconectados con pernos de acero. Próximo a los pernos, se ubicaron abrazaderas metálicas, con el objetivo de confinar el bambú y evitar fisuras a lo largo de cada pieza (**Figura 13**).

De acuerdo con sus autores, el principal problema de la estructura fueron las cargas laterales, relacionadas al viento y la temperatura, que influyen significativamente en el desempeño físico-mecánico del conjunto. También se señaló que el sistema de apoyos de la cubierta, tiene un efecto directo sobre la estabilidad del conjunto, que ya los grados de libertad que se le otorga a la superficie concentra las cargas en ciertos puntos del sistema. Otro aspecto señalado fueron los sistemas de conexión de cada elemento, estos deben ser de fácil montaje debido a la gran cantidad a construir.

Figura 13. Estructura espacial. UNAM.



Nota. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural (Rodríguez Cuevas & Rocha Gasparri , 2012)

El puente de bambú en Cúcuta (**Figura 14**), Colombia, fue construido por Jörg Stamm, quién tiene una amplia experiencia en diseño y construcción de estructuras de bambú en Colombia y el

mundo. Este caso es abordado desde un artículo publicado en la revista Tecnología en Marcha, publicada en el mencionado país (Carmioli Umaña, 2010).

Figura 14. Puente de Cúcuta, Jörg Stamm.



Nota. Disponible en: (Carmioli Umaña, 2010)

El diseño se basa en el arco como componente principal del sistema estructural. Si bien se observa la presencia de diagonales en su configuración, el 90% de la carga es absorbida por el arco y evidencia de esto es que las pruebas de carga se realizaron sin los tensores ni postes. El claro salvado tiene 31 m entre los apoyos principales y 29 m entre los auxiliares.

Por ser un material natural, sus culmos poseen dimensiones y características diferentes, por lo que las piezas que configuran el conjunto deben ser agrupados de acuerdo a su diámetro y longitud, que definirá su función en el sistema estructural, de modo tal que las piezas más rectas sean utilizadas como postes y diagonales mientras que las intermedias tienen funciones secundarias.

El tipo de guaduas que se utiliza en puentes tiende a ser larga y flexible, de modo que la curva natural de la pieza sea utilizada como parte de la geometría del arco y se neutralice la flexibilidad natural del bambú. Para conectar los culmos por sus extremos, estos se deben unir cepa con cepa (extremos de mayor diámetro) o cola con cola (extremos de menor diámetro) e introducir al final de ambos una varilla que los mantenga unidos. Estos entrenudos son rellenados con mortero con el fin de evitar aplastamientos o fisuras en el culmo.

Para la configuración de arcos, cuando se construye una viga de sección compuesta por varios nervios de “guaduas”, las uniones fueron traslapadas como mínimo cada 1.50 m, utilizando tornillos perpendiculares.

Entre los aspectos más relevantes a tener en cuenta de las experiencias presentadas, se señalan los siguientes:

- Las cargas laterales, relacionadas al viento, la temperatura, entre otros, influyen significativamente en el desempeño físico-mecánico del conjunto y deben tener especial consideración durante el proceso de diseño.
- El sistema de apoyos de la cubierta, afecta el comportamiento de la estructura y su estabilidad.
- La edad del bambú afecta su desempeño físico-mecánico. Se sugiere el uso de culmos maduros.
- Los bordes de las superficies curvas tienden a desplazarse, por lo que requiere especial atención a su estabilización.
- Las conexiones deben ser de fácil montaje, con el fin de optimizar tiempos y comprometer su estabilidad.
- El proceso de curvado de cada pieza de bambú requiere de mucho conocimiento y control por parte del ejecutor.
- Los culmos poseen dimensiones y características diferentes, por lo que las piezas que configuran el conjunto deben ser agrupados de acuerdo a su diámetro y longitud, que definirá su función en el sistema estructural.
- Para conectar los culmos por sus extremos, estos se deben tener diámetros similares entre sí.
- Para la construcción de arcos, se introduce varilla que mantenga unidos los culmos, rellenando las uniones entre estos con mortero para evitar su aplastamiento.

- Para la configuración de arcos, cuando se construye una viga compuesta por varios nervios de “guaduas”, las uniones deben traslaparse, a las que además se debe amarrar el grupo de piezas cada 1.50 o 2.00 m utilizando tornillos perpendiculares.
- Los puentes de bambú resueltos con arcos, tienen un arco de carga, un arco de piso y un arco de barandal, que se unen a través de los estribos.

CAPÍTULO III: Potencial aplicabilidad del sistema en el territorio

3.1 Introducción

Este apartado tiene el propósito de definir y exponer las variables con las que se evaluará el desarrollo del sistema estructural, presentado en el *CAPÍTULO IV*. Además, se verifica la conveniencia del desarrollo de cubiertas de grandes claros en las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco. Las entrevistas realizadas y el registro fotográfico ponen en evidencia varios aspectos de interés, entre los que se señalan: la presencia de bambú en el territorio, casi siempre en macollas aisladas, sin embargo, existen plantaciones de diferentes especies; la necesidad de cubrir espacios de grandes claros, especialmente durante los eventos festivos de cada pueblo, así como en infraestructura productiva, tales como invernaderos, secaderos, bodegas o espacios de trabajo en las siembras; no se hallaron estructuras de grandes claros resueltas con materiales tradicionales; los entrevistados manifestaron su interés por aprender técnicas constructivas diferentes a las utilizadas; el bambú es subutilizado; existen artesanos de *Otatea acuminata* y otros materiales que ya poseen habilidades manuales aplicables al bambú.

Este trabajo de campo se complementa con el apartado *2.1 Sustentabilidad: Impacto medioambiental y socioeconómico*, donde se señalaron las problemáticas socioeconómicas y medioambientales de las comunidades rurales en México, sirviendo de marco de referencia del contexto local.

3.2 Metodología

Constituido por entrevistas de campo de carácter abierto, a informantes clave tales como, líderes sociales, personas directamente vinculadas a las problemáticas colectivas de la comunidad o artesanos y constructores del bambú que pertenecen a estas comunidades.

Las comunidades rurales visitadas, se encuentran en el sector suroccidental de Jalisco. Las localidades a las que se accedió fueron, Chiquilistlán (Municipio de Chiquilistlán), Cuzalapa (Municipio de Cuautitlán de García Barragán), El Limón (Municipio de El Limón), que fueron complementadas con entrevistas en El Fresnito y El Rodeo (Municipio de Zapotlán el Grande). El trabajo de campo fue realizado durante los meses de marzo y abril de 2022.

El propósito de estas entrevistas fue el de comprender en mayor profundidad el contexto local, aportando al trabajo aspectos clave para el diseño y desarrollo del sistema estructural, además, se verifica la viabilidad de implementación del sistema estructural desarrollado. Cada formato de entrevista, está compuesto por una serie de preguntas organizadas en tres ejes temáticos:

- 1- La relación entre la comunidad y el bambú: Orientado a comprender cuál es el uso que la comunidad le da al bambú, que percepción tiene del mismo y cuán abundante es su presencia en el territorio.
- 2- Potencial aplicabilidad del sistema: En el que se indagó acerca de las necesidades espaciales de grandes superficies que tiene esta comunidad, así como potenciales usos de este tipo de cubiertas.
- 3- Manejo de la técnica: Donde se buscó detectar actores sociales dentro de la comunidad, con aptitudes técnicas para el aprendizaje de un sistema estructural relativamente nuevo.

De manera complementaria, se realizó un registro fotográfico dentro de las localidades visitadas, así como en sus proximidades, que tenía por objetivo detectar especímenes maderables con potencial aplicabilidad al sistema estructural, así como potenciales espacios de aplicación.

Los registros escritos y gráficos, fueron complementados con una revisión documental, presentada en el apartado *Impacto socioeconómico*, correspondiente al *CAPÍTULO II*, que tiene el propósito de darle un marco teórico y contextual. Esta revisión, tiene por fin establecer consideraciones relevantes relacionadas al impacto medioambiental del bambú, la distinción de aquellas especies adecuadas para su reproducción, el contexto socioeconómico en el que se busca insertar la tecnología y el uso de este material en México desde una perspectiva histórica.

La información completa del trabajo en campo se encuentra disponible en el *Anexo 1: Tabla de entrevistas y registro fotográfico*. En esta tabla fue volcada, clasificada y jerarquizada toda la información recabada en el campo de trabajo.

En las columnas de dicha tabla, se dispusieron las personas entrevistadas y las fotografías agrupadas por localidades. En las filas de la tabla, se dispusieron tres ejes temáticos: Relación comunidad-bambú, Potencial aplicabilidad y Manejo de la técnica. De este modo, los fragmentos de entrevistas realizados a diferentes personas en diferentes localidades quedan agrupadas en las filas. La última columna de esta tabla, enlista los hallazgos correspondientes a cada eje temático, que son soportados por cada uno de los entrevistados que se refirieron a un mismo tema.

Tabla 2. Cuadro de categorías y observables de la instancia cualitativa.

ANEXO 2		REFERENCIAS												
TDC: Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes claros en comunidades rurales de Jalisco		Comentarios principales												
Alumno: Arq. Lucas Alberto Henquín		Texto a considerar												
Fecha: Abril de 2022		Citas relevantes												
Ejes Temáticos	Sub-temas	El Limón			Observación Directa	Cuzalapa			Chiquilstlán		EF. y ER		Hallazgos	
		Entrevistados	Entrevistados	Entrevistados		Entrevistados	Ent.	OD	Ent.	OD				
		Entrevistado1	Entrevistado2	Entrevistado3		E1	E2	E3	OD	E1	E2	E1	OD	
Relación Comunidad - Bambú	Disponibilidad del material													Hallazgos, eje temático 1
	Disponibilidad de mano de obra													
	Uso del bambú													
Potencial aplicación	Comercialización y percepción del valor del bambú													Hallazgos, e.t. 2
	Usos posibles													
Manejo de la técnica	Percepción del éxito de su aplicación													Hallazgos, e.t. 3
	Motivos y preferencias en el uso del bambú													
	Consideraciones generales de producción y de construcción													
	Otras variables. Plagas. Preservación y tratamiento.													
	Comercialización del bambú. Aspectos grales													
	Bambú y estructuras: Técnicas. Uniones. Apoyos. Durabilidad													

Nota. Tabla con el contenido completo de la información disponible en *Anexo 2: Tabla de entrevistas y registro fotográfico*.

Se realizaron entrevistas a informantes de variado perfil, tenían en común el conocimiento de las problemáticas y dinámicas de la comunidad a la que representaban. Las entrevistas fueron sensiblemente ajustadas a cada perfil, buscando centrarla en el tema de mayor conocimiento del entrevistado por lo que, las entrevistas hechas a artesanos del “otate”, tuvieron como eje principal las técnicas utilizadas y su conocimiento de la planta, mientras que, las entrevistas realizadas a trabajadores, en su percepción general del material y sus posibles aplicaciones. Durante las entrevistas se buscó que el entrevistado esté cómodo, evitando utilizar términos que escapen a su lenguaje cotidiano y procurando darle un formato de conversación casual. Cada categoría, fue complementada con observación directa, a través del registro fotográfico.

3.3 Resultados. Entrevistas y registro fotográfico

El Limón

El municipio del El Limón, lleva 20 años promoviendo huertos comunitarios, con el fin de erradicar el uso de agrotóxicos en sus plantaciones (Red intercontinental de promoción de la economía social solidaria, 2022). Actualmente, autoridades municipales y campesinos operan en el marco de una declaratoria que establece el carácter ecológico del trabajo de la tierra (Comisión Colegiada y Permanente de Fomento Agropecuario, Forestal y Piscícola, 2021), proclamándose como el primer municipio agroecológico. Parte importante de esta labor está relacionada con su difusión, que se lleva a cabo a través de programas de concientización del cuidado del medioambiente y la salud propia, que son incorporados por las instituciones educativas y promovidos entre la comunidad en general.

Observación directa

Se registró la presencia de plantas de bambú aisladas dentro de propiedades privadas. Estas no tenían ningún tipo de manejo o cuidado. Se encontraban distribuidas en diferentes puntos de la localidad, a una distancia aproximada de no más de dos kilómetros entre sí. Los especímenes tenían

un rango de altura que variaba de entre los 7 y 12 metros, con culmos en muchos casos de más de 7 cm de diámetro y hasta 12 cm (**Figura 15 y Figura 16**).

Figura 15. Primer espécimen relevado. Especie maderable no identificada.



Nota. La planta tenía un diámetro aproximado de 5 m y una altura de 6 m, con culmos que, en su mayoría poseían diámetros próximos a los 3 cm y algunos más maduros con diámetros de hasta 10 cm.

Figura 16. Segundo espécimen relevado. Especie maderable no identificada.



Nota. La planta tenía un diámetro aproximado de 3 m y una altura de 8 m, con culmos que variaban sus diámetros desde los 7 cm hasta los 12 cm aproximadamente. Fuente de elaboración propia.

También se registró la presencia de un cultivo de bambú compuesto por diferentes especies. Este hace parte un módulo experimental de cultivo que, de acuerdo a la información recolectada durante las entrevistas, inicialmente fue apoyado por FIPRODEFO² (**Figura 17**).

Figura 17. Módulo experimental de siembra.



Nota. La plantación tenía unas 2 ha aproximadamente, estaba compuesta por al menos tres especies maderables diferentes de bambú, de las cuales se identificó la especie *Bambusa Bambos* (derecha). Los diámetros de los culmos variaban considerablemente entre especies, los más grandes alcanzaban los 15 cm y los más pequeños los 2 cm. La altura de toda la plantación era relativamente pareja, variando desde los 5 a 8 metros

Entrevistas

En este municipio se realizaron un total de tres entrevistas de carácter abierto, de las cuales dos corresponden a personas vinculadas a labores de la tierra y un tercer informante que trabaja el bambú, pero ya no reside en El Limón, sino en Guadalajara, donde continúa con su proyecto.

Primera entrevista: Sr. RGF

- Perfil del informante: Se autodefine como neocampesino y asesor agroecológico. Dedicado a gestionar procesos de cultivo agroecológico e impulsor de este modelo productivo en el

² Organismo gubernamental cuyo objetivo es promover el desarrollo forestal sustentable en el estado de Jalisco

Municipio de El Limón. El entrevistado está directamente relacionado con campesinos y autoridades locales.

- Relación comunidad - bambú: Afirma que el municipio cuenta con diferentes especies de bambú, pero desconoce cuáles son específicamente. Él mismo cuenta con plantas de bambú en las parcelas que produce.

Sostiene que el bambú es poco utilizado por la comunidad, su principal destino es la confección de cercos, usos como fajillas bajo tejados, y la construcción de puestos en eventos festivos del pueblo, como barrera rompe-viento, para la estabilización de suelos en laderas y como varas a las que se le adiciona un gancho en un extremo para poder recolectar pitayas y parotas. Por lo general, las personas no pagan por el uso de varas de bambú, sino que las comparten.

- Potencial aplicación: Como posibles espacios de aplicación del bambú, el entrevistado mencionó una variedad de lugares tales como terrazas, pérgolas, cercos, techos, durante las fiestas patronales para generar superficies de sombra, balnearios, restaurantes, cabañas, como tutores en siembras de jitomate, sombra para recolectores de caña de azúcar, invernaderos y cuando se le preguntó por la necesidad de generar espacios de uso comunitario, afirmó que "El municipio está dispuesto a generar espacios de encuentro, (...) ahorita es totalmente necesario, urgente, generar espacios para encontrarnos" y especificó que desde el inicio de la crisis sanitaria, las personas evitan juntarse en lugares cerrados, prefiriendo espacios más bien abiertos como balnearios o ríos.

También señaló que El Limón se caracteriza por tener una de las mejores representaciones del viacrucis de la región y expresó que el acto de la crucifixión se realiza en un cerro que no tiene espacios de sombra, por lo que las persona deben utilizar sombrillas.

Otro evento relevante en la región es llamado el Festival de la Semilla, este agrupa diferentes tipos de actividades tales como exposiciones, *tianguis*, intercambio de productos,

música, talleres, conferencia y recorridos, y aseveró: "este es un buen espacio donde podría promoverse y exponerse este tipo de cosas".

Las canchas de fútbol de la comunidad congregan personas al menos dos veces por semana, algunas tribunas están sin techar, e indicó que faltan espacios de estancia en los lugares donde se venden cervezas y botana durante el evento deportivo.

Cuando fue consultado respecto a cómo cree él que las personas verían la difusión de técnicas de bambú en la comunidad, afirmó: "Puedo asegurar que se suman muchos albañiles, jornaleros, chalanos a este tema, a aprenderlo –refiriéndose a la técnica del bambú- (...) todos están con esta misma problemática, de que los precios son muy caros para construir, no pueden hacer una casa porque todo está caro, porque el cemento está caro, porque el acero está por las nubes, entonces, a ellos les caería de lujo una alternativa constructiva. Sin dudas, lo puedo asegurar".

- Manejo de la técnica: Respecto al perfil de personas que él cree que son capaces de adquirir rápidamente destrezas en el manejo del bambú, señaló a carpinteros de la zona, entre los cuales mencionó a su propio hermano e hizo especial énfasis en un artesano muy enfocado en la bio-construcción, que no solo ha trabajado el bambú, sino otras técnicas constructivas no industrializadas.

Segunda entrevista: ECP

- Perfil del informante: Biólogo. Dedicado a comercializar técnicas de control de plagas sin el uso de agroquímicos, trabajador de la tierra.
- Relación comunidad - bambú: Afirma que, si hay bambú en la zona, pero señala que no conoce producciones establecidas. De acuerdo con el entrevistado, es solo utilizado de manera decorativa y desconoce las especies que posee la región, sin embargo, sostiene que son varias debido a las diferencias entre las plantas.

El bambú es actualmente utilizado para dividir linderos, no como cerramiento vivo sino como cercos compuestos por parantes en bambú y alambres, esta técnica también es utilizada en corrales y puertas tipo tranquera. También es utilizado como “ganchos” para bajar pitayas, guamúchiles y parotas durante la época de siembra. Si el productor es de gran escala son vendidos a 140 pesos cada pieza. Finalmente, señaló su uso como tutores en cultivos de pepinos.

Las personas pertenecientes de la comunidad, usualmente se regalan el bambú, sin embargo, señaló que, si las personas que necesitan el material poseen parcelas grandes, estos pagan por ellas.

- Potencial aplicación: Cuando el entrevistado fue consultado por espacios en los que se podría utilizar el bambú, mencionó que los productores de la región van periódicamente a sus parcelas y necesitan espacios de descanso, sobre todo en ciertas épocas donde se requiere de una inspección constante del cultivo. También indicó que los trabajadores de la caña de azúcar no siempre cuentan con un lugar donde parar a descansar o almorzar y poder protegerse del sol.

Se mencionó la presencia de lugares turísticos de dos balnearios: Las Higueras y El Agua Caliente, ahí tienen terrazas con techo hechos de “láminas” (metálicas) y estos son calurosos.

En cuanto a las dinámicas de organización de la comunidad, expresó que El Limón no se caracteriza por este tipo de organización entre trabajadores, sin embargo, se mencionó a la Ciénaga donde existen productores orgánicos agrupados y cooperativas de mujeres que hacen tortilla bajo el nombre de “Las Comadres”.

La patrona local es la inmaculada concepción de María, y se la celebra durante el mes de diciembre e incluye diferentes tipos de actividades posterior a la peregrinación y misa, que incluyen puestos de ventas de bebidas, “antojitos” y señala que son fiestas muy concurridas.

- Manejo de la técnica: Cuando se le consultó respecto de personas que podrían aprender técnicas de bambú afirmó que hay carpinteros muy capaces en la zona y serían idóneos para trabajarlos si aprendieran la técnica adecuada. También mencionó a una persona, ahora establecida en Guadalajara, llamada Jaime Velasco, que se dedica desde hace ya tiempo a trabajar el bambú -esta persona también fue incluida como entrevistado en este trabajo-. El entrevistado, ve difícil que las personas incorporen inmediatamente las técnicas debido a ciertos prejuicios con los que cuenta el bambú, como su baja durabilidad y cree que si se "dieran a conocer las ventajas que tiene el bambú y la gente a lo mejor se anima"

Tercera entrevista: JVR

- Perfil del informante: Comerciante y pequeño constructor de bambú. Oriundo del Limón, lleva 20 años trabajando con este tema. Actualmente, instala pérgolas próximas a albercas para privados en Guadalajara.
- Relación comunidad - bambú: Afirma que, las personas en Jalisco no tienen confianza en el uso del bambú debido a ciertos prejuicios y a la ausencia de información respecto a lo rentable que pueda ser. Sin embargo, también sostiene que la comercialización de bambú se incrementará. Según su experiencia, las ventas han subido y la cantidad de visualizaciones de los contenidos de sus redes sociales, también han crecido notoriamente. Asevera que es utilizado de manera ornamental en terrazas como un artículo de lujo, adquirido por gente de alto poder adquisitivo.
- Potencial aplicación: El entrevistado considera que los cultivos de bambú podrían ser utilizados para detener el crecimiento de la mancha urbana, así como también contrarrestar la contaminación del aire ciudadano por su gran capacidad de captura de carbono. Además, estas plantaciones podrían ser utilizadas para industrialización de la producción y como barrera natural que detenga la expansión de los incendios naturales. Con este material se podría elaborar todo tipo de productos y edificaciones.

- Manejo de la técnica: Ha construido pequeñas estructuras como stands e invernaderos. Asegura que cualquier edificación en bambú debe tener “buenas botas y buen sombrero”, haciendo referencia a la necesidad de aislarlo de la humedad proveniente del suelo, así como de las precipitaciones y los rayos UV. Afirma que, si el edificio en bambú está bien diseñado, espera que dure tanto como cualquier construcción tradicional.

La unión que encuentra más útil es la de espárrago y tuerca debido a su simpleza, sin llenarlos con concreto. En los apoyos si utiliza un basamento en dicho material con el fin de rigidizarlo y aislarlo de la humedad en este punto. También asegura que una edificación bien resuelta y con un buen tratamiento “puede durar para toda la vida, 100 años”. Cuando fue consultado por las edificaciones más viejas que conoce, mencionó un conjunto de cabañas en Puebla con 20 años de antigüedad que se conserva en buena forma. Sugiere no curvar el bambú debido a que posterior al proceso de secado, este se rigidiza por a la ausencia de líquidos.

Cuzalapa

En Cuzalapa, en la Reserva de la Biósfera de Manantlán, la organización “Color de la tierra” es llevada adelante por mujeres indígenas y sus familias desde el año 2001 (Color de la Tierra. Café., 2022). El propósito de dicha organización es comercializar café bajo estándares de agricultura orgánica. Esta iniciativa busca mejorar la situación económica de estas comunidades, así como proteger el medio en el que habitan.

Observación directa

Se registró tres tipos de especies de bambú: “carrizo”, una especie maderable y “otate” (**Figura 18**). Estas se ubicaban en propiedades privadas y no tenían ningún tipo de cuidado. Se observó su uso de manera auxiliar para utensilios de cocina, travesaños o postes en estructuras transitorias en combinación con madera y algunos usos menores como jaulas o parantes (**Figura 19**).

Figura 18. Especímenes hallados en propiedades privadas destinadas a viviendas



Nota. Phragmites australis, conocida como “Carrizo” (izquierda y centro). Especie de unos 4 m de altura con varas de una pulgada de diámetro aproximadamente. Especie maderable de bambú (derecha) de 4 m de altura compuesta por varas de 12 cm de diámetro aproximadamente

Figura 19. Aplicaciones del material en Cuzalapa



Nota. Canastos hechos en *Oatea acuminata* (izquierda y centro). Jaulas de pesca hechas en bambú (derecha).

Por otra parte, se observó la construcción de espacios semi-cubiertos que tienen el propósito de generar lugares de sombra para la comercialización de productos o servicios. Están constituidos por horquetas y travesaños de madera sin tratar. Por encima, se disponen hojas de

Palapa fijándolas a la estructura de madera. El procedimiento de montaje dura aproximadamente un día.

Figura 20. Espacios de sombra en Cuzalapa



Nota. Las fotografías fueron tomadas en la calle principal durante el Festival del Café.

La mayor parte de estas estructuras fueron utilizadas sobre la calle principal, donde cada persona tenía su puesto de venta, también se registró su uso en parcelas privadas, así como casas que estaban construidas con estructuras de madera y plástico.

Figura 21. Casas y espacios de guardado construidos con madera y plástico.



Entrevistas

En Cuzalapa se llevaron a cabo tres entrevistas de carácter abierto. Las mismas se realizaron durante el “Festival del Café” realizado por esta comunidad. El objetivo de este evento es difundir el café que producen, así como generar ingresos para toda la comunidad durante el desarrollo, a través de la venta de comida y productos.

Primera entrevista: DRZ

- Perfil del informante: Agricultor local. Tuvo la oportunidad de ayudar a otra persona de la comunidad a realizar su casa bajo la técnica de Bahareque con “otate” y “carrizo”.
- Relación comunidad - bambú: Afirma que el bambú se puede hallar pequeñas macollas ubicadas en patios o parcelas de las casas de sus habitantes. También puede ser encontrado en la orilla de ríos en la montaña. Si alguna persona de la comunidad necesita una cantidad pequeña del material, este es otorgado sin costo.

De acuerdo con el entrevistado, las generaciones precedentes manejaban técnicas de construcción tradicional y conocían mejor el trabajo con el bambú. No obstante, aseguro que se ha ido perdiendo esta relación con los materiales provistos por la naturaleza y actualmente las personas prefieren construir con materiales industrializados. Actualmente el bambú es utilizado para hacer fajillas, piezas sobre la que se apoya la cubierta y “chacaleras”, jaulas utilizadas para pescar camarones de río.

- Potencial aplicación: El entrevistado señaló que actualmente las personas prefieren casas “macizas”, ya que tienen mayor durabilidad que los materiales como la madera o el bambú. Explicó que hay una idea de que es un material con poca vida útil y que por ello las personas evitan su uso para espacios permanentes. Sin embargo, explicó que el problema principal está relacionado al desconocimiento de la técnica de trabajo del trabajo de estos materiales. Refiriéndose a la comunidad en general dijo: “Le hace falta a uno conocer más, el otate. (...) Uno no sabe trabajarlo”. Cuando se le consultó si haría su propia casa en bambú señaló que, “Si pudiera, si lo hacía, porque se ven bonita y son frescas” y expresó que un motivo por el

cual no la ha hecho de este material es por desconocimiento y que, por la cantidad de bambú requerida, debería pagar por él.

- Manejo de la técnica: El entrevistado colaboró con la construcción de una casa hecha en bambú y barro siguiendo la técnica del bahareque. Se utilizó *Otatea acuminata* y “carrizo” cortado durante “luna sazona” (cuarto menguante) con el fin de prolongar su vida útil. Explicó que su casa está hecha en madera cortada durante esta fase lunar y que, 25 años después y sin ningún tipo de tratamiento, continúa en pie y se ve saludable.

La construcción realizada fue un cuarto de 4x4 m que tenía por fin servir de morada para la persona a cargo de la construcción. Este encargó la búsqueda del material en la montaña durante la fase lunar mencionada. Se dispusieron parantes de “otate” en los vértices del espacio y uno intermedios de modo tal que cada parante estaba separado por una distancia de 2 m. Los parantes no fueron enterrados ni fijados al piso, se apoyaron sobre el piso directamente.

Luego se procedió a “tejer” con “Carrizo” de manera horizontal, pasando por delante y detrás de cada parante de manera alternada. El entrevistado indicó que el tejido se realizó de la misma manera que se tejió un canasto (de “otate”) que tenía a la vista. Expresó que se tuvo especial atención en el nivel de cada una de los elementos horizontales. La construcción fue realizada con el bambú aún verde, por lo que se contrajo y el tejido perdió algo de altura, que debió ser completado posteriormente. Ninguna pieza fue clavada, solo se van “apretando” unas con otras.

La ejecución del tejido, sin aplicar barro, duró aproximadamente tres días y en la construcción participaron dos personas, el entrevistado y el dueño de casa, quién dominaba la técnica.

Cuando se aplicó la mezcla compuesta por tierra, se le dio el espesor final, que fue de 10 cm. Sin embargo, explicó que lo ideal era alcanzar los 20 cm como mínimo. El motivo de esta decisión fue que se avecinaba la temporada de lluvias y no disponían del tiempo necesario.

De acuerdo con lo mencionado por el abuelo del dueño de casa, este tipo de muros tienen una durabilidad de aproximadamente 25 años.

Segunda entrevista: DRH

- Perfil del informante: Agricultor local.
- Relación comunidad - bambú: Se afirma que en la comunidad existen diferentes tipos de bambú y están en las casas de vecinos o en la montaña. Afirma que se los puede encontrar de todos los tamaños dependiendo de la planta.

El entrevistado mencionó que anteriormente, las personas de la comunidad solían utilizar el bambú para construir sus casas, sin embargo, actualmente prefieren utilizar materiales industrializados.

- Potencial aplicación: El posee una parcela donde plantó carrizo, con el objetivo de poder realizar instrumentos para danzas que realiza la comunidad. Afirma que una vez secos, pueden ser utilizados durante el baile, ya que golpean entre sí emitiendo sonidos coordinados. También sembró Ocate, con el que la comunidad confecciona chiquihuites y petacas piscadoras. Indicó que algunas personas lo venden como tutores para pepino, calabaza, tomate y jitomate a grandes productores. Sin embargo, señala que nadie produce bambú de ninguna especie de manera extensiva, como si lo hacen con otras plantas como los frijoles.

Muchas personas secan el café utilizando secadores de café, los que no tienen dinero para adquirir uno, realizan el proceso de secado sobre un plástico en el patio, lo que demora el proceso y expone el producto a plagas y mugre, disminuyendo su calidad.

Tercera entrevista: LMMH

- Perfil del informante: La señora está a cargo de un espacio de venta de desayuno, almuerzo y cena sobre la calle principal de Cuzalapa, próxima al edificio de producción de café orgánico de la comunidad.

- Potencial aplicación: La entrevistada señala que “tenemos muy buenas tierras hasta ahorita, nada de plagas”. “Todo lo que siembra es natural, nada de químicos. Tenemos mucha agua, el agua es más que suficiente”. Entre los cuales mencionó la caña, el maíz, el frijol y el café. Cuando se le consultó por espacios que necesitan, se señalaron los espacios para secado de café, así como espacios de almacenaje que las personas necesitan en sus domicilios. También indicó que las estructuras que se utilizaban durante el cultivo de café, se vuelven a desarmar para utilizarlas en otros lugares. Cuando se consultó sobre la posibilidad de aprender técnicas de construcción con bambú, mostró interés y señaló que, "yo pienso que si funcionaría, pero aquí no sabemos cómo trabajarlo" y observó que el bambú que existe en la zona, crece naturalmente, ya que nadie se ocupa de regarlos ni mantenerlos.

Chiquilistlán

El ayuntamiento de Chiquilistlán, junto con el Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- a través de su programa de “Tecnología Apropriada para la Generación de Sistemas Constructivos”, buscan promover técnicas de construcción tradicional en la región, con el objetivo de diversificar las alternativas constructivas de la comunidad con tecnologías edilicias asequibles y de bajo impacto medioambiental, para ello, se están realizando talleres de difusión de productos como el bloque de tierra comprimida (BTC) y se prevé ampliarlo a otras técnicas.

Observación directa

Se registraron al menos tres especies maderables de bambú: *Otatea acuminata*, un tipo de *Guadua* y *oldhamii* (**Figura 22**). El “otate” abunda en las montañas, distribuido entre árboles y otras plantas próximo a cursos de agua. También se encontró *oldhamii* y bambú maderable en macollas aisladas en la montaña y en el patio de un vecino.

Figura 22. Bambú en Chiquilistlán



Nota. Primera columna: Especie no identificada en un predio a las afueras del pueblo. Segunda columna: *Bambusa oldhamii* en la montaña, a unos 10 minutos del casco histórico del pueblo. Tercera columna: especie no identificada en el patio de una vivienda, dentro del pueblo. Cuarta columna: *Otatea acuminata* en la montaña, a 15 minutos del pueblo.

Primera entrevista: ALC

- Perfil del informante: Artesano del otate desde los 17 años de edad. Su padre le enseñó a trabajar el material y desde entonces fabrica principalmente sombreros y otros accesorios, esta actividad representa el sustento de propio y el de su familia.
- Relación comunidad - bambú: El entrevistado afirma que cuando necesita recolectar el material lo busca del río, en aquellos lugares donde el ganado no llega. Si no logra encontrarlo en este lugar, busca el material en una parcela que posee y donde tiene una plantación de Otate. También expresó que es poca la gente que trabaja el otate en Chiquilistlán.

- Potencial aplicación: Tiene intenciones de construir una cabaña en un terreno que posee en la montaña y explicó que tiene pensado hacer la cubierta en otate, utilizando los culmos de Otate como fajillas y apoyar una cubierta sobre estos que podría ser de Zacate.

Cuando se le consultó si utilizó alguna especie diferente al “otate”, explicó que en alguna oportunidad intentó realizar sus artesanías con “carrizo”, sin embargo, resultó quebradizo y por ese motivo descartó su uso.

Entre las artesanías que produce diariamente, el sombrero es el que más fabrica. También manufactura canastas, fruteros, lámparas y chiquihuites (**Figura 23**).

Figura 23. Manufactura del Otate.



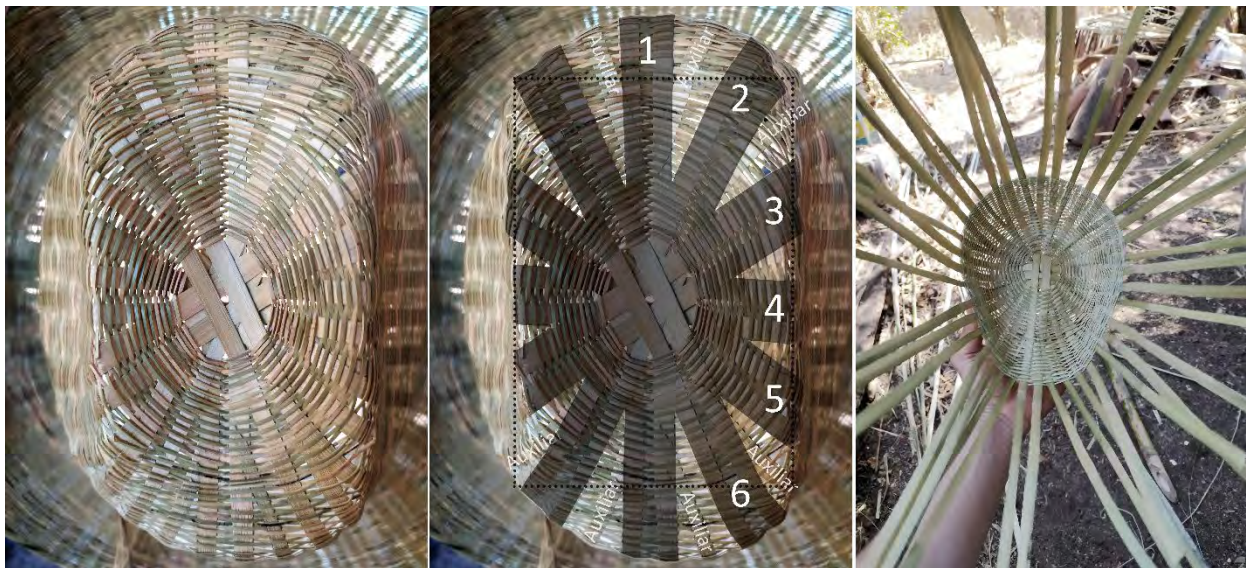
- Manejo de la técnica: Cuando confecciona un sombrero u otro tipo de pieza cóncava, parte de un mismo criterio. Agrupa seis pares de piezas principales con la cual conforma una cruceta con cada elemento equidistante entre sí (**Figura 24**). Cada una de estas piezas posee una sección mayor al utilizado en el resto del tejido. Es importante señalar que la cantidad de pares varía de acuerdo a la complejidad y tamaño de cada superficie cóncava.

Durante el proceso de tejido se deben tener presentes diámetros clave, como es el caso del perímetro de la cabeza para que cada sombrero quede hecho a medida. Para ello se vale de lo que llama “ruedita”, que es un aro que utiliza de referencia. El tejido entre el aro y el centro del sombrero, así como las alas es realizado de manera intuitiva.

El entrevistado explicó que, para rigidizar el borde externo del ala, evitando que esta se caiga, utiliza un alambre delgado que lo mantiene en su posición. El acabo de los bordes es

resuelto con lo que denominó como ribetes, que es una pieza flexible de Otate que lo envuelve de forma espiralada.

Figura 24. Manufactura de sombrero en otate según técnica de los pares.



Nota. Las fotografías se corresponden con la elaboración de un sombrero, la derecha aún en proceso de confección. De elaboración propia.

El Fresnito y El Rodeo

La comunidad rural del sur occidente de Jalisco, enfrenta una problemática relacionada a la producción de aguacates y berries para exportación. Estos cultivos, demandan modelos intensivos agroindustriales que ocasionan una disminución de los mantos acuíferos, deforestación y contaminación (Macías Macías & Sevilla García, 2021). Esta situación compromete el desarrollo de la agricultura a largo plazo. Desde el año 2013, se desarrolla el proyecto de investigación “kuautlali”, parcela para agricultura sustentable. Respuesta ante depredación de la naturaleza en el sur de Jalisco, el cual agrupa productores de pequeña escala, investigadores y estudiantes universitarios, con el fin de experimentar con diversas técnicas de cultivo agroecológico, que representen una oportunidad de desarrollo económico sustentable para los productores locales y un espacio de aprendizaje para la academia.

Con el fin de recabar información relacionada a las problemáticas territoriales y de potencial uso del bambú, se entrevistó al Dr. Alejandro Macías, que lleva adelante este proyecto junto a la Mtra. Yolanda Sevilla.

Primera entrevista: Dr. AMM

- Perfil del informante: Académico. Licenciado en Comercio Internacional (Universidad de Guadalajara – UDG, México), M.Sc. en Economía (UDG, México), Doctor en Ciencias Sociales (UDG, México). Director del Centro de Investigaciones en Territorio y Ruralidad y profesor investigador titular en la Universidad de Guadalajara en el Centro Universitario del Sur. El entrevistado mencionó que el proyecto tuvo una primera etapa en la que se desarrolló infraestructura en el predio de la universidad, a través de invernaderos en los que se realizaron pruebas con hortalizas. En esta primera experiencia, el terreno donde se hallaba el invernadero tuvo problemas de inundación. Una segunda etapa, será llevada adelante en los predios de los productores, ubicados en las comunidades de interés, a través de parcelas ecológicas de tipo experimental. Esta segunda etapa estará financiada por el CONACYT y entrará en vigencia a partir del mes de abril del 2022.
- Relación comunidad - bambú: Desconoce de la presencia de cultivo o lugares donde el bambú crezca naturalmente. Observó a las comunidades rurales utilizar el “carrizo” para tareas complementarias asociadas a los huertos, como cercos vivos o tutores.
- Potencial aplicación: El entrevistado cree que sería de mucha utilidad el aprendizaje y difusión de técnicas constructivas de bambú. Menciona que, hasta el momento, el proyecto se mantuvo al margen de fomentar el uso de estructuras tradicionales debido a su impacto ambiental y visual en el territorio.

También se señala la necesidad de gestionar espacios de enseñanza como “Escuelas de desarrollo rural”, que son de mucha utilidad para poder difundir técnicas de agroecológica, que favorezcan la transición a modelos productivos más sustentable. Estas comunidades

requieren tejabanos, espacios con la misión de facilitar el encuentro de las comunidades y protegerlas del sol y la lluvia. En este momento, requieren de uno en El Rodeo.

El entrevistado señaló que los agricultores han manifestado la necesidad de impulsar actividades de agricultura protegida. Se requieren de invernaderos para la siembra de hortalizas y frutas, ya que las condiciones climáticas dificultan el cultivo a cielo abierto.

3.4 Hallazgos

Relación Comunidad - Bambú

- El bambú está presente en el territorio, usualmente en forma de macolla aislada. Algunas personas lo siembran en sus propiedades. La *Otatea acuminata*, es la especie con mayor presencia. Se encontraron plantaciones de diferentes especies de Guadua presentes en el Municipio del Limón y en Colima, de la que se hace mención por su proximidad al campo de trabajo.
- No se encontraron personas que dominen la técnica constructiva del material de manera especializada, sin embargo, en cada localidad se detectaron personas con aptitudes para incorporar rápidamente los principios básicos, como la presencia de carpinteros en El Limón, gente que ha construido con “otate” en Cuzalapa y artesanos de esta especie en Chiquilistlán.
- En general el bambú es subutilizado, destacándose entre los principales usos los cercos vivos, los parantes para cubiertas transitorias o cercos de cerramiento perimetral de las parcelas, tutores para la siembra y como postes en bodegas transitorias. También se detectó el dominio de la técnica del tejido con “otate”, a través de la elaboración de productos como canastos, lámparas y pequeños recipientes de guardado.
- En las comunidades rurales, el bambú es considerado un material que no alcanza un valor que justifique su producción. Si es requerido en cantidades moderadas, los vecinos de la comunidad se muestran dispuestos a compartirlo, no sucede lo mismo con grandes productores, a quienes se los venden por pieza. Resulta de interés señalar que, de acuerdo

con la experiencia del Jaime Velazco, quien trabaja el material y vive en Guadalajara, el bambú se comercializa como un producto de lujo en la ciudad, siendo utilizado de manera ornamental.

Potencial aplicación

- Cuando se consultó respecto de potenciales usos para superficies de grandes claros, se mencionó una gran cantidad de espacios de carácter privado y público, en los que se podría aplicar. Se señaló en reiteradas oportunidades el montaje de cubiertas al aire libre con fines comerciales. Sin embargo, estas cubiertas son actualmente resueltas con piezas de madera de menor calidad y hojas de diferentes palmas, siempre con claros de no más de 5 m entre un poste y otro. No se registraron cubiertas de grandes claros resueltas con este material.
- Los entrevistados afirmaron que sería de mucha utilidad aprender a manejar una técnica constructiva diferente a las que conocen, sobre todo por las limitaciones económicas que imponen muchas de ellas, y se argumentó que el principal problema del uso del bambú es la falta de conocimiento que se tiene sobre su manejo. Algunos entrevistados expresaron dudas respecto a su implementación generalizada, ya que una parte de la población prefiere construcciones realizadas con materiales industrializados, principalmente por ser más duraderos.

Manejo de la técnica

- La técnica utilizada para la preservación del material en las comunidades rurales, es a través de la cosecha de culmos sanos durante la fase lunar de cuarto menguante. Jaime Velazco, quien trabaja el material en la ciudad de Guadalajara, utiliza tanques de inmersión de ácido bórico.
- Dentro de la producción de artesanías hechas con “otate”, la técnica más utilizada por las comunidades rurales, es el tejido. Los artesanos fabrican todo tipo de superficies cóncavas, partiendo de elementos que ofician de guías y que son los que le dan la forma final y su

rigidez al conjunto. El tejido está compuesto por fibras de menor sección y alternan su posición en cada cruce con las guías, cuando uno va por encima, la siguiente va por debajo. La capacidad de conservar la geometría del conjunto, viene dada por la continuidad de la superficie, por lo que, si una parte del tejido se interrumpe, el conjunto no se desarma.

3.5 Conclusiones sobre la potencial adopción del “otate” para su uso en estructuras

La importancia de un sistema estructural radica en la imposibilidad de una parte de esta comunidad de reproducir estructuras capaces de salvar grandes claros, utilizando una tecnología local y disponible en la región.

Como se mencionó, no se observaron espacios de grandes claros construidos con técnicas tradicionales. Por lo que estas superficies son generalmente resueltas con la ampliación de lo que se conoce como “palapa”, que son estructuras elementales de madera, con columnas intermedias que condicionan y en algunos casos entorpecen las labores que se deben realizar debajo de estas cubiertas.

Durante la visita a las diferentes localidades, se observó y registró, el uso de “palapas” compuestas por postes y travesaños de madera, que generan una superficie de sombra bajo la que se comercializan productos y comidas de la región. Cuando las dimensiones de estos espacios resultan insuficientes, se continúan incorporando elementos hasta alcanzar el tamaño deseado. Esta lógica de crecimiento, revela la incapacidad de ejecutar cubiertas que superen dimensiones mayores a 5 m y representa un nicho de acogida para este trabajo de investigación.

En este sentido, el trabajo artesanal de la *Otatea acuminata*, constituye una oportunidad de inserción de la técnica constructiva con bambú, debido a la familiaridad que tienen estas personas con la manufactura del material.

Es evidente la prioridad que una parte de las comunidades rurales, le otorgan a prácticas productivas que tiendan a formas de desarrollo de menor impacto medioambiental, así como al

cuidado de la salud de los habitantes locales. Estas iniciativas, persistentes a través del tiempo, manifiestan el interés de estas comunidades en buscar formas de desarrollo que mejoren sus condiciones de vida y minimicen el impacto medioambiental en los ecosistemas a los que pertenecen.

Desde el punto de vista medioambiental, la *Otatea acuminata* se presenta como la alternativa más apropiada para su implementación al sistema estructural, en relación a otras especies de bambú maderable, debido a que esta es una especie nativa, es decir, forma parte del ecosistema local, por lo que su potencial reproducción está adaptada a las condiciones climatológicas, plagas y ciclo hídrico de la región.

Las conclusiones alcanzadas fueron organizadas en tres grandes grupos de variables sobre las que, posteriormente, se evaluó y consideró cada una de las alternativas de sistemas estructurales presentadas en el *CAPÍTULO IV*. A continuación, se presenta cada una de ellas:

Primera variable: Simpleza

Diversas especies de bambú maderable crecen naturalmente en la región suroccidental de Jalisco. Las comunidades rurales tienen una relación cotidiana con la planta y, aunque es utilizada de manera auxiliar, se detectó su aplicación a estructura de carácter transitorio y secundario, a través de uniones simples, amarrando culmos y horquetas de madera entre sí, utilizando clavos, alambres y cordones de nylon que mantienen las piezas unidas. Este tipo de cubiertas son denominados “palapas”, en referencia al nombre de la palma con la que cubren estas estructuras de claros limitados. Este tipo de estructuras representa una referencia clave para el sistema propuesto.

Carpinteros, constructores y campesinos en general, podrían usufructuar de un sistema estructural capaz de salvar grandes claros aprovechando los recursos disponibles en el territorio, atendiendo el fenómeno económico denominado *pluriactividad*, mencionado en el *CAPÍTULO II*, en

el que se señala la necesidad de diversificar la fuente de ingresos de los pequeños y medianos productores.

Tampoco se observaron estructuras complejas o de grandes claros hechas con este material ni con otro disponible en la zona. Por lo que resulta evidente que, para la mayor parte de la población, existe un desconocimiento técnico, no solo en el manejo del bambú, sino también de las técnicas constructivas tradicionales capaces de cubrir superficies amplias.

La propuesta busca alcanzar a una parte de la población que no posea conocimientos específicos del material o de este tipo de estructuras, el sistema debe ser simple de aprender, de reproducir y difundir.

Segunda variable: Segura

Otro aspecto relevante es la durabilidad del bambú y los prejuicios instalados en torno a esta. Se señaló en reiteradas oportunidades que el valor del material es subestimado precisamente por su incapacidad de resistir al paso del tiempo. No obstante, se añadió que existía un desconocimiento de las técnicas de preservación y que la difusión de las mismas podría revertir la imagen que se tiene de esta.

Un correcto manejo y tratamiento del material, que favorezca la durabilidad del mismo, es indispensable para garantizar las prestaciones físico-mecánicas del sistema ante el paso del tiempo. La propuesta, debe incorporar criterios básicos de manejo y tratamiento de la materia prima.

Otro aspecto a considerar es la estabilidad de las estructuras ante cargas laterales como el viento. Las cargas inducidas por el viento, vienen dadas por la fuerza ejercida por la energía cinética de la masa de aire en movimiento, que produce una combinación de presión positiva –de empuje- y negativa –de succión- en ambas caras de la superficie. Cuanto mayor sea esta superficie, mayor serán las fuerzas ejercidas por el viento (Ching & Zuberbuhler, 2014). Esta condición es coincidente con el tipo de estructuras que se plantea, que tienden a cubrir superficies amplias.

Si bien el régimen histórico de vientos de la región es de hasta 18 Km/h (valor relativamente bajo), dados principalmente entre los meses de enero y junio y provenientes del sector suroccidental y nororiental (weatherspark, 2022; Meteoblue, 2022), existen algunas localidades próximas a la costa pacífica, que deben tener muy en cuenta este aspecto, debido a la presencia de huracanes provenientes del Océano Pacífico, por lo que los anclajes de la estructura deben estar adecuadamente asegurados.

Para garantizar la estabilidad de estas superficies, se debe tener en cuenta la firmeza de las uniones propuestas, que deben conservar su desempeño mecánico ante el movimiento continuo provocado por los empujes laterales. Los apoyos de la estructura deben estar convenientemente fijados al suelo, de modo tal de evitar que sean removidos y, por último, la configuración del sistema, que debe presentar una geometría adecuada que eviten deformaciones excesivas.

Tercera variable: Asequibilidad.

Las comunidades rurales construyen habitualmente estructuras de madera denominadas “palapas”, que resultan adecuadas para salvar pequeños claros -de 4.00 a 5.00 m- y, aunque son realizadas de manera precaria y transitoria, son simples, económicas y resuelven las necesidades inmediatas de los usuarios. Esas estructuras resultaron ejemplares para el sistema propuesto, porque incorporan las características deseadas.

La asequibilidad del sistema, resulta un aspecto fundamental a tener en cuenta, ya que los constructores de estas “palapas” son los potenciales usuarios del sistema. Durante las entrevistas se señaló en reiteradas oportunidades, que los recursos financieros comprometen la viabilidad de la construcción. RGF., campesino agroecológico, actor referente de la localidad de El Limón, sostuvo: *“Puedo asegurar que se suman muchos albañiles, jornaleros, chalanos a este tema, a aprenderlo (técnica constructiva con bambú) (...) todos están con esta misma problemática, de que los precios son muy caros para construir, no pueden hacer una casa porque todo está caro, porque el cemento*

está caro, porque el acero está por las nubes, entonces, a ellos les caería de lujo una alternativa constructiva”.

Por lo expuesto, las variables con las que se evaluarán las diferentes alternativas de sistemas estructurales son la simpleza, su seguridad y la asequibilidad del mismo, con el propósito de favorecer su replicabilidad en el territorio.

CAPÍTULO IV: Ensayos de materiales y componentes del sistema estructural

Introducción

El contenido de este capítulo se centra en el desarrollo del sistema estructural en sí, más específicamente, en los materiales, la configuración y diseño de los componentes necesarios para un arco de sección compuesta realizado con bambú. Se tuvo en cuenta los aspectos y características enunciadas en el apartado *3.5 Conclusiones sobre la potencial adopción del “otate” para su uso en estructuras*, correspondiente al *CAPÍTULO III*, que establece las variables que se deben considerar para favorecer la potencial difusión e implementación en las comunidades rurales de la región. Estas variables, fueron tenidas en cuenta en las matrices de evaluación utilizadas durante el proceso de diseño y desarrollo del arco, en la que se evalúa cada proceso o elemento por su *simpleza* -evitando mano de obra especializada o equipos sofisticados y favoreciendo así su replicabilidad para diferentes actores-, la seguridad – de los materiales utilizados y sus componentes-, y la asequibilidad -considerando la dificultad que estas comunidades tienen para gestionar recursos-.

La propuesta de sistema estructural basado en arcos de sección compuesta, se realiza sobre los ensayos presentados en los siguientes apartados; **4.1 Evaluación de arcos de sección compuesta**, en el cual se revisa y evalúa una serie de alternativas de componentes y configuración de nervios en relación al diseño del arco. Debido a que los esfuerzos a flexión y compresión son los más solicitados en el funcionamiento de un arco, se realizaron ambos ensayos para verificar las propiedades

mecánicas de los materiales y componentes, por ello, el apartado 4.2 *Ensayo a flexión para tres especies locales*, revisa el desempeño mecánico a flexión para tres especies que pueden ser adquiridas en la región, dos de ellas ampliamente aceptadas para usos estructurales y una última que considera la *Otatea acuminata*, especie nativa que, como se señaló en el *CAPÍTULO III*, es ampliamente utilizada por artesanos locales para la elaboración de utensilios y desestimada para uso estructural como componente primario. Los resultados de este apartado expusieron valores comparables entre las diferentes especies, por lo que la *Otatea acuminata* se presenta como potencial candidata para su aplicación al sistema, por ello, se realizaron los ensayos a flexión y compresión, presentados en los apartados 4.3 *Ensayo a flexión para Otatea acuminata* y 4.4 *Ensayo a compresión para Otatea acuminata*, de los cuales se concluyó la pertinencia del uso de esta especie en estructuras.

Finalmente, el apartado 4.5 *Ensayo a flexión para uniones*, presenta ensayos a flexión realizados para la unión desarrollada, a través del cual, se busca garantizar la correcta transmisión de cargas a través de la unión.

Los principales hallazgos de cada uno de estos ensayos se articulan entre sí y contribuyen al cierre de este capítulo, que se presenta en el apartado 4.6 *Conclusiones*.

4.1 Evaluación de arcos de sección compuesta

En este ensayo se diseñaron y construyeron dos grupos de arcos de sección compuesta con potencial aplicabilidad al sistema estructural. Posteriormente, se evaluó el proceso constructivo y de diseño de estos arcos, determinando la especie de bambú a utilizar y aspectos relevantes de la configuración general de la propuesta final.

Para el diseño de arcos de sección compuesta, se partió de lo expuesto en el *CAPÍTULO II*, en el que se señalan aquellos aspectos relevantes en el uso de bambú en estructuras, así como conceptos teóricos referentes al comportamiento mecánico del arco.

Metodología: Nervios del arco

Se estudiaron alternativas de configuración de arcos de sección compuesta mediante croquis, modelos analógicos y modelos digitales, con el propósito de dilucidar aquella configuración más adecuada a las variables planteadas, finalmente se construyeron dos prototipos que fueron comparados entre sí. Su diseño fue reajustado en cada etapa. Se utilizó como referencia la normativa internacional ISO (ISO, 2021), la normativa peruana (E100, 2012), la normativa colombiana (NTC, 2007), la normativa ecuatoriana (NEC, 2016) y la normativa mexicana (NTC, 2017) y el Código de seguridad para andamios de bambú (2017), del departamento de trabajo de China.

Para la ejecución de los arcos, de la serie de culmos disponibles por cada pedido, se clasificaron aquellos que poseían las características mencionadas en el apartado "*Calidad de los culmos utilizados en estructuras*", correspondiente al *CAPÍTULO II*, y se verificó que se utilicen segmentos de la parte media del culmo, es decir, la basa, por resultar más flexibles que la cepa.

Se ejecutaron dos grupos de cinco arcos cada uno, con el propósito de evaluar su desempeño en dos estructuras diferentes. Para los arcos correspondientes al Prototipo 1 (P1), se decidió utilizar tres nervios por arco y traslaparlos por tercios de modo tal que, por cada unión, exista un solo nervio interrumpido por el cambio de culmo. Para los arcos correspondientes al Prototipo 2 (P2), se utilizaron dos nervios por arcos, y se traslaparon por mitades de modo tal que, por cada unión, exista un solo nervio interrumpido.

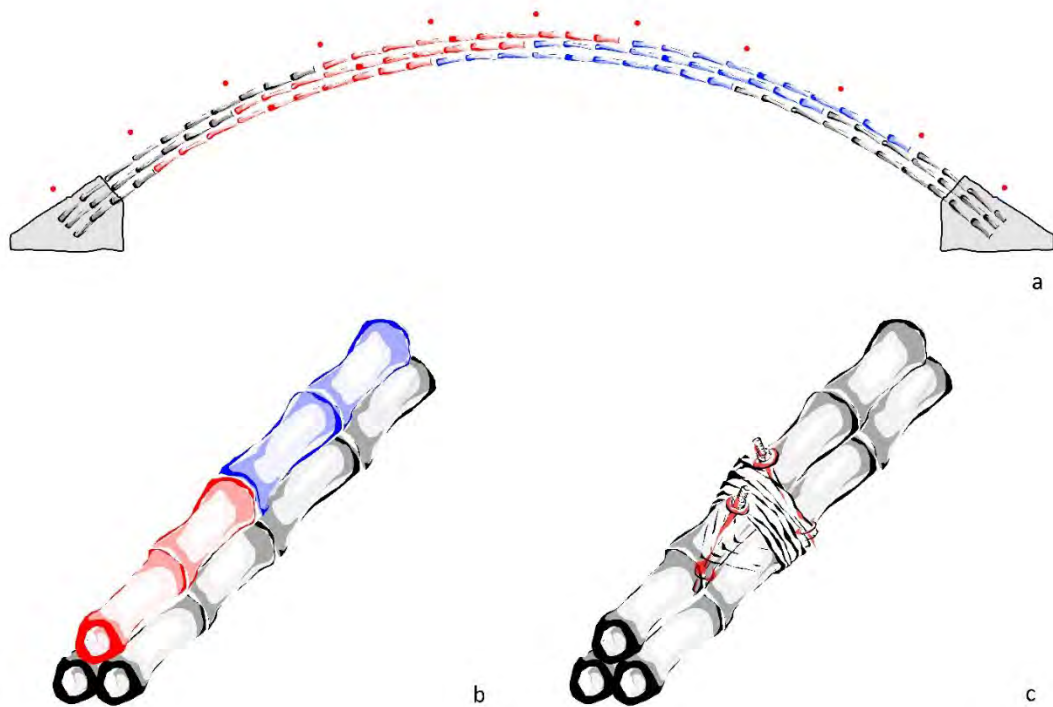
El arco P1, fue construido con culmos de *Otatea acuminata*, cosechada en la localidad de Chiquilistlán durante el mes de abril del año 2022, para su posterior almacenaje y secado en los laboratorios de la Universidad Jesuita de Guadalajara.

El arco P2, está constituido por culmos de *Dendrocálamus asper* y *Filostaquis edilus*, el material fue adquirido a través de un productor local, en el mes de agosto del año 2022. Provino de la localidad de San Luis de Potosí. Las piezas fueron tratadas con ácido bórico a través de la técnica de inmersión, en la que se sumergen los culmos en una pileta llena con este químico. El material fue almacenado en el mismo sitio y cumpliendo los mismos criterios que el P1.

Para los arcos P1 y P2, se garantizó una distribución equidistante de uniones a lo largo del desarrollo del arco, por ello, todas los culmos que componen el arco tienen exactamente el mismo largo y fueron subdivididos, de modo tal de trabajar con dimensiones equivalentes entre sí. Por lo que, para el arco de tres nervios (P1), se dispuso cada culmo traslapado con el siguiente por sus dos terceras partes. En el caso de un arco compuesto por dos nervios (P2), se traslapan por mitades. Para un hipotético arco de cuatro nervios, se deben traslapar por cuartos. Esta técnica puede ser aplicada con arcos con diferentes cantidades de nervios, de acuerdo a las solicitaciones mecánicas requeridas.

Si los culmos son alternados según el procedimiento indicado, ninguna unión debe tener más de un nervio interrumpido, de modo tal que los empalmes de los culmos se alternen y no se repitan. La *Figura 25*, ilustra gráficamente la técnica expuesta, utilizando como caso ejemplar, un arco de tres nervios (P1).

Figura 25. *Técnica de distribución de culmo de tres nervios en arcos de sección compuesta.*

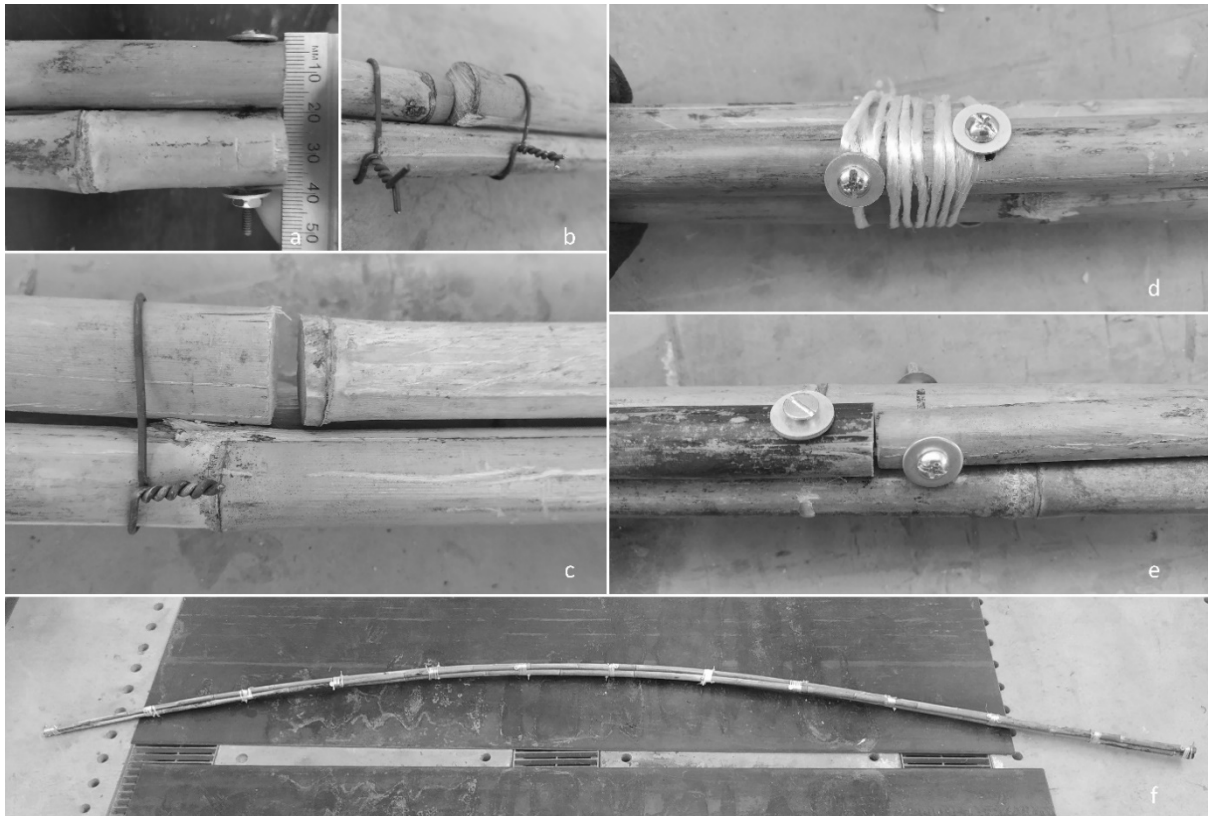


Nota. a- Técnica de traslape de culmos a 1/3 de su longitud, nótese que los puntos rojos sobre el arco marcan la presencia de una unión. b- El nervio superior (compuestos por los culmos rojo y azul) es el único discontinuo en esta unión. c- Diseño de unión combinada: Culmo rojo fijado a nervio izquierdo y culmo azul fijado a nervio derecho.

Metodología: Uniones del arco

Para las uniones se utilizaron tornillos de acero galvanizado con cabeza integrada, con un diámetro de 3/16" y con una longitud de 3", con arandelas en ambos extremos. De manera transitoria, fueron reforzadas con rafia sintética de 6 mm de diámetro y 2 m de largo. Este material es un hilo compuesto por fibras de polietileno, aceptado por el código de prácticas del departamento de trabajo de China (Labour Department, 2017, pág. 27), documento que regula la construcción de andamios de bambú.

Figura 26. Primer proceso de montaje de uniones P1.



Nota. a- Diámetro promedio de arco. b- Unión con diferencia de diámetros excesiva en la transición del nervio. c- Unión con separación no deseada. d- Unión zunchada. e- Unión sin zuncho, culmo derecho fijado a culmo superior y culmo izquierdo fijado a culmo inferior. f- Arco de sección compuesta finalizado. El arco no está bajo tensión, su curvatura se debe a que los culmos fueron dispuestos con su curvatura natural en un mismo sentido. Dimensiones generales: Largo = 420 cm. Flecha = 38 cm. Diámetro inicial (derecho) = 5 cm. Diámetro final (izquierdo) = 3 cm.

Proceso de conformación de arcos

El proceso de construcción de cada arco de sección compuesta se realizó siguiendo los pasos descritos a continuación:

- Luego de seleccionar los culmos que serán utilizados en cada arco de sección compuesta, se los dispuso con su curvatura natural en el mismo sentido, de modo tal que el arco final ya posea una curva propia, previo al proceso de tensado.

- Sobre una superficie horizontal de grama, se clavarón dos estacas del largo final de cada arco, más un excedente de un metro en cada extremo. La punta de cada estaca quedó nivelada, es decir, a la misma altura.
- Con el propósito de conformar una curva catenaria, se dispuso una cadena que unía cada punta de las dos estacas, verificando que ambos extremos de la cadena estén correctamente nivelados.
- Con una escuadra metálica, se procedió a trasladar cada punto de la cadena al terreno, de modo tal de dibujar la catenaria sobre la grama mediante el uso de estacas. Se inició desde el centro, correspondiente al punto más bajo de la cadena, y utilizando marcas cada un metro a partir de este, se replicó la geometría de la catenaria en el piso.
- Trabando el extremo de cada arco entre las dos primeras estacas, se procedió a inducir tensión paulatinamente desde un extremo del arco hasta el otro, y se lo volvió trabar con las últimas dos estacas.
- Para conservar la tensión inducida, se vinculó cada extremo del arco con un cable, y se lo retiró del molde que conservaba su forma.
- Se almacenó cada arco en un lugar cubierto y resguardado de la humedad y la radiación solar directa, listos para ser utilizados.

Figura 27. Proceso de ejecución de arcos de sección compuesta



Nota. Izquierda, arcos Prototipo 2 (P2, compuesto por *Dendrocálamus asper* y *Filostaqius edilus*), largo total 6.00 m constituido por culmos de 3.00 m y 1.50 m c/u. Derecha, arcos Prototipo 1 (P1,

realizado con *Otatea acuminata*), largo total 4.05 m, compuesto por culmos de 1.35 m, 0.90 m y 0.45 m c/u. Para este prototipo, se decidió vincular el cable dos uniones antes de uno de los extremos, debido a que inicialmente, se esperaba enterrar los arcos.

Con el objetivo de seleccionar la especie y técnica más adecuada a los recursos técnicos y materiales locales, se sometió cada proceso de ejecución de arcos a una *Matriz de evaluación* (Tabla 3). Esta matriz, contempla una ponderación para las variables de *simpleza*, *seguridad* y *asequibilidad* para los ítems de *proceso de montaje*, *curvado del arco*, *uniones* y *geometría deseada*.

Resultados: Evaluación comparativa

Se realizaron dos series de pruebas, compuesta por cinco arcos por cada grupo, de acuerdo a lo mencionado en el apartado *Configuración de arco de sección compuesta*. Este proceso fue sometido a una matriz de evaluación (Tabla 3), con el objetivo de comparar y seleccionar aquella especie y técnica más adecuada para la construcción de los arcos, teniendo en cuenta las condicionantes locales.

Tabla 3. Matriz de evaluación de conformación de arcos

MATRIZ DE EVALUACIÓN DE PROCESO DE CONFORMACIÓN DE ARCOS							Rúbrica de puntaje				
Objetivo: 1- Seleccionar especie adecuada y 2- Detectar aspectos susceptibles de mejora del sistema o de su proceso de ejecución							1	No cumple con el requerimiento			
							2	Cumple parcialmente con el requerimiento			
							3	Cumple con el requerimiento			
Prototipo	Proceso general de montaje			Curvado de arco			Uniones			Geometría deseada	Evaluación
	Simpleza	Seguridad	Asequibilidad	Simp.	Seg.	Aseq.	Simp.	Seg.	Aseq.		
P1: Otatea Acuminata	15%	5%	10%	20%	5%	10%	10%	10%	5%	10%	100%
	3	3	3	3	3	3	3	3	3	2	
Ponderación	0.45	0.15	0.3	0.6	0.15	0.3	0.3	0.3	0.15	0.2	2.9
P2: Dendrocálamus Asper - Filostaquis Edilus	2	3	3	2	3	3	1	3	3	1	
Ponderación	0.3	0.15	0.3	0.4	0.15	0.3	0.1	0.3	0.15	0.1	2.25

Nota. Cada variable, tiene una ponderación asignada de acuerdo con la relevancia que se consideró que poseía dentro del proceso general de construcción de cada arco.

Para los arcos P1, la conformación de las uniones fue más rápida en relación a la de los arcos P2. Con el fin de estudiar algunas alternativas, se decidió no utilizar tornillos en 4 de estos arcos, estas uniones mostraron la misma estabilidad aparente. El proceso de tensión del arco resultó simple y rápido, no presentó situaciones inesperadas y fue realizado por una sola persona. La

ejecución del grupo de arcos y su posterior tensión, se realizó durante 5 jornadas de trabajo consecutivas.

En cuanto a los arcos correspondientes al P2, su ejecución fue relativamente simple, sin embargo, presentó problemas durante el proceso de montaje debido a que, a diferencia de la *Otatea acuminata*, los culmos de estas especies son huecos en sus entrenudos y tendían a rajarse cuando se realizaban las perforaciones en los mismos. Otro inconveniente asociado a este rasgo es que, si se ejercía más presión de la debida en los pernos que conectaban las piezas, los culmos crujían dando una clara señal de fractura interna.

El proceso de curvado obligó a ejercer una fuerza mayor en comparación con la ejercida en los arcos P1, debido a la resistencia que oponían los culmos de *Dendrocálamus asper* y *Filostaquis edilus*, que poseen mayor diámetro que la *Otatea acuminata*. Esta dificultad implicó cambiar varias veces la curvatura de la cadena, hasta hacerla lo suficientemente abierta como para adaptar los arcos a ella.

Para lograr la curva deseada, se requirió la colaboración de tres personas. Durante el proceso de tensado, y en la medida que el arco acumula tensión, el procedimiento se vuelve peligroso, debido a que el arco se puede soltar repentinamente y golpear a un operario.

Se debe señalar que existe una gran cantidad de técnicas de curvado de culmos de bambú. Sin embargo, en este ejercicio se decidió utilizar la flexibilidad que el material presenta naturalmente, con el propósito de que el proceso de ejecución del trabajo sea simple.

Cuando se retiraban los arcos de sus moldes, todos los prototipos presentaron alteraciones en las curvas catenarias inducidas. Esto se debe a las diferencias presentadas en su constitución física y geométrica, que tienden a concentrar los esfuerzos en segmentos específicos de los culmos que componen cada arco.

Con cada grupo de arcos, se construyeron dos modelos a escala: Estructura compuesta por el Prototipo P1 y Estructura compuesta por Prototipo P2 (EP1 y EP2) (Figura 28). Ambas estructuras poseen diseño y configuraciones idénticas, con el fin de establecer cuál de los dos grupos de arcos resultaban más apropiados durante su implementación.

Figura 28. Estructura Prototipo 1 y Estructura Prototipo 2



Nota. EP1 (pequeño), Compuesto por culmos de *Otatea acuminata*. Altura máx,: 2.20 m. EP2 (grande) Compuesto por *Dendrocálamus asper* y *Filostaquis edilus*. Altura máx,: 5.40 m.

Una vez instalada cada estructura, se percibieron estables, no obstante, la simetría de cada una de ellas no era precisa debido a la sumatoria de deformaciones de los arcos utilizados en cada modelo. Además, se observó que los arcos del EP1 poseen una curvatura limitada en relación el EP2.

Las mismas fueron ejecutadas entre el mes de junio y julio del año 2022 y permanecieron en pie durante ocho meses, expuestos a la radiación solar directa y a la humedad, sin presentar problemas de estabilidad o falla de alguno de sus componentes.

La EP1 (*Otatea acuminata*) fue la estructura que mejor se conservó, lo que resulta llamativo, debido a que estos culmos no fueron preservados antes de su uso. En el caso de la EP2 (*Dendrocálamus asper* y *Filostaquis edilus*), si bien la estructura se mantuvo estable y conservó su geometría general, fue evidente la fractura de muchos de los culmos debido a la dilatación y contracción permanente del material expuesto a las condiciones climáticas.

Hallazgos

La *Otatea acuminata* resulta ser una especie simple, rápida, de fácil manipulación y flexible en relación a las otras especies.

En el mismo sentido, se señala que a diferencia de las especies de bambúes usualmente utilizadas como componentes estructurales, la *Otatea acuminata* es la única que presenta su culmo sólido, rasgo físico característico de esta especie en particular. Esto resuelve un problema recurrente en el diseño de uniones de bambú, que deben ser rellenas de mortero para evitar su aplastamiento, incrementando la complejidad, costo y huella de carbono del sistema en su conjunto.

Además, el uso de mortero añade un peso no deseado a un material que por naturaleza se presenta liviano. Por lo que el uso de culmos *Otatea acuminata* en la constitución de arcos de sección compuesta, tiende a simplificar el proceso de ejecución en relación al uso de otras especies de bambú.

Durante el proceso de selección de culmos para utilizarlos en cada arco, se realizó una clasificación de aquellos que presentaban similitudes geométricas entre sí, de modo de evitar deformaciones locales en cada arco. Una vez concluidos los arcos, se determinó una serie de variables que deben ser tenidas en cuenta si se desea conservar la geometría homogénea en cada arco. Estas variables fueron establecidas como:

Índice de conicidad: Definido por la variabilidad de los diámetros mínimo y máximo en cada extremo del culmo, cuya diferencia representa un problema de comportamiento físico-

mecánico desigual hacia cada extremo del culmo. Este valor está representado la fórmula $\%con = ((\phi_{max} - \phi_{min})/L) * 100$, siendo $\%con$ el Índice de conicidad, ϕ el diámetro máximo y mínimo, respectivamente y L el largo de la curva del arco. El *Índice de conicidad* no debe ser superior a 0.5, de acuerdo con la normativa consultada.

- **Índice de deformación:** Cada culmo posee una curvatura natural propia, que viene dada por la flecha que este posee. Si esta flecha no se mantiene dentro de un rango, la geometría final del arco corre el riesgo de presentar varias curvas a lo largo de su desarrollo.

Este índice se halla a través de la fórmula $Id = L/f$. Dónde el Id es el índice de deformación, L el largo de la curva del arco y f su flecha. El Id máximo establecido es del 15%.

- **Distancia entre uniones:** Las uniones son las encargadas garantizar la continuidad de los nervios, para conducir las cargas hasta los apoyos. La regularidad geométrica de estas y su equidistancia, resultan clave para garantizar una distribución uniforme de cargas.

Estas variables, no fueron tenidas en cuenta de manera estricta durante el proceso de selección de culmos, debido a la gran cantidad de elementos a medir. Sin embargo, deben ser tenidas en cuenta de manera orientativa durante estas tareas, ya que afectan directamente la homogeneidad de la geometría particular de cada arco, así como la estabilidad general del conjunto.

Por último, se observó que el arco presentaba mayor flexibilidad en las uniones. Esto se debe a que el nervio interrumpido perdía continuidad. Posteriormente, se decidió añadir una pieza de *Otatea acuminata* de 30 cm, a la que se denominó puente, que vincule el nervio interrumpido, otorgándole continuidad y favoreciendo una transmisión de cargas homogénea. Este ajuste fue realizado en el diseño final de la unión.

Debido a que los arcos constituidos por culmos de *Otatea acuminata* resultaron más simples de construir, de acuerdo con lo expuesto en la *Matriz de Evaluación de conformación de arcos de sección compuesta* y, considerando la carencia de ensayos referentes al desempeño mecánico de

esta especie, se decidió realizar ensayos a flexión y comprensión -esfuerzos predominantes en el funcionamiento de arcos-, con el propósito de verificar su pertinencia mecánica.

4.2 Ensayo a flexión para tres especies locales

Se fallaron tres especies de bambú disponibles en la región: *Otatea acuminata*, *Filostaquis edilus* y *Dendrocálamus asper*, con el propósito de conocer valores orientativos de sus propiedades mecánicas ante este tipo de esfuerzo, predominante en el trabajo mecánico de arcos en general. Los valores hallados para la primera especie, fueron favorables en relación a las otras especies de bambú, ampliamente aceptadas en la construcción de estructuras. Debido a que la especie utilizada en el sistema estructural propuesto fue la *Otatea acuminata*, solo se expone la tabla de valores completa para el ensayo realizado a esta especie.

Metodología

Sobre una superficie metálica vertical estable, se empotraron piezas de culmo de tres especies diferentes: *Otatea acuminata*, *Filostaquis edilus* y *Dendrocálamus asper* (en estas últimas dos especies se utilizó el segmento basal). Se prepararon 30 piezas de cada una de las especies mencionadas, excepto de *Otatea acuminata*, para la cual se utilizaron las 9 piezas disponibles al momento de realizar el ensayo. Con el uso de un micrómetro *Mitutoyo N°2052S*, ubicado en el punto 2 y fijado a la superficie metálica mediante un brazo imantado, se registró la deformación producida ante una carga conocida, a través de la aplicación de una carga puntual en el punto 1 de la **Figura 29**. Se registraron las distancias entre los puntos 1, 2 y 3, a través de las cuales se calculó el módulo de elasticidad y así se determinó la resistencia que cada especie presenta a la flexión.

Figura 29. Ensayo de culmos de bambú a flexión



Nota. a- Fallo a flexión de culmo *Dendrocálamus asper*. 1 Carga, 2 Posición de micrómetro, 3 Primer barra de empotramiento, 4 Segunda barra de empotramiento. b- Fallo de *Otatea acuminata*. c- Se utilizaron listones de madera con el propósito de distribuir de manera homogénea los esfuerzos en sus puntos de apoyo.

Resultados de ensayo para esfuerzo último a flexión

Con el propósito de solo utilizar muestras representativas, se eliminaron los valores extremos, correspondientes a las muestras 6 y 9, y se utilizó las siete muestras restantes. Se realizó un análisis estadístico, a través del cual se determinó una carga promedio para el módulo de elasticidad, y posteriormente se halló sus valores de esfuerzo último para flexión al 95%.

Tabla 4. Ensayo para esfuerzo último a flexión de *Otatea acuminata*.

Ensayo para esfuerzo último a flexión para <i>Otatea acuminata</i> - 21/10/22																	
N°	Etiqueta	H1 (%)	H2(%)	HP(%)	C. max. (kg)	L - carga- ap. (cm)	L - ap-mic. (cm)	IC p. 2.14 kg (cm)	Diám. máx. (cm)	Diám. mín. (cm)	Diám. ap. (cm)	I (cm4)	M (kgcm)	Mp (kg/cm2)	E (kg/cm ²)	%	Orden
1	OA1(22)	12.0%	12.6%	12.3%		60.00	20.00	0.50	2.20	1.70	2.09	0.94	128.40	176.38	64,300.47	100	7
2	OA2(22)	12.9%	12.8%	12.9%	17.26	60.00	22.00	0.53	1.90	1.50	1.81	0.53	128.40	266.21	125,517.78	14	1
3	OA3(22)	9.2%	9.0%	9.1%		60.00	22.50	0.75	2.00	1.20	1.83	0.55	128.40	319.30	118,494.14	71	5
4	OA4(22)	11.7%	10.3%	11.0%		60.00	17.00	0.46	2.30	1.40	2.11	0.97	128.40	206.56	64,078.93	86	6
5	OA5(22)	9.3%	8.0%	8.7%		60.00	21.00	0.24	2.40	1.90	2.29	1.36	128.40	131.60	99,242.50	57	4
6	OA7(22)	7.1%	7.8%	7.5%	26.30	60.00	20.00	0.66	1.60	1.40	1.56	0.29	128.40	346.40	138,343.43	-	-
7	OA8(22)	11.5%	11.1%	11.3%		60.00	20.00	0.46	2.00	1.50	1.89	0.63	128.40	387.52	107,876.50	29	2
8	OA9(22)	11.8%	11.3%	11.6%	26.30	60.00	20.00	0.62	1.90	1.30	1.77	0.48	128.40	319.30	115,053.76	43	3
9	OA10(22)	13.8%	12.0%	12.9%		60.00	22.00	0.63	2.20	1.30	2.01	0.80	128.40	244.03	94,116.68	-	-
Mód. Elast. E (kg/cm ²) - <i>Otatea Acuminata</i>						H1 y H2: Humedad en extremos. HP: Humedad promedio. C. máx: Carga Máxima. L - carga-ap: Distancia entre carga y apoyo. L - ap-mic: Distancia entre apoyo y micrómetro. IC p 2.14 kg: Índice de Curvatura para una carga de 2,14 kg. Diám. Mín y máx: Diámetro mínimo y máximo. Diam. ap: Diámetro en apoyo. I: Inercia. M apl: Momento aplicado para deflexión. Mp: Esfuerzo de flexión. E: Módulo elástico.											
Carga máx. (Desestimada)					138,343.43												
Carga mín. (Desestimada)					64,078.93												
Carga promedio					99,223.44	Valores de referencia para acarga promedio al 95% (kg/cm ²) para 30 culmos por especie											
Carga promedio al 95%					94,262.27	Filostaquis edilus : 38,512.9/ Dendrocálamus asper : 61,074.2											

Nota. Tabla superior, ensayos a flexión. Tablas inferiores, comparación de carga promedio al 95% para diferentes especies.

Figura 30. Muestras falladas



Nota. a- Falla por cortante de culmo de *Dendrocálamus asper*. b- Culmo de *Otatea acuminata* bajo carga. c- Fallo por cortante de culmo de *Otatea acuminata*.

Hallazgos

Los valores obtenidos para el Módulo de elasticidad de la *Otatea acuminata*, muestran un desempeño superior a las fallas realizadas durante el mismo ensayo para las especies *Dendrocálamus asper* y *Filostaquis edilus*. Con el propósito de establecer valores comparativos que permitan comprender la pertinencia de la *Otatea acuminata* en estructuras, se realizó la siguiente tabla comparativa.

Tabla 5. Tabla de referencia de ensayos para esfuerzo último de flexión.

Ensayos a flexión de especies de bambú publicadas previamente (Kgf/cm ²)			
Ensayo	Especie	Esfuerzo último a flexión	Gráfica comparativa
1	<i>Otatea acuminata</i>	94,262.27	
2	<i>Filostaquis edilus</i>	38,512.90	
3	<i>Dendrocálamus asper</i>	61,074.20	

Nota. Ensayos 1, 2 y 3 De elaboración propia.

De acuerdo a lo expuesto, se establece que los valores hallados para el esfuerzo último a flexión de los culmos de *Otatea acuminata*, se encuentran dentro de un rango aceptable para su uso en estructuras.

Dado que la cantidad de muestras disponibles al momento de realizar la prueba era baja, se decidió ensayar una segunda serie de culmos, con un total de 20 muestras, con el propósito de obtener valores más representativos.

4.3 Ensayo a flexión para *Otatea acuminata*

Con el propósito de ampliar el conocimiento acerca del comportamiento mecánico para esfuerzos de flexión para esta especie, se realizó una búsqueda de este tipo de ensayos que resultó infructuosa. Por este motivo, y para ampliar el número de ejemplares fallados en la prueba anterior, se ensayó un segundo grupo de 20 muestras de *Otatea acuminata*, de modo tal de conocer valores estadísticamente más representativos.

Metodología

Se realizó un pedido a la localidad de Chiquilistlán de 2100 piezas en total, con cuya cantidad se llevó a cabo el presente ensayo y con la que, además, se construyó la totalidad de la estructura expuesta en el *CAPÍTULO V*.

El pedido fue realizado en la segunda quincena del mes de noviembre de 2022, con el fin de hacer coincidir el momento de la cosecha con el cuarto menguante del calendario lunar de ese mes. Esto se debe a que este es el momento más adecuado para la cosecha de culmos. El pedido llegó a las instalaciones de Campus Universitario del ITESO antes del mes de diciembre.

Todas las piezas fueron dispuestas una al lado de la otra, de manera horizontal sobre cuatro listones de madera, que lo separaban de una superficie metálica que, a su vez, las separaba del contacto directo con el piso. Los culmos fueron estacionados hasta la segunda quincena de enero,

para sumar un total de tres meses de reposo. Estos se encontraban bajo la sombra permanente de árboles que lo protegían. Cabe señalar que, durante este período del año, no se registran lluvias en la ciudad de Guadalajara, por lo que no resultó necesario protegerlos contra la acción del agua. Una vez pasado este período, se procedió a cortar cada uno de los culmos en piezas de 1.50 m y se los trasladó al laboratorio, para un total de 20 muestras a ser ensayadas.

Antes de realizar el ensayo, se ubicaron dos apoyos separados 1 m uno del otro, estos, estaban constituidos por un par de perfiles metálicos tubulares a cada extremo. Luego, se apoyó la muestra que se iba a ensayar y, por sobre esta, se dispuso una montura de madera con dos puntos de apoyo, que distribuía la carga aplicada por la máquina a las 2/3 partes del claro salvado, de acuerdo con lo establecido en la Normativa ISO 22157 (2019). Antes de cada ensayo, se volvió a controlar la humedad de cada pieza en dos puntos distintos, para garantizar que el promedio de humedad de cada pieza fallada sea siempre inferior al 12%

Los fallos fueron realizados con una máquina de testeo universal marca *Shimadzu Corporation*, modelo *UH-1000KN*, N° *121104300119*, a una velocidad de compresión de 20 mm por minuto.

Figura 31. Ensayo de 20 piezas de *Otatea acuminata* a flexión.



Nota. a- Maquina de testeo universal y culmo de 1.50 m de largo. Separación entre apoyos de 1 m.

Resultados

Una vez realizado el ensayo, se hizo un análisis estadístico descartando los valores extremos, a través del cual se determinó que la carga promedio para el esfuerzo último a flexión al 95%, es de 187,614.11 Kg/cm².

Tabla 6. Valores registrados para el ensayo de esfuerzo último a flexión

Ensayo para esfuerzo último a flexión para <i>Otatea Acuminata</i> - 28/02/23																
N°	Etiqueta	H1 (%)	H2 (%)	HP (%)	Diám. 1y2 (mm)	Diám. Prom. 1y2 (mm)	Diám. 3y4 (mm)	Diám. Prom. 3y4 (mm)	Dist. Ap. (cm)	Máx. Desp. (mm)	I (cm ⁴)	Mu Kg-cm	Mr Kg/cm ²	E (kg/cm ²)		
1	OA11(23)	15.60	14.00	14.80	30	29	29.5	24	25	24.5	100.00	79.84	2.61	2328.35	1204.92	119,029.64
2	OA12(23)	10.50	10.80	10.65	23	23	23	18	21	19.5	100.00	79.35	1.00	2277.37	2417.44	305,327.15
3	OA13(23)	10.90	11.40	11.15	24	24	24	21	23	22	100.00	53.57	1.37	1751.57	1466.37	253,462.71
4	OA14(23)	11.50	13.40	12.45	25	24	24.5	21	20	20.5	100.00	96.67	1.26	1356.44	1212.97	118,760.60
5	OA15(23)	10.40	10.80	10.60	28	26	27	22	21	21.5	100.00	73.44	1.70	1154.62	824.71	98,622.09
6	OA16(23)	15.50	11.50	13.50	28	28	28	24	23	23.5	100.00	72.88	2.16	1240.66	740.15	83,994.30
7	OA17(23)	19.80	11.80	15.80	31	29	30	25	22	23.5	100.00	74.75	2.51	1325.63	705.43	75,131.27
8	OA18(23)	11.40	14.50	12.95	27	27	27	23	23	23	100.00	73.79	1.92	1588.00	1035.21	119,514.15
9	OA19(23)	10.70	10.80	10.75	22	23	22.5	23	23	23	100.00	74.14	1.31	1412.73	1222.12	154,302.86
10	OA20(23)	11.60	10.50	11.05	22	21	21.5	19	19	19	100.00	76.46	0.83	1926.83	2363.57	325,114.74
11	OA21(23)	11.30	15.60	13.45	25	29	27	24	22	23	100.00	69.53	1.92	1163.11	758.23	92,895.35
12	OA22(23)	12.90	13.80	13.35	21	20	20.5	16	18	17	100.00	66.50	0.61	2011.82	3108.74	530,948.98
13	OA23(23)	11.40	10.50	10.95	22	24	23	19	20	19.5	100.00	68.98	1.00	2058.55	2185.17	317,463.71
14	OA24(23)	11.80	13.20	12.50	25	22	23.5	20	18	19	100.00	69.49	1.00	1531.70	1625.91	234,487.33
15	OA25(23)	11.40	10.50	10.95	27	26	26.5	22	23	22.5	100.00	69.44	1.77	1169.49	810.02	101,397.07
16	OA26(23)	11.00	11.60	11.30	24	22	23	20	18	19	100.00	69.19	0.95	1799.37	1979.07	290,057.78
17	OA27(23)	11.50	14.80	13.15	21	29	25	20	24	22	100.00	69.91	1.50	1807.87	1418.94	183,938.34
18	OA28(23)	11.90	12.50	12.20	26	25	25.5	21	21	21	100.00	69.16	1.43	1637.92	1327.47	175,820.25
19	OA29(23)	10.40	10.80	10.60	29	27	28	20	20	20	100.00	69.42	1.63	1506.21	1109.82	141,859.75
20	OA30(23)	10.50	11.50	11.00	21	22	21.5	17	19	18	100.00	69.86	0.75	2149.90	2842.61	438,745.86
Carga mín. (desestimada)					75,131.27		REFERENCIAS: H1 y H2: Humedad en extremos. HP: Humedad promedio. Diám 1 y 2: Diámetros tomados perpendicularmente entre sí en un extremo. Diám. Prom. 1 y 2: Diámetro promedio para 1 y 2. Diám 3 y 4: Diámetros tomados perpendicularmente entre sí en el otro extremo. Diám. Prom 3 y 4: Diámetro promedio para 3 y 4. Dist. Ap: Distancia entre apoyos. Máx Dexp: Máximo desplazamiento. I: Inercia. Mr: Momento de ruptura. E: Módulo elástico.									
Carga máx. (desestimada)					530,948.98											
Carga promedio					197,488.54											
Carga promedio al 95%					187,614.11											

Nota. Tabla de ensayo a flexión con apoyos en ambos extremos de la muestra. Valores superiores, ensayos a flexión. Valores inferiores, resultado de carga promedio al 95% para *Otatea acuminata*.

Hallazgos

En la tabla presentada a continuación, se incluyeron los valores expuestos en la *Tabla 5*, además de los hallados en este ensayo, y se realizó un comparativa con el propósito de determinar la fiabilidad de la *Otatea acuminata* para este tipo de esfuerzos.

Tabla 7. Comparación de valores de esfuerzo último a flexión en diferentes especies de bambú utilizadas en estructuras.

Ensayos a flexión de especies de bambú publicadas previamente (Kgf/cm ²)			
Ensayo	Especie	Esfuerzo último a flexión	Gráfica comparativa
1	<i>Otatea Acuminata</i>	94,262.27	
2	<i>Filostaquis Edilus</i>	38,512.90	
3	<i>Dendro Cálamus Asper</i>	61,074.20	
4	<i>Otatea Acuminata (2do. Ensayo)</i>	187,614.11	

Nota. Esta tabla presenta la misma información que la *Tabla 5*, más el valor hallado en este ensayo.

De elaboración propia.

Cabe señalar que, la diferencia entre los valores hallados para el primer ensayo y el segundo ensayo de *Otatea Acuminata*, se deben a que en el primero, se empotró un extremo y se cargó el otro, de este modo, no solo se hacen presente esfuerzos a flexión sobre el culmo, sino que también existen esfuerzos cortantes. Para el segundo ensayo de *Otatea acuminata*, se apoyaron ambos extremos, por lo que los esfuerzos son exclusivamente a flexión, y por esto, los valores arrojados son superiores.

De acuerdo a lo expuesto, se verifica que los valores hallados para esfuerzo último de flexión, los culmos de *Otatea acuminata* poseen un desempeño mecánico aceptable, ubicado dentro del rango establecido para especies utilizadas en estructuras.

Además, se observó que, a mayor contenido de humedad en la muestra, se incrementan los valores arrojados para módulo elástico (E).

4.4 Ensayo a compresión para *Otatea acuminata*

Metodología

De los culmos utilizados para la ejecución del arco Prototipo P1, presentado en el apartado

4.1 *Evaluación de arcos de sección compuesta*, en el que se describe el proceso de cosecha y

almacenado, se prepararon 30 piezas de *Otatea acuminata*, 15 con nudo y 15 sin nudo, de acuerdo a lo establecido en la Normativa ISO 22157 (2019). Los fallos fueron realizados con una máquina de testeo universal marca *Shimadzy Corporation*, modelo *UH-1000KN*, N° 121104300119, a una velocidad de compresión de 5 mm por minuto.

De acuerdo con lo establecido por la normativa mencionada, se verificó que la humedad de cada pieza fallada sea siempre inferior al 12%, así como las proporciones de cada muestra, donde la altura no debe ser superior el doble del diámetro.

Figura 32. Ensayo de piezas de *Otatea acuminata* a compresión.

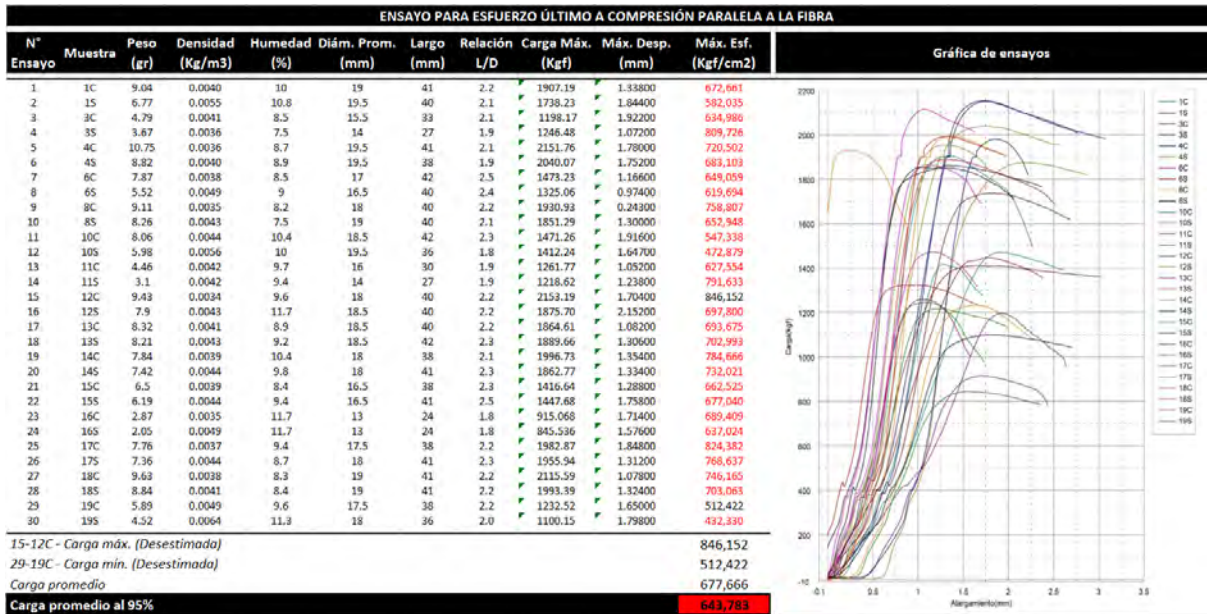


Nota. a- Máquina de testeo universal. b- Proceso de fallo. c- Muestras falladas

Resultados

Con el propósito de solo utilizar muestras representativas, se eliminaron los valores extremos, correspondientes a las muestras 15 y 29, y se utilizó las 28 muestras restantes. Se realizó un análisis estadístico, a través del cual se determinó una carga promedio para el esfuerzo último a compresión (*Tabla 8*). La carga promedio al 95% es de 643.783 kgf/cm².

Tabla 8. Valores registrados para el ensayo de esfuerzo último a compresión paralela



Nota. Tabla izquierda, registro de características de muestras y comportamiento mecánico.

Diagrama derecho, deformación de muestras ante incremento de cargas.

Figura 33. Muestras falladas



Nota. a, b y c- Fallo diagonal. d, e y f- Fallo horizontal

Hallazgos

Se realizó una búsqueda de valores correspondientes a esfuerzo último para compresión paralela al eje axial, para especies ampliamente aceptadas en estructuras, y se realizó un comparativa con el propósito de determinar la fiabilidad de la *Otatea acuminata*.

Tabla 9. Comparación de valores de esfuerzo máximo para compresión paralela en especies utilizadas en estructuras.

Ensayo	Especie	Lugar de procedencia	Secc. Culmo Inferior (Mpa)	Secc. Culmo Inferior (Kg/cm2)	Gráfica comparativa para esfuerzos máximo en compresión paralela a la fibra en condición seca para nudos y entrenudos
1	<i>Guadua Aculeata</i>	Puebla	47.9	488.45	
2	<i>Guadua Aculeata</i>	Veracruz	42.33	431.65	
3	<i>Guadua Amplexifolia</i>	Veracruz	25.1	255.95	
4	<i>Guadua Amplexifolia</i>	Veracruz	25.95	264.62	
5	<i>Guadua Velutina</i>	Tabasco	29.3	298.78	
6	<i>Guadua Paniculata</i>	Campeche	12.28	125.22	
7	<i>Guadua Angustifolia</i>	Chiapas	51.26	522.71	
8	<i>Guadua Ang. var. Macana</i>	Colombia	50.63	516.28	
9	<i>Guadua Angustifolia</i>	Colombia	38.1	388.51	
10	<i>Guadua Angustifolia</i>	Colombia	34.65	353.33	
11	<i>Otatea Fimbriata</i>	Chiapas	41.45	422.67	
12	<i>Otatea Acuminata</i>	Jalisco	63.13	643.78	

Nota. Ensayos del N°1 al N°11: tomado de Llaven José et al. (2019). Ensayo N°12: de elaboración propia.

De acuerdo a lo expuesto, se establece que los valores hallados para esfuerzo máximo a compresión paralela, los culmos de *Otatea acuminata* poseen un desempeño mecánico aceptable, ubicado por encima del rango establecido para especies utilizadas en estructuras.

4.5 Ensayo a flexión para uniones

Una vez realizados los ensayos correspondientes al desempeño mecánico de la especie que se pretende utilizar en el sistema, se ensayaron las uniones propuestas para el arco de sección compuesta. Para el diseño de estas uniones, se tuvo en cuenta la Normativa Ecuatoriana de la Construcción (2016), la Norma Técnica E100 de Perú (2012) y el Código de seguridad para andamios de bambú (2017). Estas propuestas de uniones fueron complementadas entre sí y se sustituyeron los materiales utilizados con otros de bajo costo y fácil disponibilidad, con el propósito de adaptarlos a los recursos materiales del lugar.

El propósito de este ensayo es evaluar si la unión propuesta garantiza la continuidad de la transmisión de cargas, teniendo en cuenta que, en cada unión, uno de los nervios se ve interrumpido debido el cambio de culmo. Esta interrupción es resuelta con un culmo de 30 cm -denominado puente- vinculado a ambos extremos de los culmos a través de tornillos, y al resto de los nervios a través del zuncho.

Metodología

De la misma partida de 2100 culmos solicitada a Chiquilistlán, expuesta en el apartado *Metodología de 4.3 Ensayo a flexión para Otatea acuminata* (p. 93), se tomaron las piezas necesarias para realizar el presente ensayo. En dicho apartado, se menciona el proceso de secado y almacenado de las muestras.

Se fabricaron 3 piezas de 1.50 m de largo cada una, que posteriormente fueron falladas. La unión está compuesta por tres nervios, de los cuales dos tienen continuidad y el tercero es interrumpido. Este último es asegurado a través de una pieza denominada “puente”, que se conecta con ambos culmos utilizando tornillos metálicos con cabeza integrada de 3/16” de diámetro y 3” de largo, 4 arandelas y 2 tuercas, que fueron reforzadas con zunchos de 1.30 m de largo, que aseguraban el racimo completo de nervios tal y como se muestra en la siguiente figura.

Se ensayaron 7 muestras en total. Todas con idéntica configuración, excepto que tres de ellas fueron realizadas con Ixtle, cuerda compuesta por fibras orgánicas, tres con rafia sintética de 6 mm de diámetro, cuerda compuesta con fibras de polietileno y una con precinto plástico de la marca Volteck (largo de 300 mm, ancho de 7.6 mm y resistencia a la tensión de 54.4 kgf) disponibles en el mercado local.

Figura 34. Unión ensayada para zunchos de Ixtle.



Nota. Las otras cinco uniones falladas conservaron la misma configuración y materiales, excepto por el zuncho, que se sustituyó con el propósito de probar alternativas.

Antes de realizar el ensayo, se ubicaron dos apoyos separados 1 m uno del otro, estos estaban constituidos por un par de perfiles metálicos tubulares a cada extremo, los cuáles fueron vinculado con una cadena para evitar que el empuje lateral de la prensa tienda a separarlos. Luego, se apoyó la muestra que se iba a ensayar y, por sobre esta, se dispuso una montura de madera que distribuía la carga en dos puntos de la muestra, ubicados a las 2/3 partes del claro salvado, de acuerdo con lo establecido en la Normativa ISO 22157 (2019). Los fallos fueron realizados con una máquina de testeo universal marca *Shimadzu Corporation*, modelo *UH-1000KN*, N° 121104300119, a una velocidad de compresión de 20 mm por minuto.

Figura 35. Ensayo de uniones a flexión.

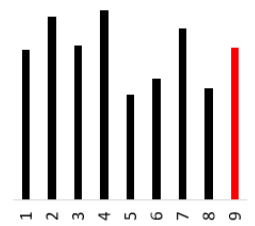


Resultados

Se exponen los valores para Momento último (M_u) para las ocho muestras falladas y se establece como valor de referencia, el M_u promedio de tres culmos de *Otatea acuminata*, que fue extraído de los ensayos presentados en el apartado 4.3 *Ensayo a flexión para Otatea acuminata*.

Tabla 10. Ensayo de uniones a flexión.

Parametro	Max_Carga	Max_Despl	Material	Dist. Ap	Dist. Carga	Mu	Gráfica comparativa
Unidades	kgf	mm		cm	cm	Kgf.cm	
1	328.731	114.824	Ixtle	93.00	31.00	5095.33	7000
2	400.876	102.266	Ixtle	93.00	31.00	6213.58	6000
3	336.57	91.643	Ixtle	93.00	31.00	5216.84	5000
4	548.99	33.02	Precinto plást.	70.00	23.33	6404.88	4000
5	229.372	52.97	Rafia plástica	93.00	31.00	3555.27	3000
6	264.871	84.236	Rafia plástica	93.00	31.00	4105.50	2000
7	373.599	81.268	Rafia plástica	93.00	31.00	5790.78	1000
8	243.33	50.208	Rafia plástica	93.00	31.00	3771.62	0
9	Momento último para 3 culmos de <i>Otatea Acuminata</i> de acuerdo con apartado 4.3					5159.21	
	Ensayo a flexión para <i>Otatea Acuminata</i> - Esfuerzo (M_r) = 1177.90 Kg/cm ²						



Exceptuando las muestras 5, 6 y 8, los valores alcanzados para este tipo de esfuerzo, superan el valor de referencia establecido. En este sentido, cabe señalar que los ensayos 5, 6, y 8 fueron realizados con los mismos culmos utilizados para los fallos 1, 2, 3 y 4, a los que se les substituyó el zuncho orgánico por el zuncho sintético. Esta decisión, puede explicar por qué estos valores no superaron el valor de referencia. Sin embargo, durante el ensayo, el zuncho sintético no exhibió ningún tipo de daño aparente (**Figura 35**).

Hallazgos

La configuración, dimensiones y materiales propuestos para esta unión, garantizan la continuidad del nervio interrumpido, y por ello se puede afirmar que la unión trabaja de manera conjunta, favoreciendo una transmisión de cargas homogéneas ante esfuerzos de flexión.

4.6 Conclusiones sobre el uso de “otate” en estructuras

Las propiedades físico-mecánicas de la *Otatea Acumina*, tanto para esfuerzos de flexión como de compresión, la postulan como una especie apta para su uso en estructuras. Esto resulta relevante, ya que no se encontraron estudios previos, dedicados a determinar el potencial uso de esta especie con este propósito. Lo hallado durante el proceso de revisión documental, se reduce a un estudio a compresión para la especie *Otatea Fimbriata Soderstrom*, realizada en Chiapas, México (Llaven José et al., 2019).

El proceso de ejecución de las estructuras constituidas por arcos (EP1 y EP2), presentadas en el apartado 4.1 *Ensayo de arcos de sección compuesta*, expone el potencial de la *Otatea acuminata*

para su uso en estructuras, ya que resultan más simples de curvar, evitando complejizar el proceso constructivo, disminuyendo costos y huella de carbono.

Otro aspecto relevante en relación al uso de esta especie en la construcción de estructuras, está vinculado a la simpleza que presentan sus uniones. Como se mencionó, las uniones en las estructuras de bambú exhiben un problema recurrente debido al aplastamiento que se produce en la zona internodal. Este fenómeno, obliga a los constructores que trabajan con este material a rellenar estas zonas con mortero o piezas de madera, incrementando el peso propio del sistema en estos puntos y complejizando la fabricación de la unión. La *Otatea acuminata* se caracteriza por ser una especie con culmo sólido, por lo que el riesgo de aplastamiento disminuye notoriamente y que pudo ser apreciado durante la fabricación de las uniones con ambos tipos de culmos, además de simplificar la fabricación de las uniones y la cantidad de materiales requeridos.

En relación al sistema estructural en sí, es necesario tener en cuenta el *Índice de conicidad*, el *Índice de deformación* y la regularidad de sus uniones, que tienden a distribuir las cargas de manera homogénea a lo largo del arco, evitando así deformaciones locales que produzcan asimetrías, que luego son trasladadas al sistema estructural en su conjunto. Ninguna de estas variables fue incluida de manera rigurosa en el proceso de fabricación de los arcos, debido al tiempo que requeriría dimensionar, calcular, clasificar y ordenar todos los culmos involucrados en cada pieza. Sin embargo, estos aspectos fueron tenidos en cuenta, ya que se buscó que los diámetros de empalme y las flechas de estos sean similares, así como en el cuidado de que cada pieza tenga el mismo largo e idéntica separación entre uniones.

En la medida en que los culmos que conforman cada arco de sección compuesta sean más largos, menor serán la cantidad de uniones utilizadas y en consecuencia, se requerirá menor tiempo de elaboración y de empleo de recursos, no obstante, el *Índice de conicidad* tiende a ser mayor y por ello, el diámetro a lo largo de la sección del arco ya construido, tiende a presentar mayores

diferencias, lo que resulta contraproducente en la distribución homogéneas de cargas. Para este ejercicio, la dimensión de 1.50 m resultó la más adecuada.

El diseño de cada unión propuesta cumple su función, ya que garantiza la continuidad del nervio interrumpido, y por ello una correcta transmisión de cargas a lo largo del arco. El uso de diferentes tipos de zuncho, presentó diferentes escenarios. Mientras que el precinto plástico resuelve el problema de manera práctica, debido a la velocidad de instalación y a las prestaciones mecánicas, también eleva los costos de cada pieza. Con el uso de ixtle, cuerda compuesta por hilos orgánicos, se observó que tiende a perder tensión después de ser instalado, lo que compromete su desempeño mecánico y el de la unión en su conjunto. Por último, la rafia sintética, cuerda compuesta por hilos de polietileno, fue utilizada con éxito en los prototipos P1 y P2 presentados en el apartado *4.1 Evaluación de arcos de sección compuesta*, los cuales estuvieron expuestos a la radiación solar directa y las precipitaciones de los períodos más lluviosos de Guadalajara, durante un período de ocho meses, sin exhibir daños aparentes que comprometan su integridad física.

CAPÍTULO V: Ejecución de un sistema estructural en el territorio

Introducción

Este capítulo contiene información referente a la ejecución de un prototipo en el territorio, con el propósito de dilucidar aquellos aspectos del sistema estructural que puedan ser mejorados e incluirlos en la propuesta final, que será sintetizada en una guía para ejecutar arcos de sección compuesta. Posteriormente, esta guía será difundida y puesta a disposición de aquellas comunidades rurales que deseen conocer el sistema.

El capítulo está dividido en dos partes, la primera, relacionada al diseño del sistema estructural en sí. Para la cual se realizaron una serie de exploraciones y evaluación de alternativas a

través diferentes combinaciones de sistemas compuestos por arcos y que, posteriormente, se decidió ejecutar una de ellas.

La segunda parte del capítulo, expone la construcción, registro y evaluación general de la ejecución completa del sistema estructural, que abarca el proceso de construcción de cada uno de los componentes del sistema en las instalaciones del ITESO, su posterior traslado a la localidad de Comala, próxima Chiquilistlán, en el estado de Jalisco y el proceso de la instalación de la cubierta en su sitio final.

Esta investigación centra su desarrollo en los materiales y componentes del sistema estructural en sí, sin embargo, durante el período de construcción del proyecto, se presentaron diversos inconvenientes relacionados con dinámicas sociales de la comunidad en la que se estaba trabajando que influyeron directamente en el desarrollo del proyecto. Estas eventualidades fueron tenidas en cuenta las conclusiones del proyecto dado que resultan de interés para la difusión del sistema y de futuras investigaciones que pretendan realizar un proceso de similares características.

5.1 Diseño del sistema estructural

Metodología

La primera parte del diseño de cubierta tuvo en cuenta indicaciones generales realizadas por los futuros usuarios, entre las cuales se mencionó una superficie de uso aproximada de 30 m² y un uso multipropósito relacionado a actividades comerciales dentro de un complejo turístico llamada “Cascadas de Comala”.

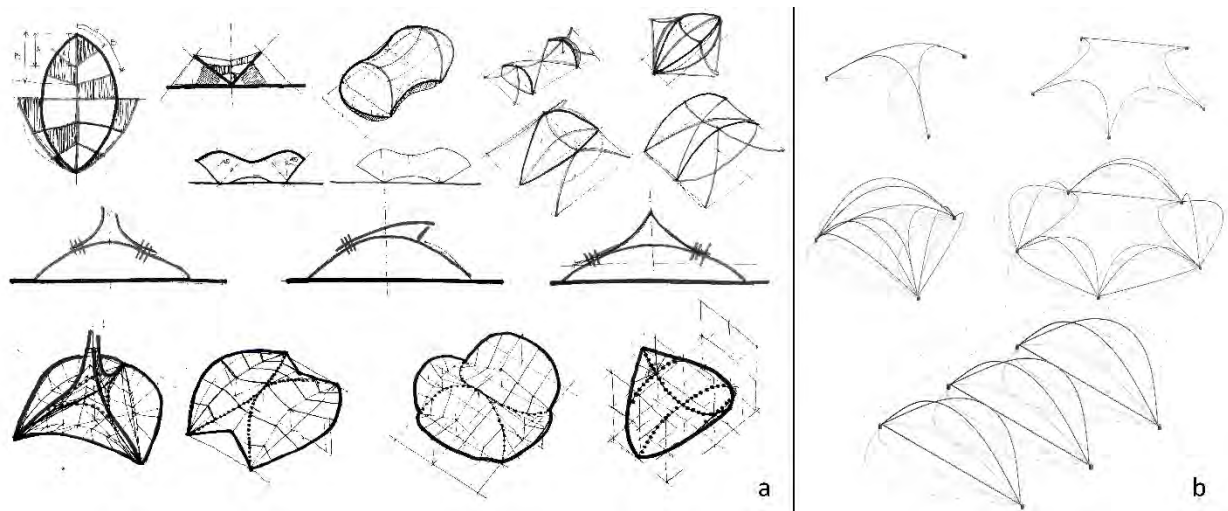
Durante estas exploraciones, se consideraron dos conceptos principales aplicables a sistemas estructurales, el primero fue de *doble curvatura*. Debido a la sucesión de superficies cóncavas y convexas de este tipo de estructuras, el sistema incrementa su rigidez y estabilidad, lo que le confiere propiedades idóneas para salvar grandes claros. El arquitecto español-mexicano Felix Candela, trabajó este concepto a mediados del siglo pasado, logrando delgadas superficies de concreto reforzado que cubrían grandes espacios. En segundo lugar, se tuvo en cuenta el concepto

de *diagrid* (grilla diagonal), utilizado en la actualidad por arquitectos como Norman Foster, quienes lo adoptan debido que optimizan los sistemas estructurales para atender aspectos relacionados con la estabilización general del sistema. Esta grilla diagonal, tiende a dirigir los movimientos laterales - tales como el viento o movimientos telúricos- hacia sus apoyos de manera más efectivas que las grillas ortogonales, usualmente utilizadas.

Este proceso incluyó la exploración de diferentes tipologías de sistemas estructurales basado en la combinación de arcos, cada uno de estos diseños evolucionó a una cantidad total de 3 versiones diferentes entre sí, que fueron evaluadas y comparadas.

Debido a la eficacia y versatilidad del recurso, las primeras exploraciones fueron realizadas a través de croquis que, posteriormente, fueron digitalizados para cotejar las dimensiones y proporciones generales de cada uno de los componentes que integraban la propuesta. Con el propósito de adoptar pautas y criterios adecuados de diseño, este proceso tuvo en cuenta edificios construidos que utilizaban la combinación de arcos de bambú en su estructura. Se realizó una revisión amplia de autores de diferentes partes del mundo, incluido México. En este sentido, se debe hacer especial mención de dos equipos de trabajo específicos que fueron de gran interés; Jörg Stamm (2023) e IBUKU (2023), ya que orientaron el diseño del sistema en términos técnicos y constructivos.

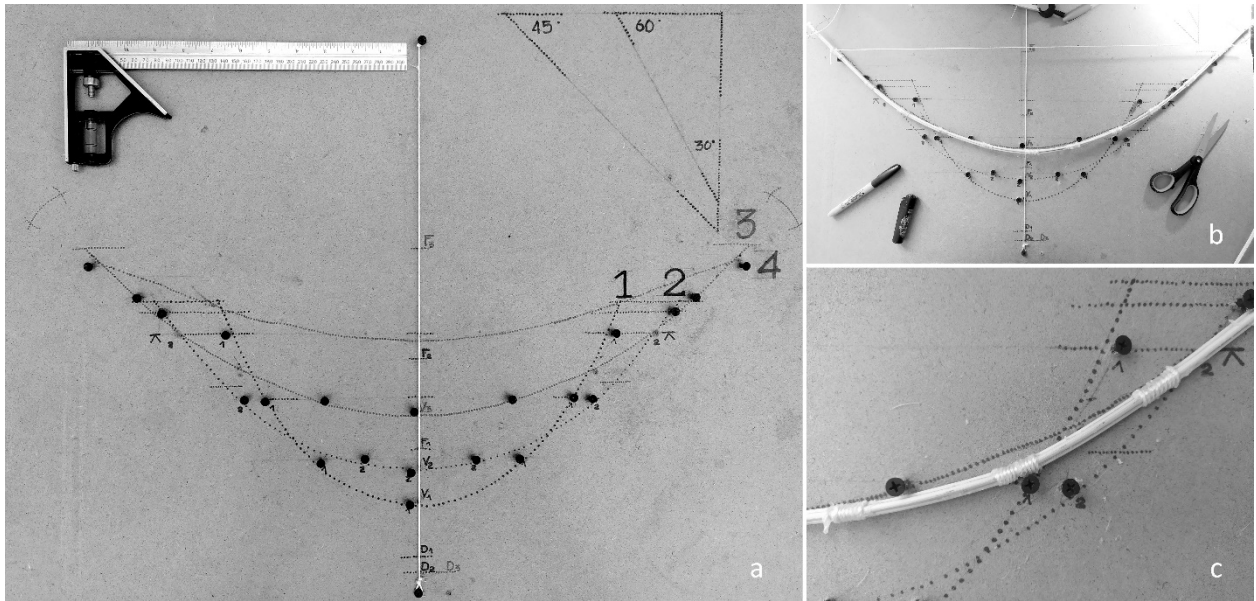
Figura 36. Exploración inicial basada en croquis y verificaciones digitales.



Nota. El ejercicio centró su atención en las variables tipológicas que se podrían alcanzar con diferentes combinaciones de arcos. a- Croquis con marcadores y micro puntas; b- Modelos digitales, cúpulas y bóvedas. Software utilizado: Autodesk® Revit® 2021.

Una vez definidos aquellos conceptos estructurales que se consideraron más adecuados para resolver el problema planteado, se procedió a la construcción de modelos analógicos a escala, con el objetivo de comprender con mayor precisión el comportamiento mecánico de cada propuesta. Para ello, se construyó un tablero de MDF en el que se establecieron cuatro tipos de curvas diferentes, con el fin de probar alternativas. Se trazaron tres parábolas y una catenaria que, mediante el uso de tornillos auto-perforantes, se definió el molde que restringiría la posición de cada arco a construir (*Figura 37*). A continuación, se presenta el tablero utilizado, sus curvas y algunas dimensiones que se adoptaron como referencia para construir los modelos.

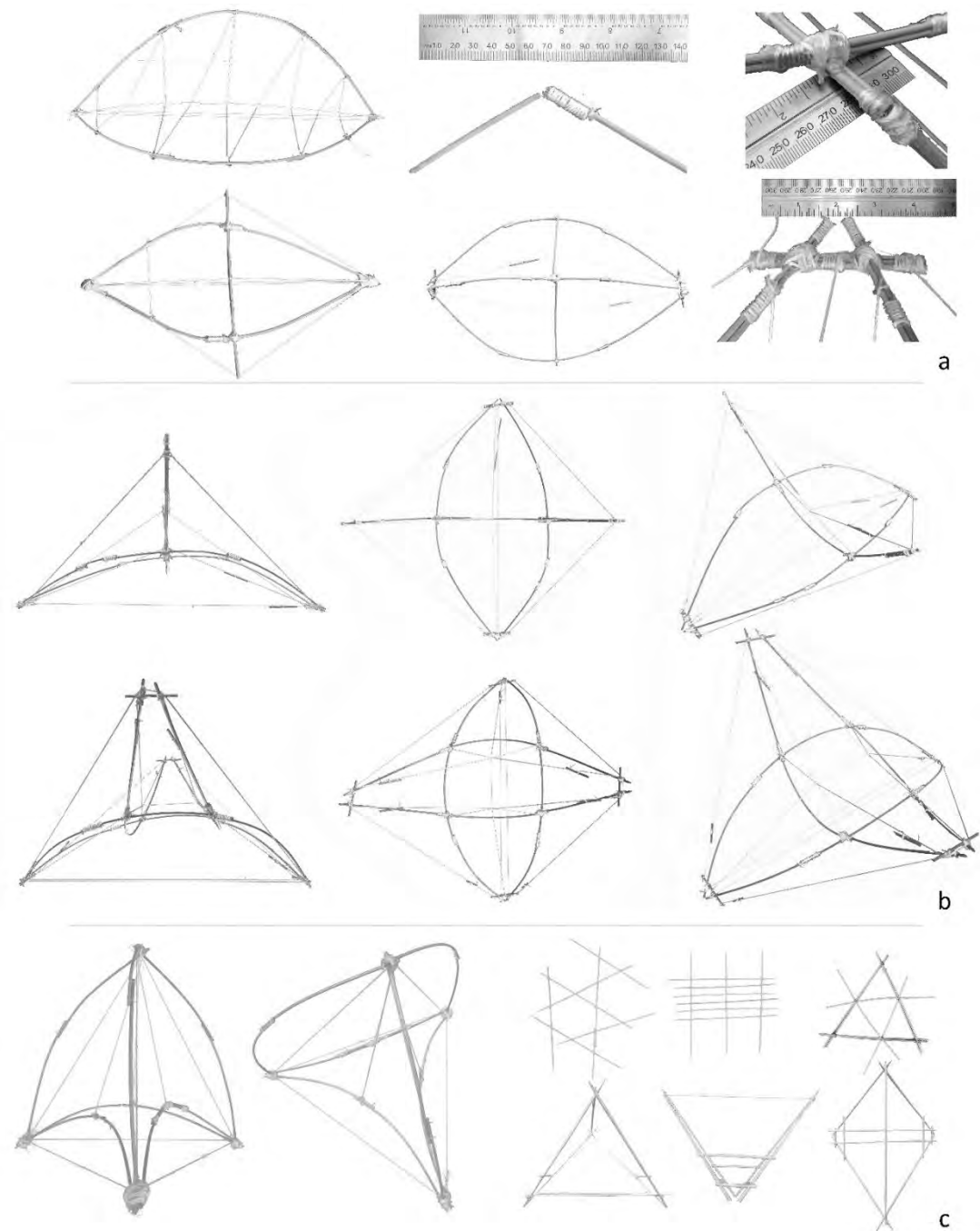
Figura 37. Tablero MDF de conformación de arcos parabólicos y catenarios



Nota. a- Tablero de MDF de 75x60 cm. Curva 1, 2 y 3: parábolas halladas a través de técnicas de geometría descriptiva. Curva 4: Catenaria hallada utilizando una cadena metálica. b- Proceso de montaje de arcos. c- Desviación en un segmento del arco.

Los arcos fueron conformados con palillos para brocheta y conectados con alambre inicialmente, e hilo y silicona después, debido a que la fabricación resultaba más rápida y estable. Luego, fueron dispuestos y combinados de diferentes maneras, tratando de conservar su tensión a partir de cables que conecten puntos críticos de cada sistema. Se realizaron un total de 34 modelos analógicos, de los cuales se presentan los más relevantes. A continuación, se expone una serie de imágenes de este proceso.

Figura 38. Modelos analógicos desarrollados con parábolas y catenarias

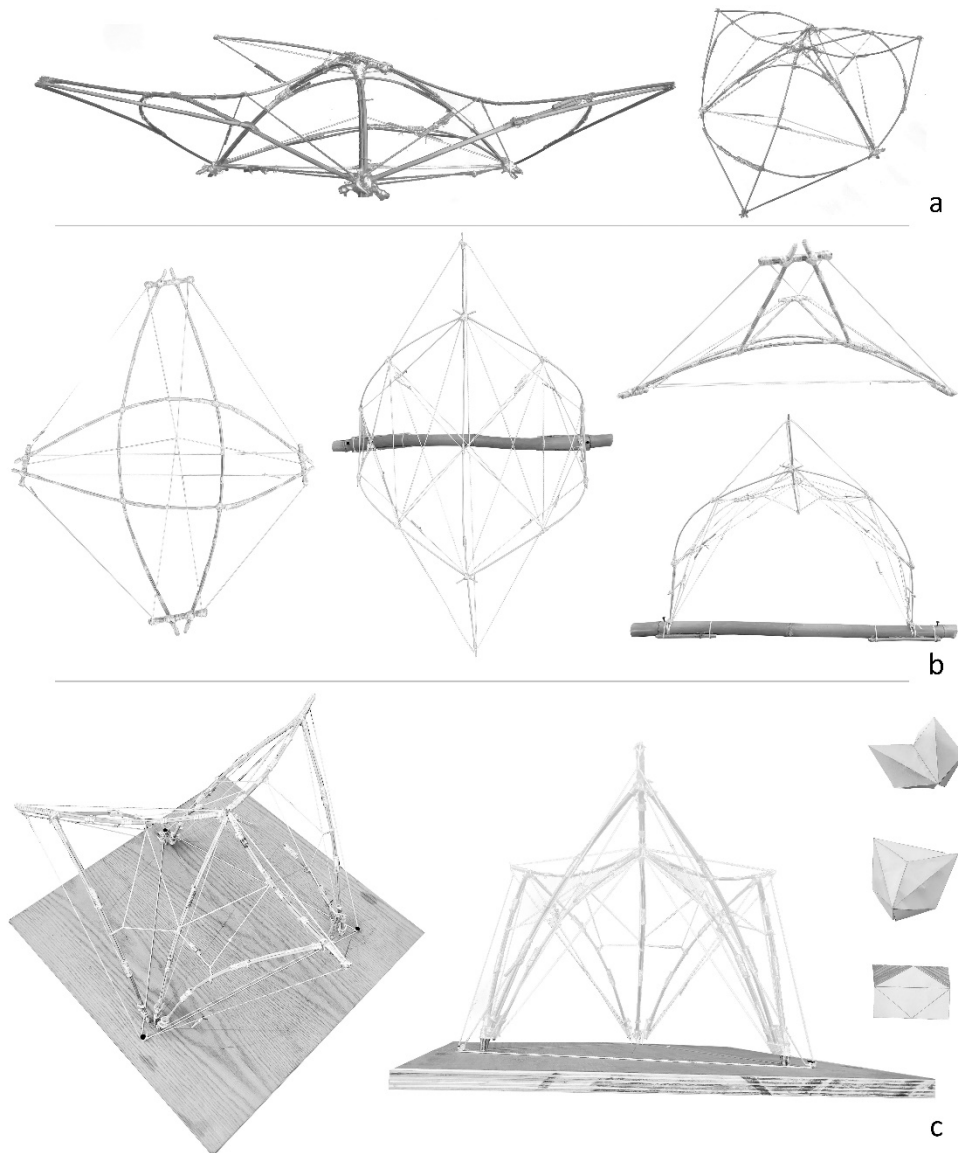


Nota. a- Cuatro alternativas de los primeros modelos de sistemas y uniones. b- Sistemas estructurales biarticulados, dos alternativas del mismo concepto. La cubierta asume una geometría de doble curvatura que sostiene la tensión en el resto del sistema. c- Exploraciones alternativas basadas tejidos y tetraedros.

Estas aproximaciones fueron clasificadas tipológicamente y, posteriormente, se procedió a realizar modelos analógicos más grandes de aquellos sistemas que representaban una alternativa

plausible. Se exploraron algunas variantes del mismo tipo de propuesta. A continuación, se exponen los modelos ejecutados, todos ellos basados en la *doble curvatura* como concepto rector.

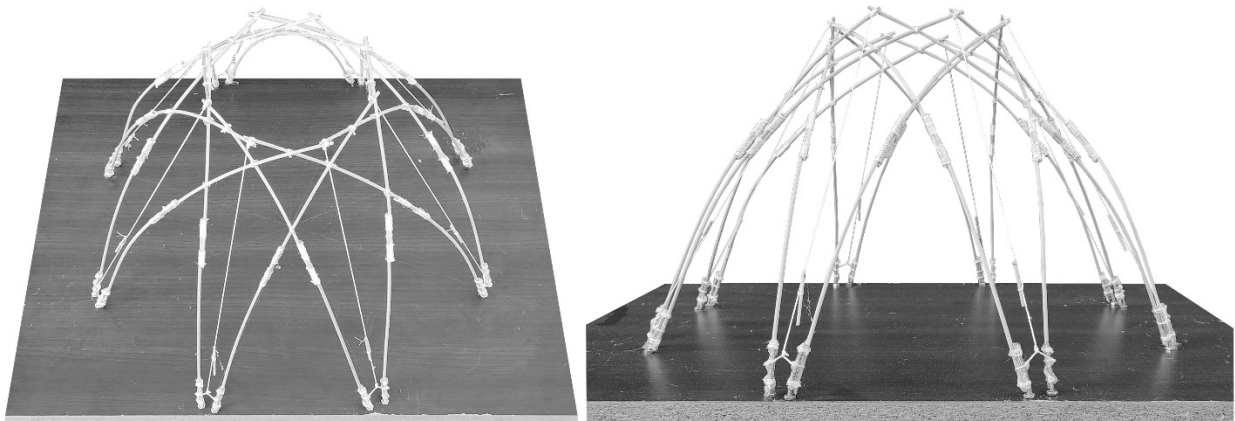
Figura 39. Modelos completos de dos y tres articulaciones para sistemas de doble curvatura



Nota. a- Modelo biarticulado completo, compuesto por tres módulos vinculados entre sí (Distancia entre apoyos: 60 cm. Alto 20 cm). b- Alternativas de módulos únicos de dos articulaciones (Distancia entre apoyos 80 cm. Alto: 25 cm) y tres articulaciones (Distancia entre apoyos: 60 cm y alto 45 cm). c- Modelo tri-articulado completo, compuesto por tres módulos vinculados entre sí (Distancia entre apoyos: 45 cm. Alto 45 cm). Columna derecha, superficie envolvente.

Los modelos hasta aquí presentados parten del concepto de *doble curvatura*, en estos se explora algunas alternativas basadas en diferentes tipos de apoyos y cantidad de componentes. Posteriormente, se desarrolló y construyó un modelo basado en el concepto de *diagrid*. Este estaba conformado por 16 arcos con la misma longitud y flecha, que fueron dispuestos sobre ocho apoyos equidistantes entre sí. En esta propuesta, cada arco alcanzaba su opuesto en la parte más alta de la estructura, vinculándose entre sí a partir de una unión zunchada, como se expone en la *Figura 40*.

Figura 40. Modelo de sistema que utiliza el concepto de *diagrid*



Nota. Estructura principal de propuesta. Distancia entre apoyos: 70 cm. Altura, 40 cm.

Una vez definidas las alternativas de sistemas estructurales que se consideraron adecuadas para su ejecución el territorio, se digitalizó cada modelo, se contabilizó y dimensionó cada componente y se los valoró a través de dos matrices de evaluación (*Tabla 11* y *Tabla 12*), en la que se determinó, en primera instancia, la idoneidad de los componentes del sistema estructural y posteriormente, la idoneidad de la cubierta en sí, de acuerdo con las variables planteadas para cada matriz.




Resultados de modelos analógicos

En la primera matriz, de evaluación de componentes del sistema estructural, (*Tabla 11*), se hallaron las dimensiones y cantidades de los componentes para cada versión de los sistemas

estructurales desarrollados. Estas versiones fueron dispuestas en las filas, a cada una de ella se asignó una variable (columnas), a través del cual se realizó una evaluación comparativa (indicado en el porcentaje en color rojo, debajo de cada variable), que permitan asignarle un valor relativo a cada una y de ese modo, hallar aquel sistema que optimice mejor los recursos materiales de la estructura a construir.

Las variables que se tuvieron en cuenta para la evaluación del sistema fueron la cantidad de arcos requeridos, el largo total de estos arcos sumados, la cantidad de culmos, anclajes y uniones utilizadas para su construcción. Estas variables representan valores que determinan, de manera combinada, la cantidad de recursos materiales que se requieren para ejecutar los componentes de cada versión. De las tres versiones presentadas, la 2.2 alcanzó el mejor puntaje, sin embargo, la calificación con la que ingresan a la segunda matriz (*Tabla 12*), es la misma para las primeras dos versiones (1.3 y 2.2), ya que pertenecen al mismo rango de puntaje, determinado a través de la división del puntaje máximo por cuatro, según la rúbrica de la segunda matriz.




Tabla 11. Matriz de evaluación de componentes del sistema estructural

MATRIZ DE EVALUACIÓN: COMPONENTES DEL SISTEMA ESTRUCTURAL				Rúbrica de puntaje												
Objetivo: Determinar la estructura más adecuada para ejecutar el invernadero				El puntaje total es dividido en cuatro partes iguales, considerando la rúbrica utilizada en la Matriz de evaluación de la estructura de la cubierta. En la medida en que el desempeño mejora, su valor es menor.												
Modelos evaluados		Geometría		Evaluación de estructura												
Versión	Sub-versión	Descripción	Modelo digital	Arcos				Culmos		Conexiones					Totales	Valor de ingreso a Matriz de evaluación de estructura de cubierta
				Cantidad de arcos (U)	Largo de cada arco (m)	Sumat. largo de arcos (m)	Cant. nervios por arco (m)	Largo (U) de cada culmo (m)	Cant. culmos por arco (U)	Cantidad total de culmos (U)	Distancia entre conexiones (U)	Cant. conexiones por arco (U)	Cantidad de anclajes (U)	Cantidad total de uniones (U)	100%	
1	3	Estructura de doble curvatura. Tipología central		12	6.4	76.8	4	1.6	16	192	0.4	17	9	204		
Ponderación:				1.2	0	7.68	0	0	0	38.4	0	0	1.8	81.6	130.68	2
2	2	Estructura tipo diagrid que conforma una cúpula. Tipología central		16	6	96	3	1.5	12	192	0.5	13	12	208		
Ponderación:				1.6	0	9.6	0	0	0	38.4	0	0	2.4	83.2	135.2	2
3	1	Tejido de arcos entrelazados que conforman una columna. Tipología central		12	4.5	54	3	1.5	9	108	0.5	10	12	120		
Ponderación:				1.2	0	5.4	0	0	0	21.6	0	0	2.4	48	78.6	3

La segunda matriz (Matriz de evaluación de la cubierta, *Tabla 12*) está conformada por una serie variables dispuestas en cada columna. A partir de la evaluación de cada una, se determinó cuál

de ellas se presentaba como más conveniente para construirla en el territorio, teniendo en cuenta aspectos relacionados con el proceso de construcción, instalación y difusión de la propuesta.

Tabla 12. Matriz de evaluación de cubierta

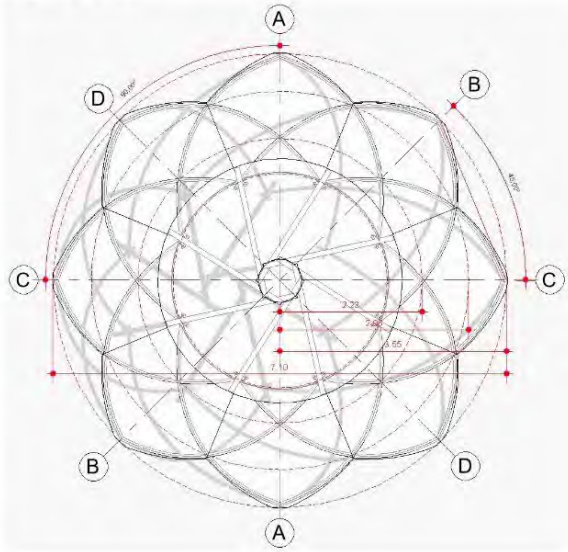
MATRIZ DE EVALUACIÓN: CUBIERTA					Rúbrica de puntaje					
Objetivo: Determinar la estructura más adecuada para ejecutar el invernadero					1 Presenta dos o más problemas 2 Presenta un problema 3 Suceptible de ser mejorado 4 No es posible mejorarlo					
Modelos evaluados		Geometría		Matriz de evaluación: Componentes del sistema estructural	Construcción e instalación			Imagen y difusión	Espacio aprovechable	PUNTAJE TOTAL
Versión	Sub-versión	Descripción	Modelo digital		Velocidad total de instalación	Compatibilidad con envolvente	Cables y sus accesorios estructurales			
1	3	Estructura de doble curvatura. Tipología central		25%	15%	15%	15%	20%	10%	100%
Ponderación:				0.5	0.6	0.3	0.3	0.6	0.2	2.5
2	2	Estructura tipo diaGRID que conforma una cúpula. Tipología central		2	3	3	4	4	4	
Ponderación:				0.5	0.45	0.45	0.6	0.8	0.4	3.2
3	1	Tejido de arcos entrelazados que conforman una columna. Tipología central		3	2	2	2	2	1	
Ponderación:				0.75	0.3	0.3	0.3	0.4	0.1	2.15

Nota. La tabla superior tiene el propósito de evaluar aquel modelo más adecuado para ser ejecutado, del cual, la Matriz de evaluación de componentes del sistema estructural forma parte.

La versión 2.2 alcanzó el mejor puntaje en relación a sus competidoras. Este modelo se presentó y ejecutó en el campo de trabajo. A continuación, se presenta el modelo digitalizado con sus dimensiones generales.

Figura 41. Planta y sección de la estructura a ejecutar

PLANTA GENERAL



VISTA LATERAL

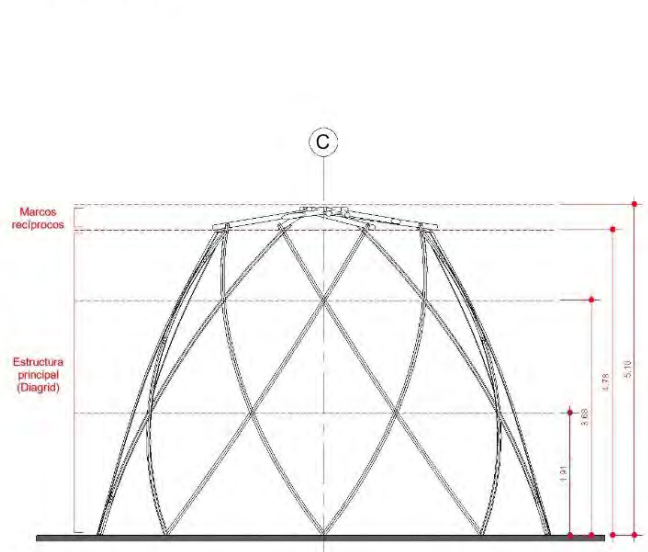
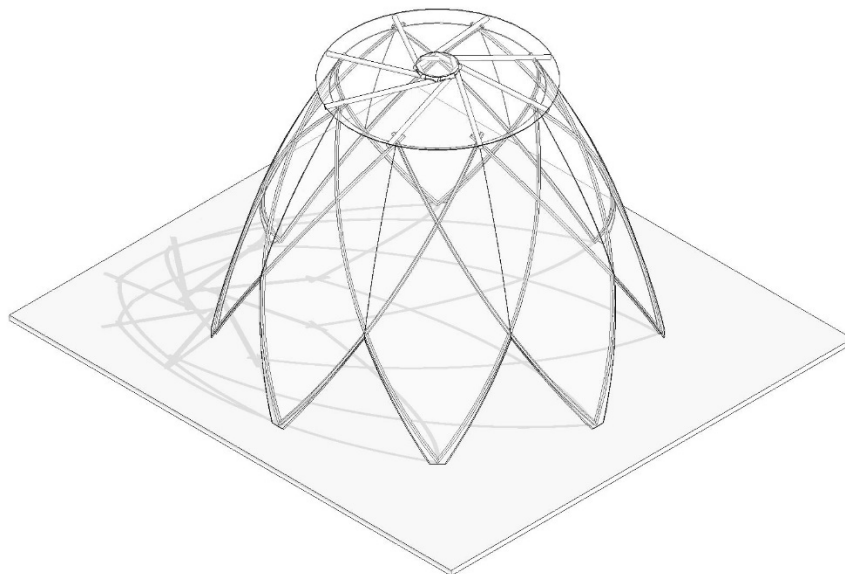


Figura 42. Vista isométrica de la estructura a ejecutar

VISTA ISOMÉTRICA



Nota. Para el modelado se utilizó el software Autodesk Revit® 2021

Hallazgos de modelos analógicos

A continuación, se enumeran los hallazgos identificados durante el proceso de exploración antes descrito:

- El tipo de material utilizado es naturalmente liviano, estas estructuras configuran grandes superficies expuestas a los efectos de succión del viento, por lo que los cimientos además de transferir cargas al terreno, funcionan como lastres de amarre. En este sentido, la propuesta

que incluyen el concepto de *diagrid* está mejor fijada al suelo, ya que tienen una mayor cantidad de puntos de apoyo.

- Las uniones de zunchado cumplen una función esencial en la distribución homogénea de los esfuerzos producidos a lo largo del arco. Estas uniones deben ser idénticas unas a otras y estar distribuidas de manera equidistante para evitar deformaciones no deseadas cuando todo el sistema entra en tensión. Este aspecto resulta relevante debido a que la sumatoria de estas deformaciones individuales, altera la geometría general de la estructura, incrementando el riesgo de falla del sistema completo.
- Para estos modelos en particular, los sistemas hiperestáticos -propuestas basadas en la geometría *diagrid*- son más adecuados a los sistemas isostáticos -propuestas basadas en *doble curvatura*- debido a que la falla de alguno de los componentes no implica el colapso del sistema general. Sin embargo, se debe considerar que los sistemas hiperestáticos requieren la fabricación de un mayor número de arcos y componentes, por lo que se incrementa la cantidad de recursos y tiempo invertido.
- Todas las versiones requirieron una cantidad considerable de uniones zunchadas. Esto implica que la propuesta final de unión debe ser económicas y rápidas de ensamblar.

5.2 Ejecución del proyecto

Metodología

A través de la corregidora K.G., en representación del ayuntamiento de Chiquilistlán, se conoció al Sr. L.M., quién es la persona encargada de administrar y gestionar el funcionamiento del complejo “Cascadas de Comala”. El Sr. L.M., pautó una reunión con los interesados en conocer el proyecto y, posteriormente, se realizó una presentación del mismo, donde se manifestaron las intenciones generales de la investigación y se explicó detenidamente la propuesta arquitectónica. Los comentarios realizados por las personas que asistieron fueron incorporados a la propuesta final de diseño de la cubierta.

La cubierta cumpliría la función de espacio principal de recepción de los turistas que utilizan este balneario, donde se pretende comercializar productos y servicios del lugar. Esta sería gestionada por la misma comunidad y se utilizaría, además, para realizar reuniones generales entre los ejidatarios de Comala.

Una vez aprobada la propuesta arquitectónica por parte de los futuros beneficiarios, se programaron visitas y coordinaron jornadas laborales. Algunas de los trabajos se realizaron con la colaboración de actores externos al proyecto, entre los cuales se menciona a los alumnos de licenciatura de las carreras de ingeniería y arquitectura de la Universidad Jesuita de Guadalajara - ITESO-, a través de los Programas de Aplicación Profesional -PAP- “Tecnología Apropiaada para la Generación de Sistemas Constructivos” llevada adelante por el profesor Dr. Nayar Cuitlahuac Gutiérrez Astudillo, quien es director de este trabajo de investigación. Otras dos jornadas, recibieron el apoyo del profesor Mtro. Carlos Estrada Casarín, a cargo del PAP “Regeneración Social del Espacio Público” perteneciente a la misma universidad. Las excavaciones para los cimientos fueron realizadas por el señor ARR. (50), ejidatario local a quién se le encargó el trabajo completo y, finalmente, las jornadas de instalación de los arcos y todos los componentes en el sitio, en las que colaboró el señor ARA. (22), ambos habitantes de la localidad de Comala. Todas las jornadas de trabajo estuvieron dirigidas y supervisadas por el autor de esta investigación.

Tabla 13. Resumen de actividades, jornadas y colaboraciones

		PROGRAMACIÓN DE JORNADAS DE TRABAJO																																					
Actividades	Jornadas de trabajo																																				Colaboraciones		
	Enero									Febrero									Marzo									Abril											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		37	38
Almacenado y preparación de piezas	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-	
Fabricación de 16 arcos de sección compuesta	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-
Fabricación de 8 vigas de sección compuesta	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-
Doblado y cortado de varillas de acero	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-	
Traslado de materiales	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-	
Excavaciones para cimientos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sr. Alejandro Rivera Ramos	
Preparación de terreno	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sr. Alejandro Aguilar		
Anclaje de arcos a cimientos	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sr. Alejandro Aguilar + alumnos PAP Nayar Gutiérrez		
Ejecución de la estructura principal	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Alejandro Ramos + Carlos Estrada		
Ejecución de la estructura secundaria (cúpula)	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Sr. Alejandro Aguilar		
Ajustes generales	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	-	

Nota. La información expuesta es orientativa. La cantidad de jornadas trabajadas en cada mes cambia de acuerdo con la cantidad de visitas que se pudo realizar en ese período.

El proyecto tuvo tres fuentes de financiación. La primera y la que asumió la mayor parte de los costos, fue el Fondo de apoyos a la investigación -FAI- que otorga la Universidad Jesuita de Guadalajara a aquellos proyectos de investigación que cumplan ciertos requisitos. La universidad puso a disposición el monto de 50.000\$ mexicanos. En segundo lugar, la comunidad beneficiaria puso a disposición personal y una parte menor de los materiales, que fueron requeridos durante la ejecución del proyecto. Finalmente, los titulares de los PAPs mencionados, organizaron visitas al sitio utilizando los recursos asignados a cada uno de ellos.

Los materiales utilizados formaron parte del mismo pedido realizado para los ensayos a flexión y compresión. Estos están presentados en el apartado *4.3 Ensayo a flexión para Otatea acuminata (p. 93)*.

La construcción de la cubierta inició en el Campus Universitario del ITESO, donde se construyeron 16 arcos de sección compuesta, de tres nervios cada uno. Cada arco poseía un total de 10 culmos de 150 cm de largo, 2 culmos de 100 cm y 2 culmos de 50 cm. El arco de sección compuesta ya ensamblado tenía un largo total de 600 cm. Esta primera serie de arcos se fabricó con el propósito de utilizarlas en la parte principal de la estructura, que replica el concepto de *diagrid*, desarrollado en el apartado *5.1 Diseño del sistema estructural*.

De manera complementaria, se fabricaron 8 piezas de arcos de sección compuesta de 3 nervios, de unos 200 cm de largo cada uno. El propósito de esta segunda serie de componentes, fue resolver la parte más alta de la estructura, que es secundaria dentro de la propuesta y admite otras variables de resolución, ya que ambos sistemas funcionan de manera independiente. En este caso, se decidió utilizar una estructura de marcos recíprocos, debido a que requería piezas más cortas, que resultaron más simples de trasladar hasta el lugar de ejecución.

La unión de los arcos de sección compuesta utilizadas en ambas partes de la estructura, fueron realizadas de acuerdo con lo expuesto en el apartado 4.5 *Ensayo a flexión para uniones*, donde se especifica y define el proceso de diseño de esta unión y los posteriores ensayos. Dado que todas las uniones serían construidas por una sola persona, se decidió sustituir los zunchos propuestos inicialmente por precintos plásticos de la marca Volteck (largo de 300 mm, ancho de 7.6 mm y resistencia a la tensión de 54.4 kgf) disponibles en el mercado local.

A continuación, se presenta los arcos de 600 cm de longitud, utilizados en el cuerpo inferior de la estructura.

Figura 43. Arcos de sección compuesta, uniones y almacenaje de culmos.



Nota. Imagen superior, material almacenado bajo sombra y resguardado de la humedad del suelo hasta su uso. Imagen inferior izquierda, los 16 arcos aún sin ser tensados. Su curvatura natural es sensiblemente diferente para cada pieza. Imagen inferior derecha, uniones.

Una vez en sitio, se inició el proceso de inducción de tensión en los arcos, utilizando una serie de estacas para que adopten la geometría prevista. Posteriormente, fueron dispuestos bajo la sombra permanente de árboles hasta su instalación. La primera actividad de la instalación fue el replanteo de la estructura y una demarcación del sitio donde se erguiría la estructura.

Las excavaciones de los cimientos tienen una geometría cilíndrica de 40 cm de diámetros y 55 de profundidad. Para la armadura se utilizó una malla electrosoldada como armazón de la misma, esta malla estaba compuesta por varillas de 6 mm en ambos sentidos, con una separación de 10 cm entre sí. Además, se doblaron y prepararon varillas de acero corrugado de $\frac{3}{4}$ " , con el propósito de fijar la base de los arcos a los cimientos, sin que estos tengan contacto directo con el suelo.

Figura 44. Replanteo y excavación de cimientos.



Nota. Cada base recibe el apoyo de dos pares de arcos.

Una vez realizados los cimientos y fraguado el concreto, se procedió a fijar la base de los arcos a las varillas dobles ubicadas en los cimientos. Esta actividad requirió la colaboración

simultánea de al menos tres personas, una encargada de sostener el arco en su posición, que pese a ser liviano, su longitud hace incómoda la maniobra, la segunda persona corroboraba que el arco mantenga su posición adecuada y la tercera persona ataba el arco a las varillas. Los arcos dispuestos en el sentido horario fueron puestos hacia el exterior, mientras que los opuestos fueron ubicados hacia el interior de la estructura.

Una vez sujetos todos los arcos a la base, se realizó el primer cinturón de uniones zunchadas, luego el segundo y el tercer cinturón de uniones. La posición de cada arco fue reajustada en la medida en que la construcción avanzaba, hasta alcanzar la geometría prevista.

Figura 45. Arcos sujetos en las bases y posterior ajuste de la posición final.



Nota. Ambas actividades requieren la presencia de al menos tres personas.

Finalizado el trabajo de la estructura principal, inició el trabajo de la estructura de marcos recíprocos en la parte superior del sistema. Al igual que en la estructura principal, se necesitan de al menos tres personas para mantener las piezas en su lugar antes de ser zunchadas.

Esta estructura requirió la adición de algunos elementos no contemplados, con el propósito de poder instalar una cubierta plástica sobre esta. Las puntas fueron recubiertas con botellas

plásticas y luego caucho proveniente de cámaras de bicicleta recolectadas, que protegían la superficie plástica de rasgaduras, además, se instaló una serie de tensores de rafia que mantenían el plástico despegado de los arcos.

Resultados del proyecto ejecutado

Durante el proceso de instalación, ningún componente requirió ajustes, por lo que se conservó el diseño de acuerdo con la planificado durante la etapa anterior, sin embargo, una vez ubicados los arcos en su posición final, se observó que algunos de los zunchos realizados con fibra natural, localmente conocida como “ixtle” o “rafia natural”, habían perdido su tensión. Esto implicó la sustitución y reparación de estas piezas, por cuerdas de polipropileno -rafia sintética- en combinación con sujeciones dobles de alambre recocido calibre 16, utilizada durante el proceso de construcción de los arcos prototipos P1 y P2 y que no presentó problemas mecánicos ni de deterioro, pese a estar expuesto a los agentes climáticos durante ocho meses consecutivos, además, este material es aprobado por la normativa que regula su uso en andamios por el departamento de trabajo de China (Labour Department, 2017).

La posición de algunas varillas en las bases se vio afectada por el ingreso de ganado al sitio. Esto obligó a sujetar tres arcos en una posición que no se había previsto. Sin embargo, la estabilidad general no se vio afectada.

También se debe mencionar que las uniones entre componentes fueron realizadas con rafia plástica y doble alambre calibre 16. Estos zunchos sustituyeron a la rafia natural instalada inicialmente debido a que, como se mencionó, estas perdieron tensión.

A continuación, se exponen fotografías de la estructura construida. El apartado *Anexo 2: Fotografías del proyecto finalizado*, contiene imágenes del proyecto instalado con su envolvente.

Figura 46. Sistema estructural completo.



Nota. Compuestos por: Bases en concreto y varillas de sujeción, arcos de estructura principal, piezas de cierre superior y tensores metálicos de fijación.

El cronograma de instalación de la cubierta en su sitio definitivo, fue replanteado en varias oportunidades debido a diversos problemas que se tuvo durante la instalación de la esta. Estos inconvenientes fueron el resultado de descoordinaciones y diferencias entre integrantes de la comunidad beneficiaria, que terminaron por afectar el calendario preestablecido.

Entre los episodios más relevantes, se señala la demora de actividades tales como la excavación de cimientos -que imposibilitó el inicio de la instalación-, la ejecución del cerco de obra - sin el cual el ganado ingresó al sitio de ejecución y destruyó trabajo ya realizado en dos oportunidades- y la cubierta de “palapa” sin la cual, el edificio no pudo utilizarse y los materiales quedaron expuestos a la intemperie más tiempo del estipulado. Se solicitaron en varias oportunidades escaleras y andamios sin los cuales resultó imposible continuar con los trabajos en altura. En este caso, estos equipos fueron negados por una parte de la comunidad, que lo requerían para actividades aparentemente impostergables. Estas demoras fueron particularmente problemáticas, debido a que en diversas ocasiones el equipo de trabajo que viajaba desde Guadalajara no pudo iniciar actividades una vez en el sitio, además de prolongar los tiempos de ejecución, se incrementaron los costos inicialmente calculados. En este sentido, resulta pertinente señalar estos conflictos ocurridos durante la instalación de la cúpula, ya que fueron originados dentro del mismo círculo de beneficiarios, quienes habían mostrado interés inicialmente.

Si bien esta investigación centra su atención en el desarrollo de un sistema estructural y no en su inserción en las comunidades rurales, esta problemática debería considerarse en investigaciones futuras que procuren trabajar con comunidades.

Hallazgos del proyecto ejecutado

Inicialmente se propuso que los arcos de sección compuesta tengan tantos nervios como sean requeridos, sin embargo, se determinó que los arcos compuestos por dos y tres nervios fueron los más simples de armar. La cantidad de culmos requeridos para armar arcos de más nervios obliga a incrementar la cantidad de uniones y la distancia entre ellas. Además, a mayor cantidad de nervios, resulta más pesada la pieza final, por lo que su instalación en obra o su traslado puede requerir de maquinaria, a diferencia de los arcos de dos y tres nervios, que pueden ser manipulados por una sola persona.

La sustitución del zuncho por los precintos plásticos resultó exitosa, ya que se optimizó el tiempo de conformación de las uniones, tal como se previó. Sin embargo, su uso implica un costo mayor que debe ser considerado en caso de utilizar el mismo material.

Con la estructura erguida se realizaron pruebas de empujes verticales y horizontales, el sistema se presentaba estable pero flexible, presentando deformaciones en todo el sistema cuando se la cargaba en un punto específico. Esto obligó a insertar refuerzos horizontales y verticales de tensores metálicos con el propósito de rigidizarla.

De acuerdo a las relaciones *claro salvado - espesor de sistema estructural*, establecidas en el apartado *Definición del término grandes claros*, donde se establece que las cubiertas denominadas “palapa”, usualmente construidas en estas comunidades, logran una relación de 1:25. Se realizó un cálculo idéntico para el prototipo construido y se halló que, para salvar 7.10 m, se requirió un diámetro promedio de 7 cm, por lo que se puede afirmar que existe una relación aproximada de 1:100, cuatro veces superior a la referencia adoptada, y muy próxima al valor ideal de 1:150, establecida para una cáscara de huevo.

Los siguientes hallazgos, fueron sintetizados y acompañados por ilustraciones que facilitan su comprensión, con el que se propuso una *Guía básica de construcción de arcos de “otate”*. El propósito de esta guía, es poder facilitar esta información a la comunidad rural de Jalisco y así favorecer la difusión del sistema. La guía está disponible en el *Anexo 2*.

El proceso de construcción de los arcos de sección compuesta, fue sintetizado y organizado de acuerdo con el siguiente listado de actividades.

- Los culmos deben ser cortados del mismo largo y organizados en grupos con los que se construirá cada arco. Las flechas de los culmos deben ser similares entre sí, de modo tal de lograr una curva regular cuando el arco esté finalizado. (Los rangos de flecha sugerida se encuentran explicados en el apartado *2.2 Características físico-mecánicas del bambú*)

- Cada culmo debe ser marcado sobre el lado de la curva, con el propósito de que todos queden dispuestos en el mismo sentido. Esto evita deformaciones locales en la geometría del arco final.
- El proceso de conformación inicia desde el extremo. Se perforan los dos primeros culmos (de 100 y 50 cm cada uno de acuerdo con este diseño) y luego se añade el tercero (150 cm) y se zuncha el racimo completo de tres nervios próximo a la base.
- Se coloca el cuarto culmo de 150 cm al final del culmo que tiene 50 cm de longitud. Se realiza el zunchado provisorio en ambos lados del puente con el propósito de conservar la posición final del culmo. Luego se perfora a un lado y otro del puente, garantizando la continuidad del nervio. Finalmente, se ajustan los zunchos a la máxima tensión posible. Se debe evitar distancias entre los dos culmos conectados.
- Las siguientes uniones se realizan del mismo modo, hasta alcanzar el largo deseado del arco de sección compuesta. Para finalizar, se utilizan los dos culmos restantes de 100 y 50 cm, de modo tal que todos los nervios concluyan en el mismo punto.
- Una vez terminados, los culmos deben ser almacenados en un lugar aireado, a la sombra y evitando el contacto con la humedad del piso o el medioambiente.

Una vez finalizada la conformación de los arcos de sección compuesta, inicia el proceso de inducción de tensión de estos, para ello se propone el siguiente listado de actividades:

- Se debe prever un espacio de trabajo con un suelo bien nivelado y parejo. Sobre esta superficie se deben clavar dos estacas separadas entre sí aproximadamente dos metros más que el largo final del arco que se desea construir. Si el arco tendrá 6m, entonces, la distancia entre las estacas será de 8 m. Debe considerarse que la distancia entre la punta de la estaca y el suelo debe ser la misma que la flecha que se desee darle a cada arco de sección, y que la punta de cada estaca debe estar a la misma altura.

- Se requiere una cadena metálica aproximadamente dos metros más larga del largo que pretende asignársele a cada arco. La cadena será fijada a la punta de las dos estacas, que deben estar niveladas entre sí, dejando colgar la cadena hasta que se forme una curva que rose el suelo sin estar apoyado en él.
- Con la ayuda de una escuadra, se trasladarán la altura de la cadena al suelo. Esta actividad inicia desde el centro, que viene dado por el punto de la cadena que rosa el suelo, hacia los laterales, cada aproximadamente 1.5 m. Cada uno de estos puntos, será dibujado en el suelo con la ayuda de más estacas.
- Una vez dibujada la catenaria en el suelo, se debe trabar el primer arco entre la primer y segunda estaca, e inducir la tensión a toda la pieza de manera paulatina. La *Otatea acuminata* es una especie muy flexible y difícilmente se produzcan fracturas, sin embargo, si esto ocurre, se sugiere disminuir la flecha del arco.
- Una vez se alcance la estaca opuesta a la inicial, se debe trabar el arco pasándola por encima de esta. El arco debe conservar su posición sin la ayuda de ningún operario.
- Con el arco de sección compuesta conformado, se atan los extremos de cada pieza utilizando una cuerda que mantendrá su forma de manera provisional, hasta que el arco esté en su posición final, momento en el que esta cuerda será removida. Se sugiere el uso de rafia plástica.
- Una vez terminados, el arco está listo para ser desmontado y almacenado en un lugar aireado, a la sombra y evitando el contacto con la humedad del piso o el medioambiente.

La instalación de la cúpula requiere de la realización de las siguientes actividades:

- Se replantea el edificio en sitio, garantizando que todos los hilos queden a 45° unos respecto del otro y por lo menos a un metro por fuera de las bases. Los hilos deben cruzarse en centro en un mismo punto, aquí se colocará una estaca, desde la cual se pueden tomar

mediciones hasta la posición final de cada componente, por ejemplo, las bases se excavarán a la misma distancia del centro, por debajo de los hilos.

- Se realizan las excavaciones de las bases de acuerdo con las dimensiones previstas. Se inserta el esqueleto mecánico y alinea cada varilla. Se vierte el concreto y se espera hasta que este fragüe.
- Una vez seco el concreto, se fijan las bases de los arcos a estas piezas mientras se verifica que cada una quede lo más próximo posible a su posición final. Esto se logra ubicando un plomo en el extremo del arco con el mismo largo al que esta punta debe quedar separada del suelo, de este modo, el arco queda en su posición final.
- Se instalan todos los arcos que van en un mismo sentido, luego, se instalan los que van en el sentido contrario. Cada par de arcos debe conservar el mismo orden. Si los arcos dispuestos en sentido horario son externos, los que van en sentido antihorario deben ser internos. De lo contrario, los arcos y la estructura tendrán deformaciones no deseadas.
- Una vez instalados todos los arcos, se colocan los zunchos del primer cinturón de uniones, asegurándose de que estos queden a la altura prevista y, con el apoyo de un plomo, se verifica que todos queden a la misma distancia del centro. Luego se instala el segundo y tercer cinturón.
- La estructura de cierre superior es opcional, aquí se puede optar por la instalación de arcos que conecten todas las uniones o de la instalación de un marco recíproco.

CAPÍTULO VI: Conclusión general e información de apoyo

6.1 Conclusiones

La propuesta de arcos de sección compuesta presentada en este trabajo de investigación, introduce una alternativa novedosa de sistema estructural de grandes claros en Jalisco. Si bien este material es históricamente utilizado bajo diferentes técnicas de construcción tradicional -como el

bahareque o de manera auxiliar en cubiertas de madera- y adoptado por algunos constructores y diseñadores mexicanos que usan diferentes especies de bambú con admirable destreza, no se hallaron sistemas estructurales de grandes claros, constituidos por arcos de sección compuesta de *Otatea acuminata*, como elemento principal de la estructura. Por lo que se abre una línea de investigación con este tipo de sistemas, constituida por especímenes nativos.

La propuesta de arco aquí presentada, fue realizada utilizando recursos materiales disponibles en las comunidades rurales del suroccidente de Jalisco. Además, para la construcción del prototipo, no se requirió de mano de obra especializada, el proyecto completo fue construido e instalado por el autor de esta investigación, con el apoyo de una persona de la comunidad que no tenía experiencia en este tipo de trabajos. Esto, resulta valioso, ya que la construcción de estructuras de bambú requiere de habilidades específicas. En este sentido, la propuesta resultó simple, segura y asequible.

El prototipo construido en Chiquilistlán, logró superar en cuatro veces la distancia usualmente alcanzada, por los tejabanos utilizados en estas comunidades. Además, duplicó la distancia mínima establecida para ser considerada como una estructura de grandes claros. Como se señaló en el apartado *Definición del término grandes claros*, la relación entre el claro salvado y el espesor del sistema estructural de los tejabanos, alcanza un valor de 1:25, mientras que la estructura construida alcanza una relación de 1:100. Si contrastamos estos valores con la relación óptima de un sistema estructural de grandes claros, representada por el espesor de la cáscara de un huevo y el claro que esta salva, hallamos que el valor ideal es de 1:150, por lo que se puede afirmar que, el resultado alcanzado cumple sobradamente con su objetivo.

Sin embargo, el sistema propuesto aún tiene un margen de mejora. Es posible buscar un sustituto más adecuado para los zunchos que sujetan los nervios, no solo porque se pueden optimizar los tiempos de armado, sino que, además, se pueda garantizar una sujeción firme y segura a largo plazo.

El sistema estructural ya instalado, presentaba una excesiva deformación ante cargas puntuales y esfuerzos laterales. Por este motivo, se colocaron cuatro tensores verticales y dos perimetrales, que limiten los movimientos del conjunto. Por los recursos y tiempo disponible, se optó por asegurarlo con un cable de acero de 6 mm de diámetro, que disminuyó notablemente las deformaciones de la estructura. Es posible que las diferentes tipologías que se puedan configurar con estos arcos, presenten el mismo inconveniente, por lo que estos tensores son un componente que aún debe continuar estudiándose.

De las visitas realizadas a diferentes localidades del campo de trabajo, se destaca la presencia de cubiertas transitorias conocidas como “palapas”, término que hace referencia a la hoja de la palma con la que se fabrican estas superficies de sombra, y que son muy utilizadas por las personas de la comunidad para organizar puestos de venta en el espacio público. Las estructuras que soportan estas construcciones fueron una referencia clave para el desarrollo del sistema estructural y sus uniones, ya que atienden la problemática planteada para este trabajo de investigación, pero en este caso, para claros limitados al largo de los troncos que ofician de trabe, que no superan los 5 metros.

Figura 47. Unión de la estructura de la “palapa” y unión propuesta para el sistema estructural.



Nota. Izquierda, unión de “palapa” resuelta con orquetas y troncos. Derecha: Unión del sistema propuesto utilizada en la estructura ejecutada en Chiquilistlán.

En este sentido, resulta ambiguo afirmar que la construcción de estructuras hechas con arcos de sección compuesta, alcanza el nivel de simpleza de las “palapas”, especialmente porque los desafíos mecánicos, demandan un mayor nivel de elaboración de puntos críticos del sistema. El diseño propuesto involucró un estudio profundo de diversos documentos y normativa orientada a regular el uso del bambú en estructuras y, en consecuencia, una serie de requisitos materiales y técnicos ineludibles que garantizan un desempeño físico-mecánico correcto.

El hecho de que el sistema propuesto se haya realizado con una especie nativa, lo hace pertinente en términos medioambientales, y potencialmente replicable por la comunidad rural de Jalisco. Otro aspecto relevante en relación a la aplicación de este material a estructuras, es que las comunidades rurales están familiarizadas con el uso de este material, dado que actualmente son ampliamente utilizadas con diversos fines, entre los cuales se destaca la elaborada manufactura de artesanías y utensilios de todo tipo.

Las múltiples investigaciones y documentos presentados en el apartado *2.1 Sustentabilidad: Impacto medioambiental y socioeconómico*, que se centran en el estudio de esta familia de plantas, exponen características muy favorables en términos medioambientales, como una alta captura de carbono, fertilización de sustratos, retención e infiltración de agua, estabilización de suelos, entre otros rasgos que lo proponen como una especie con ventajas medioambientales en relación a otros materiales utilizados en estructuras de este tipo. Estas características, se alinean con los intereses de una parte de esta comunidad, que busca gestionar formas de desarrollos menos agresivas con sus ecosistemas.

De lo expuesto en el *CAPÍTULO III*, se señala la presencia de varias especies de bambú con aplicación estructural en el territorio, que crecen de forma silvestre, tales como la *Bambusa oldhamii*, diferentes tipos de *Guadua*, *Bambusa Bambos*, entre otras no identificadas. También se

halló un predio con sembrado de diferentes especies de bambú y algunos entrevistados señalaron que existen producciones de esta planta en Colima y Nayarit. Sin embargo, los habitantes de las diferentes localidades, se mostraron desconfiados ante la capacidad del bambú de resistir al paso del tiempo e incrédulos ante sus múltiples aplicaciones. Este escenario, deja en evidencia la subutilización de un material con un potencial aún no aprovechado por completo en estas comunidades.

De los ensayos expuestos a lo largo del *CAPÍTULO IV*, se destaca las propiedades mecánicas de la *Otatea acuminata*. Entre los hallazgos más relevantes de esta investigación, se determinó que esta especie es apta para su uso en estructuras, dado que los valores hallados durante los ensayos de flexión y compresión resultaron similares a los de otras especies ampliamente aceptadas para este tipo de usos.

Además, la solidez de los culmos de la *Otatea acuminata*, simplifica en gran medida la fabricación de uniones en comparación al resto de las especies de bambú utilizadas en estructuras. Estas, requieren la introducción de mortero o piezas de madera dentro de culmos, que se presentan huecos en sus internodos, con el propósito de evitar el aplastamiento ante esfuerzos cortantes o de compresión transversal al eje axial. Estas técnicas requieren de la habilidad de artesanos del bambú, que no fueron necesarias durante la ejecución de los arcos fabricados.

En síntesis, la *Otatea acumiata*, presenta una serie de características físicas, mecánicas y de relación con el medioambiente, favorables en comparación con el uso de otros recursos materiales disponibles en la región, incluyendo otras especies de bambú. Su uso en componentes estructurales de sección compuesta, también deben continuar explorándose, en busca de configuraciones y diseños que optimicen su comportamiento mecánico.

6.2 Propuesta de investigación futura

Como se mencionó, existen varios aspectos del sistema propuesto que son susceptibles de ser mejorados. La configuración de los culmos que constituyen el arco de sección compuesta, admite

variantes que pueden continuar siendo exploradas, con el propósito de encontrar una distribución más eficiente en términos materiales, técnicos y mecánicos.

Las uniones de bambú son uno de los aspectos más complejos a resolver en este tipo de estructuras. El uso de zunchos es muy frecuente para mantener unidos los culmos que componen un mismo elemento estructural. El mercado ofrece una variedad aceptable de componentes que pueden asumir este tipo de solicitaciones, sin embargo, la fabricación de zunchos orgánicos, incluso aquellos derivados del bambú, no son frecuentes. La situación es similar en los tensores utilizados en este tipo de estructuras. Ambos componentes son requeridos en cantidades considerables, y por ello, una propuesta de producción de cuerdas de bambú económica y estable, representaría un gran aporte para este tipo de sistemas.

Para atender este aspecto, se realizó una búsqueda de técnicas simples de fabricación de cuerdas de bambú, que puedan aplicarse en este proyecto, pero la información recolectada resultaba insuficiente y el tiempo escaso, por lo que los intentos de fabricación de este tipo de componentes fueron infructuosos. Sin embargo, los artesanos del “otate” mostraron particular habilidad en la fabricación de “hilos” con los que tejían las artesanías. La técnica de fabricación, expuesta en la **Figura 24. Manufactura de sombrero en otate según técnica de los pares.**, ubicada en la página 70, es relativamente simple, pero requiere de conocimiento y práctica, además de la ideación de un proceso que sistematice la producción de cuerdas, para optimizar los tiempos de fabricación.

Finalmente, se sugiere explorar diferentes tipologías estructurales que se pueden lograr con los arcos de sección compuesta, que revelarán aspectos del sistema que puedan ser mejorados y que, al mismo tiempo, enriquecen las alternativas de aplicación de los arcos.

El uso del bambú en estructuras, representa una oportunidad para desarrollar sistemas estructurales de bajo costo y baja huella de carbono, atendiendo problemáticas de sectores de la población que requiere de tecnología asequible. En algunas partes de México, aún continúa siendo

un material poco explorado, a pesar de la presencia de plantas en el territorio y de una variedad de experiencias exitosas realizadas en este país. Por lo que aquellos estudios que tiendan a difundir su uso, paulatinamente generarán espacios de acogida que puedan posicionarlo como una alternativa plausible y competente frente a materiales industrializados.

ANEXOS

Anexo 1: Tabla de entrevistas y registro fotográfico

Este documento contiene la información completa recabada en cada uno de los sitios visitados. Fue dispuesta en una hoja de cálculo donde la información fue clasificada, organizada y jerarquizada de acuerdo a lo expuesto en el apartado **3.2 Metodología**, ubicado en la página 52. La información completa resulta imposible de incluir en este documento debido a que se perdería el formato propuesto, necesario para poder comprender los datos volcados en ella. Puede consultar la tabla en el siguiente [VÍNCULO TABLA DE ENTREVISTAS Y REGISTRO FOTOGRÁFICO](#).

Anexo 2: Fotografías del proyecto finalizado

Figura 48. Proyecto ejecutado





Anexo 3: Guía de construcción de arcos de bambú

Esta guía, denominada “Guía básica para construir arcos de otate”, fue diseñada en un formato tipo carta, con el propósito de facilitar la difusión en las comunidades rurales. En este documento, se incluye la guía con sus márgenes ajustados. Si desea descargar la guía en su formato original, la puede encontrar en el siguiente [VÍNCULO GUÍA BÁSICA PARA CONSTRUIR ARCOS DE OTATE](#).

Figura 49. Guía básica para construir arcos de otate



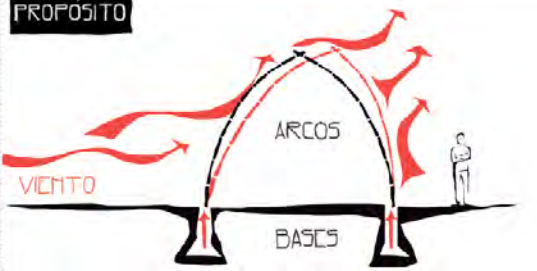
**GUÍA BÁSICA PARA
CONSTRUIR ARCOS DE
OTATE**

INTRODUCCIÓN

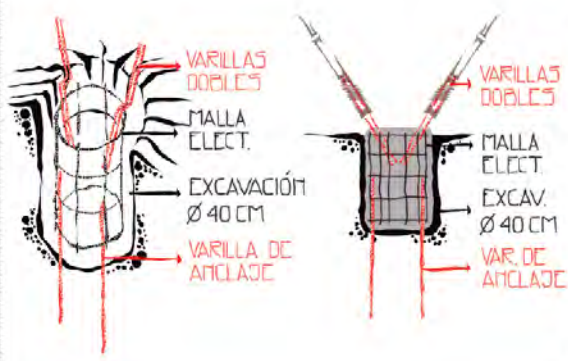
Esta es una guía práctica para construir arcos de otate. Está orientada a las comunidades rurales de Jalisco que dispongan de este material. Su propósito es exponer información elemental pero suficiente para fabricar arcos asequibles y seguros, que puedan ser utilizados en diferentes tipos de estructuras que soporten cubiertas de grandes superficies. Aquí se podrán encontrar solo dos variantes, sin embargo, pueden ser aplicadas a una enorme cantidad de estructuras compuestas por arcos. La guía fue escrita y difundida en el marco de una investigación académica para obtener el grado de Maestro en la Universidad Jesuita de Guadalajara, llevada adelante por el **Arq. Lucas Henquin**, finalizada en el año 2023. Si desea mayor precisión, se puede poner en contacto con el siguiente correo: lucas.hqn@gmail.com

1

PROPÓSITO

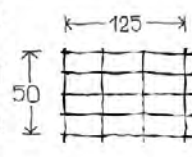


3D SECCIÓN

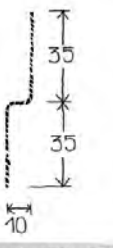


COMPONENTES

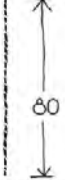
MALLA ELECT



VARILLAS DOBLES



VARILLAS ANCLAJE



BASES - PROPÓSITO

Las cubiertas livianas de grandes superficies tienden a recibir cargas de presión y succión generadas por el viento. Este puede arrancarlas de sus bases si no están adecuadamente fijadas, por ello es importante asegurarlas correctamente. A mayor cantidad de bases, mayor estabilidad. Aquí se hace una propuesta básica.

- COMPONENTES

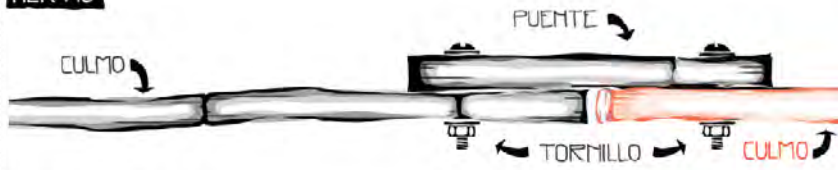
Cada base requiere: una malla electro-soldada, diámetro 1/4", de 50 cm o más de alto y 125 cm de largo. Cuatro varillas, diámetro 3/4" de 80 cm, dobladas como se muestra en la figura "varillas dobles". Dos varillas de anclaje, diámetro 3/4" de 80 cm o más.

- 3D/SECCIÓN

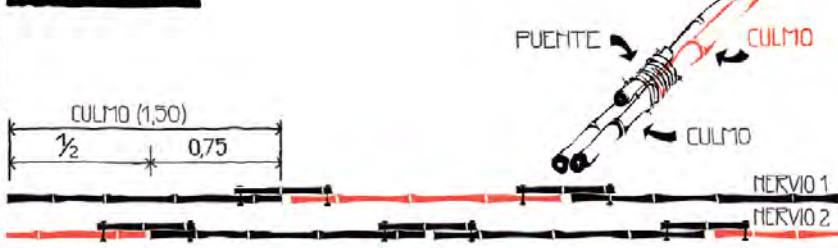
Se clavan las dos varillas de anclaje en el fondo de la excavación de la base, dejando sin enterrar al menos 35 cm. Luego, se ubica la malla electro-soldada, con la que previamente se hizo un cilindro. Finalmente, se ubican los dos pares de varillas. Previamente se deben unir con alambre recocado. Su propósito es recibir los arcos de otate, y mantenerlos alejados del contacto directo con la humedad del suelo.

2

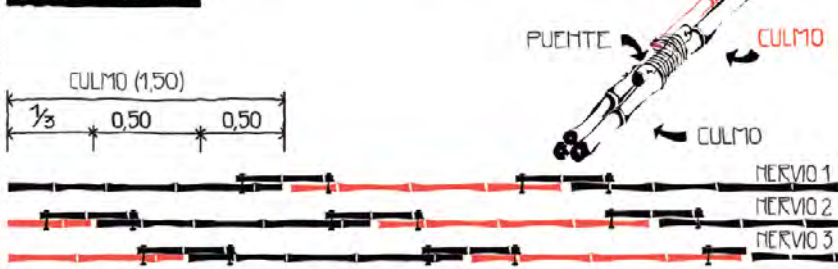
NERVIO



ARCO DE 2 NERVIOS



ARCO DE 3 NERVIOS



NERVIO

Se entiende por "nervio", a cada línea conformada por culmos (tallo principal del otate). Cada culmo debe tener una curvatura y diámetros en sus extremos similares entre sí, evitando que los arcos se deformen en ciertos tramos. La unión entre estas piezas, se realiza fijando el "puente" a cada extremo, valiéndose de tornillos.

ARCO DE 2 NERVIOS

Un arco puede estar constituido por varios nervios (sección compuesta). Si se disponen de esta forma, se logrará que las uniones y esfuerzos estén distribuidos de manera homogénea a lo largo del arco. De este modo, se evitan deformaciones locales indeseadas. Es importante notar que cada culmo, tiene el mismo largo (1,50 m en este caso) y que las uniones son equidistantes entre sí (0,75 m). Cada unión presenta un solo cambio de culmo.

ARCO DE 3 NERVIOS

Se repite la misma secuencia que para el caso anterior. No se recomienda realizar más de tres nervios por arco, debido a que su construcción resulta más compleja.

3

RONDANA

4 UNIDADES



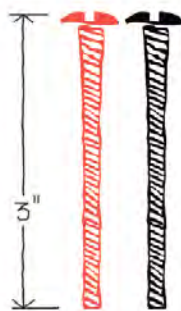
TUERCA 3/16"

2 UNIDADES



TORNILLO 3/16"

2 UNIDADES



CUERDA RAFIA 130 CM

2 UNIDADES



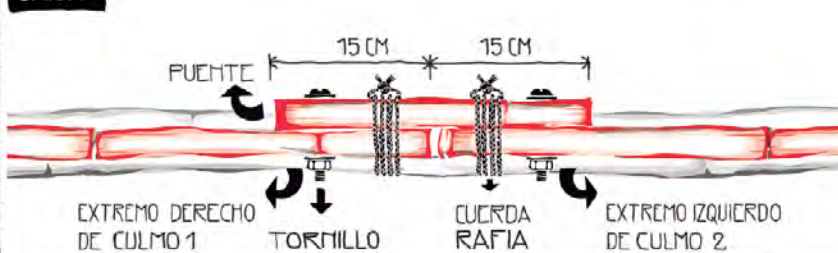
MATERIALES

Cada unión requiere 4 rondanas o arandelas, se sugiere que sean de presión. 2 tuercas y 2 tornillos cabeza plana o cruz, de 3/16" de diámetro y 3" de largo, con el propósito de que puedan atravesar al menos dos culmos juntos. Dos cuerdas de rafia de 130 cm cada una (largo de brazos abiertos). La rafia es económica, sin embargo, puede presentar problemas de durabilidad, por lo que este material puede ser sustituido con zunchos plásticos o metálicos disponibles en el mercado o, cuerdas naturales hechas con el mismo otate, en cuyo caso se recomienda sea utilizada en verde, para que al secarse se contraiga y ajuste los nervios.

UNIÓN

La unión será realizada fijando el puente al extremo del culmo de otate utilizando el primer juego de tornillo, tuerca y arandelas. Luego, se ubica el extremo del segundo culmo (los diámetros de ambos extremos deben ser similares). Una vez conectado el nervio, se utilizan las cuerdas para zunchar los tres nervios juntos. Si se siguen estos pasos, por cada unión habrá un solo nervio interrumpido y por ello se utilizará un solo puente. (Ver configuración de los arcos de 2 y 3 nervios)

UNIÓN

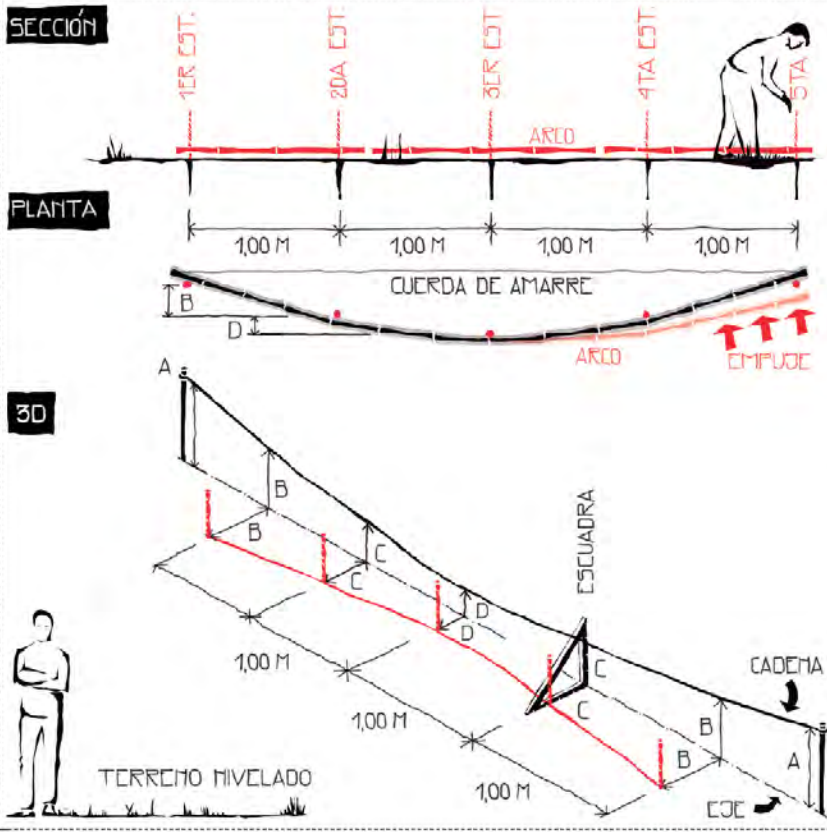


4

SECCIÓN

PLANTA

30



ARCO FUNICULAR

Esta es una familia de curvas que se caracteriza por la predominancia de un único tipo de esfuerzos, que resulta conveniente si se desea construir arcos continuos apoyados en sus extremos. Esta curva podría ser sustituida por otra más simple si este no fuera el caso.

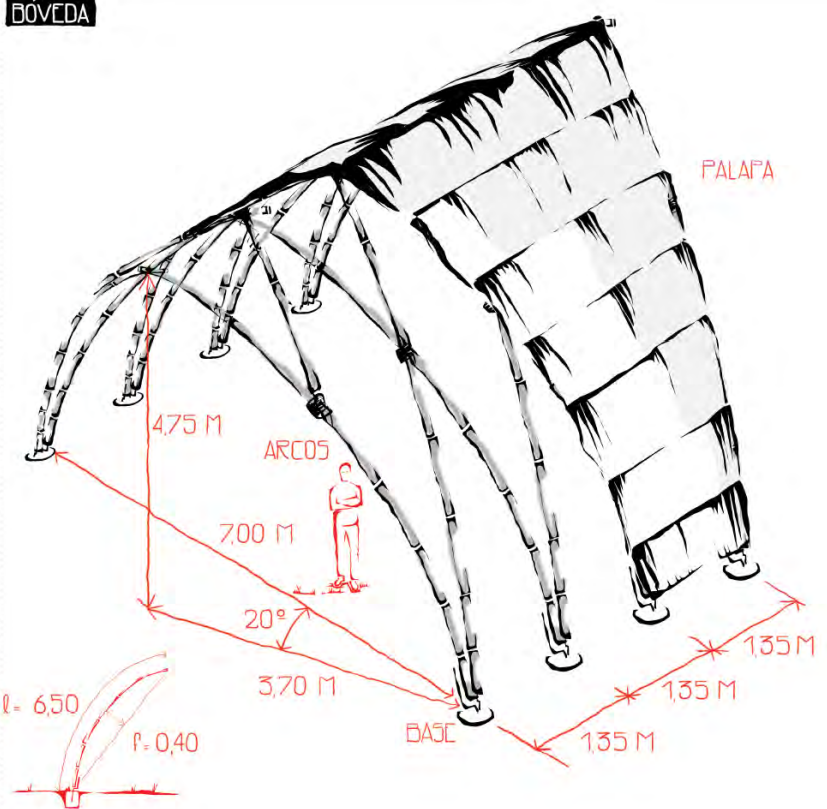
CONSTRUCCIÓN DEL ARCO

Sobre un terreno nivelado, se clavan dos estacas a una distancia dos metros mayor que el largo total del arco. Luego, se verifica que la altura de ambas estacas sea idéntica (distancia A en la figura 3D). Se cuelga una cadena sin que toque el piso, que adopta la forma que utilizaremos (funicular). Una a una, se transfieren las distancias de la cadena al piso, iniciando desde el centro exacto. Así, se logra dibujar la silueta de la cadena en el terreno nivelado. Las distancias son marcadas en el suelo con la ayuda de otras estacas. Estas tienen la función de darle la forma correcta a cada arco. Para que el arco quede firme, la primer y última estaca deben pasar por debajo del mismo (ver figura PLANTA). Una vez conformado el arco, se procede a unir ambos extremos con rafia u otro tipo de cuerda (Cuerda de amarre).

5

BÓVEDA

CONSTRUCCIÓN DE UNA BÓVEDA



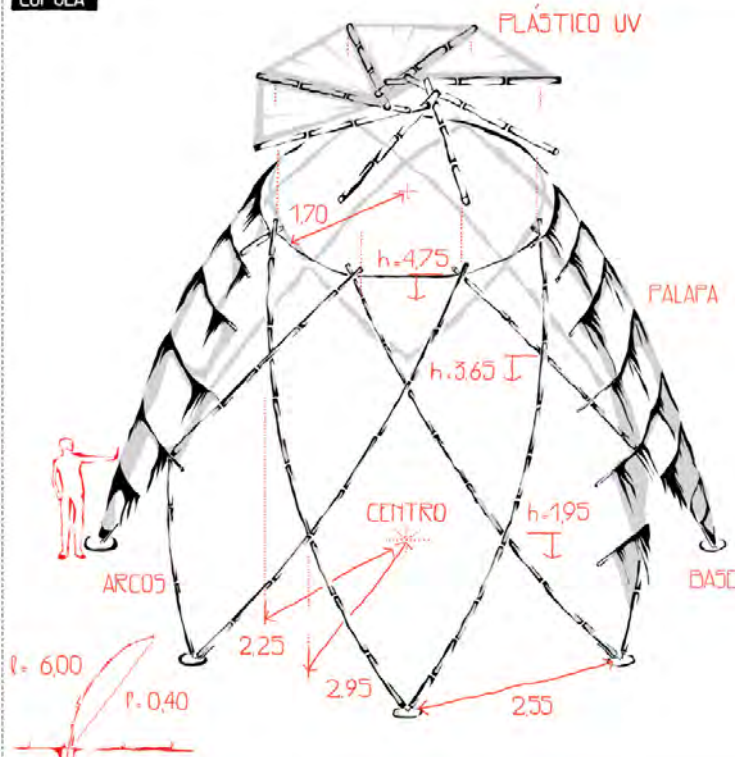
Esta alternativa estructural puede ser aprovechada en espacios que tiendan a ser largos. Los arcos son zunchados entre sí, con cuerdas o alambre recocido. Las dimensiones son una propuesta propia, sin embargo, estas pueden ser modificadas por el constructor. Estas estructuras pueden ser cubierta con hoja de palma o alguna hoja disponible en la zona.

INSTALACIÓN

Las bases son realizadas a una distancia de 1,35 m entre sí y 7 m de las que se encuentran en el lado opuesto. Se dispone el primer arco, fijándolo a la base y ubicando la parte más alta a 4,75 m de altura, esto se puede corroborar atando un hilo y un plomo al extremo más alto del arco. Si trazamos un ángulo de 20° obtendremos su ubicación horizontal. Los arcos orientados en un sentido van siempre sobre los que están orientados en sentido opuesto. Con el apoyo de andamios, se procede a zunchar las uniones resultantes de los cruces entre los arcos, asegurándose de que queden en su posición final. Finalizado, se sugiere reforzar todas las uniones, incluyendo las bases. Puede ser necesario el uso de cables para evitar la flexión excesiva de la estructura.

6

CÚPULA



CONSTRUCCIÓN DE UNA CÚPULA

Esta alternativa estructural puede ser aprovechada en espacios que tiendan a ser centrales. Los arcos son zunchados entre sí, con cuerdas o alambre recocido. Las dimensiones son una propuesta propia, sin embargo, estas pueden ser modificadas por el constructor. Estas estructuras pueden ser cubierta con alguna hoja disponible en la zona. Para este caso, la parte superior se cubrió con plástico para invernaderos con protección UV.

INSTALACIÓN

Se traza un círculo de 7.10 m y desde el centro, se lo divide en ocho partes iguales. Se dispone el primer arco, fijándolo a la base y ubicando la parte más alta a 4.75 m de altura, esto se puede corroborar atando un hilo y un plomo al extremo más alto del arco. Los arcos orientados en un sentido van siempre sobre los que están orientados en sentido opuesto. Una vez instalados los arcos y con el apoyo de andamios, se procede a zunchar las uniones resultantes de los cruces entre los arcos, asegurándose de que queden en su posición final. Una vez terminada, se sugiere reforzar todas las uniones, incluyendo las bases. Puede ser necesario el uso de cables para evitar la flexión excesiva de la estructura.

7

USO DE ESTA GUÍA

Esta guía fue realizada con el propósito de representar una alternativa constructiva a las estructuras de madera conocidas como tejaban que, posteriormente, son cubierta con hojas de palma. La propuesta procura ser segura y asequible para estas comunidades, sin embargo, por ser una estructura de grandes claros, se puede requerir la intervención de especialistas durante su diseño y construcción. Si se planea construir una estructura significativamente más grande de lo aquí propuesto, o será utilizada asiduamente por personas, como es el caso de un taller o un aula, el acompañamiento de un profesional resulta ineludible. **Ninguna de las personas involucradas en esta investigación es responsable de una estructura que no pueda ser diseñada y supervisada debidamente, por lo que se sugiere que, en caso de dudas, se consulte con especialista.**

La información aquí presentada, es fruto de una investigación académica que tuvo en cuenta gran parte de la normativa internacional referente al uso del bambú en estructuras y la opinión de maestros bambuseros de la zona e ingenieros estructurales. Sin embargo, esta propuesta es susceptible de ser mejorada en muchos aspectos, teniendo en cuenta la experiencia de artesanos del *otote*, quienes trabajan este material hace generaciones y que resultan imprescindibles para continuar mejorando la propuesta.

Se realizó la construcción de una estructura tipo bóveda en las Cascadas de Comala, próxima a la localidad de Chiquilistlán, Jalisco. Puedes encontrar las fotos entre los trabajos expuestos en el siguiente enlace: <https://arc-lucashequin.jimdofree.com/>

Si se desea ampliar la información acerca del bambú, sus procesos de producción y aplicación a estructuras, se sugiere los libros de: "Bambú. El regalo de los dioses de Oscar Hidalgo-López, el "Manual de construcción con bambú", del mismo autor y "Construir con Bambú. Manual de construcción" de Jorge Morán Ubidia. Resultan fáciles de encontrar en Internet.

Si se desea descargar esta guía en formato digital, ingrese la siguiente ruta en su navegador: <https://drive.google.com/drive/folders/12l-Y1RRA4zuIM-VKw1wCpEgt7DREW14UV7?usp=sharing>

Puedes encontrar la investigación completa de esta guía en el Repositorio Institucional del ITESO (Universidad Jesuita de Guadalajara), ingresando al Departamento de Hábitat y Desarrollo Urbano / DHDU- Trabajos de fin de maestría en Proyectos y Edificación Sustentable, donde la podrás encontrar con el nombre "Sistema Estructural de Bambú para Cubiertas de Grandes Claros en Comunidades Rurales de Jalisco".

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue realizado gracias a la colaboración de:

- Karen González y Luis Mireles, quienes apoyaron incansablemente con la logística durante la construcción del prototipo construido en las Cascadas de Comala.
- Las personas pertenecientes a las comunidades de Cuzalapa, El Limón, El Fresnito, El Rodeo y Chiquilistlán, que brindaron información relevante a través de entrevistas.
- Al Dr. Nayar Gutiérrez, director de la investigación de la que este documento forma parte, por su apoyo permanente a lo largo de dos años de arduo trabajo.
- Al Fondo de Apoyos a la Investigación (FAI) del ITESO, departamento que financió la estructura que fue construida.



8

Nota. De elaboración propia.

Anexo 4: Cartas de vinculación social



UNIVERSIDAD DE GUADALAJARA
CENTRO UNIVERSITARIO DEL SUR
CENTRO DE INVESTIGACIONES EN TERRITORIO Y RURALIDAD

ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HHNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca cooperar con el proyecto de investigación Kuautlali, que la Universidad de Guadalajara –UDG- lleva a delante en zonas rurales del sur occidente de Jalisco, con el objetivo de desarrollar cubiertas de bambú, adecuadas a las posibilidades y necesidades de estas comunidades.

A continuación, firma el actor involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.

Firma

Dr. Alejandro Macías Macías

Director Centro de Investigaciones en
Territorio y Ruralidad



Ciudad Guzmán, Jal., 30 de marzo de 2022

Av. Enrique Arreola Silva 883, Centro, C.P. 49000
Cd. Guzmán, Jalisco, México, (01341) 575.22.22 ext. 46007, Fax 46066
www.cusur.udg.mx



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022

Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.

Firma

Dagoberto Rosas Zúñiga

Nombre y apellidos

agricultor

Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022


Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.


Firma


Nombre y apellidos

Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022


Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

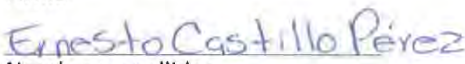
Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

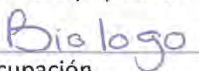
A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.



Firma



Nombre y apellidos



Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022

Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.

Lucas Henquín

Firma

Lucas Henquín

Nombre y apellidos

artesano

Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes claros en comunidades rurales de Jalisco**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2023

Comunidad rural de Chiquilistlán

Carta de vinculación

Por medio del presente documento, constato el trabajo y compromiso del Arquitecto Lucas Alberto Henquín, CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO– en la Ciudad de Guadalajara, Jalisco.

El arquitecto ha trabajado con nuestra comunidad, a través de su proyecto de investigación “Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes claros en comunidades rurales de Jalisco”, que tiene como propósito atender demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación.

Firma

Luis Alberto Mireles Rubio

Nombre y apellidos

Encargado Área de Cascadas de Comala.

Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022


Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.



Firma
Luz María Mekhor H.
Nombre y apellidos
AMA DE CASA
Ocupación



ITESO - Universidad Jesuita de Guadalajara

Maestría en Proyectos y Edificación Sustentables.

Trabajo de investigación: **Sistema estructural de bambú para cubiertas de grandes luces**

Alumno: Arq. Lucas Henquín

Marzo de 2022

Comunidad: Color de la tierra.

Carta de vinculación

Por medio de la presente me permito constatar mi participación como entrevistado, en el trabajo de obtención de grado de maestría del arquitecto Lucas Alberto Henquín, con CURP HEXL850504HNENXC01, aspirante a obtener el grado de Maestro en Proyectos y Edificación Sustentables por parte de la Universidad Jesuita de Guadalajara –ITESO- en la ciudad de Guadalajara, Jalisco.

La investigación busca desarrollar cubiertas en bambú adecuadas a nuestros recursos y posibilidades para resolver demandas espaciales de nuestra comunidad.

A continuación, firma el actor local involucrado en el proceso de investigación, cuya información resulta clave en el desarrollo del trabajo.

Firma

Rodolfo González Figueroa

Nombre y apellidos

Neocampesino asesor agroecológico

Ocupación

REFERENCIAS

- Aguirre Cadena, J., Cadena Iñiguez, J., Ramírez Valverde, B., Juárez Sánchez, J., Caso Barrera, L., & Martínez Carrera, D. (2018). Sistemas de producción de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth y *Bambusa oldhamii* Munro en la Sierra Nororiental de Puebla, México. *Agroproductividad*, Vol.11, Núm. 8.
- Arcocha, E., García, E., Reyes, J., Silva, E., Bolivar, N., Buenfil, C., & Cortés, G. (2015). Caracterización físico mecánica del recurso natural Bambú presente en el Estado de Campeche, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 2(7).
<http://www.reibci.org/publicados/2015/dic/1400110.pdf>
- Arocha, E., Bolivar, N., Buenfil, C., Cortés, G., García, E., Silva, E., & Reyes, J. (2015). Caracterización físico mecánica del recurso natural Bambú presente en el Estado de Campeche, México. *Revista Iberoamericana de Ciencias*.
- Bali, F. (2021). *Manual práctico. Cultivo y manejo de la guadua en Venezuela*. Mérida, Venezuela.: Instituto Jardín Botánico de Mérida, Universidad de los Andes, INBAR.
- Bárceñas Pazos, G., Mejía Saulés, M., & Ordoñez Candelaria, V. (2002). *Manual para la construcción sustentable con bambú. Gobierno Federal. CONAFOR*. Guadalajara: Gobierno Federal, SEMARNAT. Comisión Nacional Forestal.
- Carmiol Umaña, V. (2010). Guadua en puentes peatonales. *Tecnología en marcha. Volumen 23*, 29-38.
- Carmiol, V. (2009). Bambú Guadua: un recurso ecológico. *Tecnología en Marcha*.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4835838>
- Cedeño Valdiviezo, A., & Irigoyen Castillo, J. (2011). El bambú en México. *USJT. Arquitectura y Urbanismo*, 235.
- CEPAL. (18 de 01 de 2021). *Implicancias de los roles de género en la gobernanza de los recursos naturales en América Latina y el Caribe*. <https://www.cepal.org/es/enfoques/implicancias-roles-genero-la-gobernanza-recursos-naturales-america-latina-caribe>
- Ching, F. D., & Zuberbuhler, D. (2014). *Manual de estructuras ilustrado*. Barcelon, España.: ISBN: 978-84-252-2241-2. Gustavo Gili, SL. .
- Clarck, L., Londoño, X., & Ruiz-Sanchez, E. (2015). Bamboo Taxonomy and Habitat. In *Bamboo The Plant and its Uses*. DOI 10.1007/978-3-319-14133-6_1.
- Color de la Tierra. Café. (2022). *Color de la tierra. Café*. <https://www.facebook.com/ColordelaTierra/>
- Comisión Colegiada y Permanente de Fomento Agropecuario, Forestal y Piscícola. (14 de Abril de 2021). Dictamen de comisión y propuesta de acuerdo del ayuntamiento de El Limón, Jalisco. <http://admin.ellimon.gob.mx/Documentos/Paginas/7a3c374c-8015-4ea6-ba65-d68355a9dc79/DECLARATORIA%20COMO%20MUNICIPIO%20AGROECOLOGICO.pdf>
- CONAGUA, C. N. (Marzo de 2021). Catálogo general de precios unitarios 2021. *Catálogo*.
- Dransfield, J., Clark, L., Govearts, R., & Vorontsova, M. (2016). *World checklist of bamboos and rattans*. Beijing, China.: ISBN: 978-92-95098-99-2. INBAR, Technical Report No. 37.
- E100. (2012). *Norma Técnica E100 Bambú*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.

- Engel, H. (2003). *Sistemas de estructuras*. Barcelona, España.: ISBN: 84-252-1800-4. Gustavo Gili, SA.
- Espuna Mújica, J., Roux Gutiérrez, R., & Sánchez medrano, M. (2016). El bambú como elemento estructural: la especie *Gudua amplexifolia*. *Nova Scientia. Revista de Investigación de la Universidad De La Salle Bajío*, 8(17), 657-677.
- FAO. (2020). *Global forest resources assessment. Main report*. Roma: ISBN: 978-92-5-132974-0. FAO. <https://doi.org/https://doi.org/10.4060/ca9825en>
- Fernández Jiménez, A. (2020). La catenaria y su influencia en la arquitectura de Gaudí. *La Gaceta de la RSME*, 23(2), 303-323.
- Fonseca-González, W., & Rojas Vargas, M. (2016). Acumulación y predicción de biomasa y carbono en plantaciones de bambú en Costa Rica. *Ambiente y Desarrollo*, XX(38). <https://revistas.javeriana.edu.co/index.php/ambienteydesarrollo/article/view/13126/12745>
- Grammont, H. (Mayo-Agosto de 2010). La evolución de la producción agropecuaria en el campo mexicano: concentración productiva, pobreza y pluriactividad. *Andamios. Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de México*. ISSN 1870-0063, 7(13), 85-117. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1870-00632010000200005
- Hidalgo López, Ó. (2003). *Bamboo. The gift of the gods*. University of Minnesota: O. Hidalgo-Lopez.
- Huerta, S. (2004). *Arcos, bóvedas y cúpulas. Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica*. Madrid.: Instituto Juan de Herrera. Escuela Técnica Superior de Arquitectura de madrid.
- IBUKU;. (Abril de 2023). *IBUKU*. -: <https://ibuku.com/>
- IIEG - Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco. (2022). *Cifras de empleo formal en Jalisco en septiembre de 2022 por sector de actividad económica y municipio*. Guadalajara: Gobierno del Estado de Jalisco. <https://iieg.gob.mx/ns/wp-content/uploads/2022/09/Ficha-informativa-empleo-IMSS-agosto-por-sector-20220906.pdf>
- IIEG - Instituto de Información Estadística y Geográfica de Jalisco. (2021). *Indicadores del sector primario de Jalisco que se encuentran en la nueva consulta interactiva del IIEG*. Guadalajara: Gobierno del Estado de Jalisco. https://iieg.gob.mx/ns/?page_id=284
- INBAR. (2015). *International Bamboo and Rattan Organization. Bambú: Cambio Climático*. <https://www.inbar.int/es/programmes/sdg13-climate-change/>
- ISO. (2019). *ISO-22157 - Bamboo structures - Determination of physical and mechanical properties of bamboo culms - Test methods*. Switzerland. <https://www.iso.org/standard/65950.html>
- ISO. (2021). Estándar internacional ISO 22156. En *Bamboo - Structural design*. <https://www.iso.org/standard/73831.html>
- ISO. (Junio de 2021). *ISO 22156 - Bamboo - Structural Design*. Organización Internacional de Normalización: <https://www.iso.org/standard/73831.html>
- Juárez Caratachea, A., Gutiérrez Vázquez, E., Segura Correa, J., & Santos Ricalde, R. (2010). Calidad del huevo de gallinas criollas ciradas en trapatio en Michoacán, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems, vol12, núm. 1. E-ISSN: 1870-0462. Universidad Autónoma de Yucatán.*, pp. 109-115.

- Kaminski, S., Lawrence, A., Trujillo, D., Feltham, I., & López, F. (2016, December). Structural use of bamboo. Part3: Design values. *The Structural Engineer*, 42-45.
[https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-94-\(2016\)/issue-12/structural-use-of-bamboo-part-3-design-values/](https://www.istructe.org/journal/volumes/volume-94-(2016)/issue-12/structural-use-of-bamboo-part-3-design-values/)
- Labour Department. (2017). *Code of practice for bamboo scaffolding safety*. Hong Kong: Occupational Safety and Health Branch.
https://www.labour.gov.hk/eng/public/content2_8.htm
- Lic. Peña, C., Ing. Agr. Cabrera Paredes, Á. (., Lic. Caro, M. E., Dra. Thomae, A. C., Dr. Arq. Michlena, E. C., Prof. Rúgolo de Agrasar, Z. E., . . . Msc. PhD. Zagare, V. (2015). *Solución bambú. Guía para el manejo sustentable del género Phyllostachys*. Buenos Aires, Argentina.: ISBN: 978-987-33-8429-5. INBAR. International Network For Bamboo & Rattan. Dirección Provincial de Islas. Gobierno de la provincia de Buenos Aires.
- Llaven José, H., Guillén Guillén, C., Castañeda Nolasco, G., & Barnet, Y. (2019). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de una especie de bambú nativa de México (*Otatea fimbriata Soderstrom*). *20*, 171-184. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2019.20.72348>
- Macías Macías, A., & Sevilla García, Y. (2021). Kuautlali, parcela para agricultura sustentable. Respuesta ante la depredación de la naturaleza en el sur de Jalisco, México. *Agroalimentaria*. Vol. 27, Nº 52.
- Meteoblue. (2022). *Archivo meteorológico Guadalajara. Estado de Jalisco*.
https://www.meteoblue.com/es/tiempo/archive/export/guadalajara_m%c3%a9xico_4005539
- Minke, G. (2016). *Building with bamboo. Design and technology of sustainable architecture*. Birkhouser Basel.
- NEC. (2016). *Norma Ecuatoriana de la Construcción (NEC). Estructuras de Guadua (GaK)*. Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda.
- NTC. (2007). *Método de ensayo para determinar las propiedades físicas y mecánicas de la Guadua Angustifolia Kunth*. Bogotá DC.: INCOTEC.
- NTC. (2017). *Normativa Técnica Complementaria para diseño y construcción de estructuras de madera*. <https://www.smie.org.mx/informacion-tecnica/ntc-madera.php>
- Núñez Olivera, J., Cabral Parra, R., Noriega García, M., Godínez Chavoya, J., & Lomelí Rodríguez, S. (2020). Análisis integral de la situación actual del sector agropecuario del Estado de jalisco. Período 1980 - 2018. *Revista Mexicana de Agronegocios*, 46, 474-485.
<https://www.redalyc.org/journal/141/14163631009/html/>
- ONU. (2020). *Naciones Unidas. The Sustainable Development Goals Report*:
<https://unstats.un.org/sdgs/report/2020/>
- Ordoñez Candelaria, V. (1999). Perspectivas del bambú para la construcción en México. *Madera y Bosques*, 5(1). <https://www.redalyc.org/pdf/617/61750102.pdf>
- Ordoñez, C., & Bárcenas, P. (1999). *Caracterización Tecnológica de las Especies Mexicanas de Guadua y sus aplicaciones en la construcción*. Instituto de Ecología AC. Departamento de Productos Forestales y Conservación de Bosques.

- Organización Internacional del Bambú y el Ratán (INBAR). (2022). *ODS 7: Energía Asequible y Limpia*.
<https://www.inbar.int/es/programmes/sdg7-green-energy/>
- Peña, C., & 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."*. Buenos Aires, Argentina.: ISBN 978-987-33-3295-1. Dirección Provincial de Islas. BA.
- Peña, C., & 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."*. Buenos Aires, Argentina.: ISBN 978-987-33-3295-1. Dirección Provincial de Islas. BA.
- Pérez García, N., Rueda González, M., Rojo Martínez, G., Martínez Ruíz, R., Ramírez Valverde, B., & Juárez Sánchez, J. (2009). El bambú como sistema agroforestal: Una alternativa de desarrollo mediante el pago por servicios ambientales en la Sierra Nororiental del Estado de Puebla. *Ra Ximhai*, 333-346.
- Red intercontinental de promoción de la economía social solidaria. (2022). *El Limón, Jalisco, México: Municipio Agroecológico*. <http://www.riposs.org/el-limon-jalisco-mexico-municipio-agroecologico/?lang=es>
- Rodríguez Cuevas, N., & Rocha Gasparri, J. (2012). Observaciones sobre el comportamiento de una estructura espacial apoyada en cuatro puntos. *Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural*.
- Rodríguez Romo, J. (2006). El Bambú como Material de Construcción. *Conciencia Tecnológica*(31).
<https://www.redalyc.org/pdf/944/94403115.pdf>
- Ruiz Sánchez, E. (2019). Los bambúes de México: diversidad, conservación y uso. CONABIO. Biodiversitas.
- Silver, P., McLean, W., & Evans, P. (2014). *Teoría y práctica. Manual de referencia. Ingeniería de estructuras para arquitectos*. Barcelona: Blume.
- Stamm, J. (Abril de 2023). *Bamboo Construction*. -: <https://www.jorgstamm.com/>
- Torres, B., Segarra, M., & Bragança, L. (2019). El bambú como alternativa de construcción sostenible. *Extensionismo, innovación y transferencia tecnológica - Claves para el desarrollo - Volumen 5*, 389 - 400.
- Vásquez, B., & Corrales, S. (29 de Abril de 2016). *Problemas del desarrollo - UNAM*. Industria del Cemento en México: Análisis de sus Determinantes:
<https://www.probdes.iiec.unam.mx/index.php/pde/article/view/56775/61835#toc>
- weatherspark. (2022). *El clima y el tiempo promedio en todo el año en Guadalajara, Jalisco*.
<https://es.weatherspark.com/y/3866/Clima-promedio-en-Guadalajara-M%C3%A9xico-durante-todo-el-a%C3%B1o>
- Yiping, L., Yanxia, L., Buckingham, K., Henley, G., & Guomo, Z. (2010). Bamboo and Climate Change Mitigation. *Technical Report No. 32 - INBAR*.