

**Evaluación del Desempeño del Panel Laminado de la Hoja Caulinar de la Guadua
Angustifolia Kunth como Aislante Térmico**

Valentina Soto Escobar

Código 1522515

Michelle Caroline Urrea Cañas

Código 1424742

Escuela de arquitectura

Facultad de artes integradas, Universidad del Valle

Sede Cali

Proyecto de grado

Arq. Mg. Héctor Fabio Silva Flórez



Noviembre, 2021

Agradecimientos

A nuestro tutor, el Arq. Mg. Héctor Fabio Silva que sabiendo del trabajo juicioso y riguroso que se requería, depositó su confianza en nosotras para llevar a cabo esta investigación. Por su acompañamiento durante todo el proceso, que, a pesar de todas las dificultades en el camino, se logró sacar adelante este valioso proyecto.

Al artista plástico y artesano Julián Neider Martínez, quien nos brindó apoyo, nos guio y nos acogió en su taller para conocer de primera mano su oficio y las bondades que ofrece un material tan apreciado por él, como lo es la hoja caulinar de la guadua.

A la Universidad del Valle, por haberse convertido en nuestro segundo hogar y habernos brindado espacios que nos han permitido desarrollarnos como personas más humanas y conscientes de lo que implica nuestro papel en la sociedad.

A nuestros compañeros y amigos, que han hecho de esta carrera un proceso de aprendizaje más ameno y disfrutable. Y a nuestros docentes, quienes impartieron sus conocimientos de manera profesional e invaluable, con dedicación y empuje.

Finalmente, queremos agradecer a nuestros padres, madres, hermanos y hermanas, esposo, familiares, mascotas y seres queridos por el constante respaldo e infinito apoyo, son el motor que nos impulsa a lograr nuestras metas. Les dedicamos a ustedes este gran logro. Los amamos.

Resumen

Las actuales demandas en el campo de la construcción han llevado a un uso desbordado de los recursos naturales y con esto, un incremento en el impacto ambiental y la insostenibilidad de los procesos industrializados vigentes hoy en día, de lo cual surge la necesidad de buscar tecnologías alternativas que permitan la apropiación de métodos para el aprovechamiento de los residuos orgánicos de las agroindustrias de nuestro país.

Los materiales de origen vegetal nos brindan una gran diversidad de características aprovechables, las cuales permiten innovar en el ámbito de los materiales de construcción. Actualmente, ha aumentado el interés de la utilización de residuos generados a partir de procesos agrícolas, debido a su bajo costo y alta disponibilidad, buscando la reducción del impacto ambiental negativo causado por estos mismos procesos (Rodríguez & Fernández, 2016) ya que actualmente son incinerados o llevados a rellenos sanitarios (Peñaranda et al., 2018), es decir, no hay un aprovechamiento de estos recursos.

En esta ocasión, la hoja caulinar siendo un residuo del proceso biológico de la *Guadua Angustifolia* Kunth, fue objeto de estudio para la determinación de su desempeño térmico al elaborar un panel laminado lo cual nos llevará a contribuir de manera positiva en el medio ambiente y la sostenibilidad que se quiere lograr en la arquitectura. Gracias a la metodología abordada, las pruebas experimentales resultaron en el desarrollo de un material aprovechable en la construcción como aislante térmico, ya que obtuvo resultados óptimos con una diferencia importante de temperatura de 8°C entre la superficie exterior e interior del panel. Estos resultados permitieron llevar a cabo una comparación con materiales existentes en el mercado actualmente como lo son el laminado de esterilla de guadua, el poliestireno expandido y el fibrocemento.

Partiendo de estos resultados, se sugieren recomendaciones para complementar la presente investigación y así tener un amplio conocimiento de los beneficios que suponen el uso de este nuevo material.

Palabras clave: hoja caulinar de guadua, laminado, fibras vegetales, aislamiento térmico, resistencia térmica.

Tabla de contenido

Tabla de contenido	4
Lista de figuras	5
1. Introducción	8
1.1. Problema de investigación	9
2. Objetivos.....	9
2.1. Objetivo general.....	9
2.2. Objetivos específicos.....	10
3. Hipótesis.....	10
4. Justificación.....	10
5. Marco Teórico.....	10
5.1. Cambio climático y sostenibilidad	11
5.2. Arquitectura Sostenible	14
5.3. Confort y arquitectura	19
5.4. Envolventes arquitectónicas	19
5.5. Guadua.....	21
5.6. Resistencia térmica.....	42
6. Estado del arte.....	45
7. Metodología	53
7.1. Revisión bibliográfica y literaria	53
7.2. Elaboración de panel laminado de hoja caulinar de guadua	53
7.3. Pruebas experimentales de desempeño térmico	54
7.4. Resultados y análisis comparativo	54
8. Desarrollo	55
8.1. Revisión bibliográfica y literaria.....	55
8.2. Elaboración de panel laminando de hoja caulinar de guadua	55
8.3. Pruebas	62
9. Resultados.....	70
9.1. Análisis comparativo	76
10. Conclusiones	84
10.1 Recomendaciones.....	85
11. Bibliografía.....	86

Lista de figuras

Figura 1 Concentraciones de gases de efecto invernadero.....	12
Figura 2 Variación de la temperatura media anual del aire, 1960-2009	13
Figura 3 Huella ecológica mundial	16
Figura 4 Reserva o déficit ecológico. Biocapacidad mundial.....	17
Figura 5 La casa ensamble Chacarrá	22
Figura 6 Licorera bandeja	22
Figura 7 Puente en guadua Arnulfo Briceño	23
Figura 8 La distribución geográfica natural del bambú	24
Figura 9 Sistema de Rizoma Paquiformo, Partes.....	26
Figura 10 Red de Rizomas	27
Figura 11 Renuevo de guadua.....	28
Figura 12 Culmos jóvenes aún con hojas caulinares	29
Figura 13 Distribución no-uniforme de las fibras en la sección transversal del culmo. Vista microscópica.....	30
Figura 14 Hoja caulinar	31
Figura 15 Bambusa Guadua Humbold y Bonpland	32
Figura 16 Bambusa Guadua Humbold y Bonpland	33
Figura 17 Proceso de la fabricación de esterilla.....	36
Figura 18 Muro embutido en tierra	38
Figura 19 Bahareque en tabla.....	38
Figura 20 Bahareque metálico	39
Figura 21 Bahareque encementado con recubrimiento en mortero de cemento	40
Figura 22 Bahareque encementado con recubrimiento en mortero de cemento y malla metálica	41
Figura 23 Proceso de acabado	42
Figura 24 Recolección de hojas caulinares en el guadual.....	46
Figura 25 Corte de la hoja caulinar en el guadual	47
Figura 26 Cuadro con hoja caulinar tinturado con tinta china.....	48
Figura 27 Prensa hidráulica	56
Figura 28 Bandeja de la prensa hidráulica	56

Figura 29 Transformación de la hoja.....	57
Figura 30 Panel armado	58
Figura 31 Láminas organizadas	59
Figura 32 Pegante PL 285	59
Figura 33 Aplicación del pegante	60
Figura 34 Composición de panel.....	60
Figura 35 Armado de panel en el molde de la prensa	61
Figura 36 Solar Power Meter	63
Figura 37 UT33C+ Palm Size Multimeter.....	63
Figura 38 Equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales	64
Figura 39 Prueba de campo afuera del edificio D5 para determinar BTU	66
Figura 40 Equipo experimental con soporte ajustado.....	66
Figura 41 Termocupla, caucho moldeable y aluminio	67
Figura 42 Equipo experimental en funcionamiento	68
Figura 43 Laminado de esterilla de guadua	68
Figura 44 Fibrocemento	69
Figura 45 Poliestireno expandido.....	69
Figura 46 Comportamiento de la temperatura en probeta #1 laminado de hoja caulinar	77
Figura 47 Comportamiento de la temperatura en probeta #2 laminado de hoja caulinar	77
Figura 48 Comportamiento de la temperatura en probeta #3 laminado de hoja caulinar	78
Figura 49 Comportamiento de la temperatura en probeta laminado de esterilla	79
Figura 50 Comportamiento de la temperatura en probeta poliestireno expandido.....	80
Figura 51 Comportamiento de la temperatura en probeta fibrocemento	80
Figura 52 Diferencias de temperatura de todas las probetas	81

Lista de tablas

Tabla 1 Hoja caulinar	34
Tabla 2 Resultados finales de coeficiente de conductividad térmica de la tierra y la esterilla de guadua.....	44
Tabla 3 coeficiente de conductividad térmica.....	44
Tabla 4 Características de los paneles	62
Tabla 5 Características de los paneles de materiales de referencia.....	65
Tabla 6 Densidades de las probetas	65
Tabla 7 Resultados prueba 1, probeta #1 laminado de hoja caulinar	71
Tabla 8 Resultados prueba 2, probeta #2 laminado de hoja caulinar	72
Tabla 9 Resultados prueba 3, probeta #3 laminado de hoja caulinar	73
Tabla 10 Resultados prueba 4, probeta laminado de esterilla	74
Tabla 11 Resultados prueba 5, probeta poliestireno expandido	75
Tabla 12 Resultados prueba 6, probeta fibrocemento	76
Tabla 13 Espesor, densidad y diferencia de temperatura estable de las probetas	82
Tabla 14 Coeficiente k y valor R de los materiales de referencia	83
Tabla 15 Temperatura estable de la cara con exposición indirecta	83

1. Introducción

Actualmente, debido a la industrialización, los procesos de construcción han cambiado y se han presentado inconvenientes tales como el aumento de la contaminación, la huella ecológica, alteración de los ecosistemas y las emisiones de carbono en la atmósfera (Eurosur, n.d.). Es por esto que se ha incrementado el interés por el uso de recursos sostenibles y renovables, para así mitigar esta problemática, e incluso se propone retomar técnicas y materiales constructivos propios de cada región (Argentina Green Building Council, 2019).

Desde el oficio de la arquitectura, crear soluciones técnico-constructivas de la mano de factores tanto ecológicos como sostenibles, es la manera de contribuir a la reducción de la contaminación ambiental. Así se establecen ciertos criterios desde la perspectiva bioclimática para lograr esta reducción, donde a su vez, nace la necesidad de conocer las propiedades térmicas del material a usar en el diseño arquitectónico, para así aplicarlo adecuadamente al medio al que será sometido. Esta aplicación influye directamente en la habitabilidad del usuario, lo cual involucra factores económicos, sociales, espaciales y ambientales; siendo este último el pilar fundamental para llevar a cabo el desarrollo de esta investigación, de la mano del uso de las fibras vegetales disponibles en nuestro contexto inmediato.

Este es el caso de la guadua, la cual es un recurso natural que posee múltiples bondades y características óptimas para ser investigadas desde distintas perspectivas, partiendo desde su composición, hasta su funcionamiento individual dentro del guadual; y cómo a partir de esto se crea un sistema en el medio en que se encuentra, dando como resultado aportes positivos en el ámbito ecológico.

Gracias a sus propiedades físico- mecánicas, la guadua se transforma en un recurso apto para ser utilizado en la construcción. En nuestro contexto social, esta fibra ha sido usada como material constructivo ancestralmente, de lo cual se han desprendido distintas técnicas y variaciones en este campo, lo que permite que aún hoy siga siendo objeto de estudio. Sin embargo, su uso ha sido desplazado por técnicas y materiales industrializados, buscando rapidez y economía, pero dejando a un lado factores ambientales y de confort térmico.

El aporte de sostenibilidad en la construcción que se presenta en esta investigación es el desarrollo de una envolvente arquitectónica a partir de la hoja caulinar de la *Guadua Angustifolia* Kunth, la cual es un residuo orgánico usado hoy en día principalmente para la fabricación de elementos artesanales (Arteasanías del Quindío, n.d.). La envolvente tiene un impacto en la eficiencia de una edificación, por lo que surge la inquietud de determinar sus propiedades térmicas para implementar su uso en otros procesos tecnológicos que puedan resultar beneficiosos en términos constructivos y ambientales.

1.1. Problema de investigación

No hay conocimiento de los beneficios que supone el uso de la hoja caulinar de la *Guadua Angustifolia* Kunth en cuanto a su posible óptimo desempeño térmico y su transformación para la elaboración de materiales que puedan ser utilizados en el ámbito de la construcción, ya que actualmente se identifica principalmente como residuo orgánico.

En general sobre los residuos orgánico existe poca información sobre sus posibles usos lo que genera una serie de inconvenientes, entre ellos medioambientales (Residuos Profesional, n.d.). Las principales causas concernientes a esta investigación son:

- No se reutilizan ni se reciclan los residuos orgánicos generando mucho desperdicio, especialmente en Colombia (Semana Sostenible, 2020).
- Se hace uso de materiales principalmente inorgánicos con alta huella de carbono en el ámbito de la construcción (García Ochoa et al., 2020).
- Abandono de técnicas artesanales que generaban un impacto positivo en el medio ambiente (Cinieri & Zamperini, 2013).

Como resultado, surgen efectos tales como: Altos índices de contaminación (Semana Sostenible, 2020), pérdida acelerada de recursos naturales y uso de métodos insostenibles, uso de materiales de producción en masa y procesos contaminantes, y más gastos en procesos constructivos con resultados que no satisfacen las expectativas iniciales (Iberdrola, n.d.).

A partir de la identificación de esas problemáticas, se pone en cuestión cómo evitar que la hoja caulinar se siga convirtiendo en un desecho¹ y por el contrario sea utilizada con un fin específico que genere beneficios. En este caso, será transformada en un material que podría ser usado en el ámbito de la construcción como aislante térmico, por lo tanto, es necesario determinar sus propiedades térmicas y su comportamiento frente a materiales usados en el mercado actual.

2. Objetivos.

2.1. Objetivo general.

Identificar el desempeño térmico del panel laminado de hoja caulinar de guadua como aislante térmico.

¹ Fuente: <https://eacnur.org/blog/cuales-las-consecuencias-no-reciclar/>

2.2. Objetivos específicos.

- a. Elaboración del panel laminado de hoja caulinar con la prensa hidráulica.
- b. Determinar el desempeño del panel laminado de hoja caulinar, por medio de la prueba con el equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales.
- c. Establecer comparaciones con materiales convencionales disponibles en el mercado.

3. Hipótesis.

Se parte del supuesto de que, al aglomerar el residuo orgánico de la guadua, en este caso las hojas caulinares, se obtenga un material resistente cuyas propiedades térmicas sean favorables para ser usado como material en el ámbito de la construcción, mostrando una capacidad aislante competitiva frente a los materiales de uso convencional existentes en el mercado.

4. Justificación.

Las fibras vegetales poseen características físico- mecánicas que las hacen óptimas para ser utilizadas como material de construcción (Herrera Franco & Valadez Gonzalez, 2008). Entre estas características se pueden identificar la baja densidad, aislamiento térmico y resistencia estructural (Cadena & Bula, 2002), por lo tanto es beneficioso crear una envolvente arquitectónica la cual parta de un material orgánico de alta disponibilidad, renovable, y sostenible, que contribuya a la mitigación del impacto medioambiental e incluso podría aportar un valor estético agradable.

Implementar en la construcción y realizar estudios sobre el laminado de hoja caulinar de la guadua, ayuda a masificar los conocimientos, impulsando el uso racional de los recursos naturales y contribuyendo a la creación de conciencia y preservación ambiental.

5. Marco Teórico

En el contexto social, laboral, y económico en el cual nos encontramos enmarcados, es habitual escuchar hablar sobre el término “desarrollo sostenible” el cual fue utilizado por primera vez en el Informe Brundtland de la ONU (1987) y buscaba el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

Teniendo en cuenta que esta investigación está enmarcada en el ámbito de la construcción, es importante mencionar que esta actividad es productora del 40% de las emisiones de CO₂ (S.N, 2017) que contaminan el planeta tierra, un problema en

ascenso. A partir de este planteamiento, crece el interés por realizar acciones encaminadas a solucionar o mitigar este problema. Una de las maneras más habituales de cumplir con este fin, es por medio de la utilización de materiales más amigables con el medio ambiente, cuyo ciclo de vida acarree ventajas y su huella de carbono² sea menor a la de los usados convencionalmente. Es por esto que se orienta a encontrar materiales orgánicos, de alta reposición, sostenibles, que sean resistentes, económicos, y fáciles de trabajar.

Una de las determinantes a la hora de escoger un material para ser utilizado en el ámbito de la construcción, específicamente en envolventes arquitectónicas, es conocer sus propiedades de conductividad y resistencia térmica, siendo la primera una propiedad física que define la capacidad de un cuerpo para transmitir energía térmica a otro (Çengel, 2007), y la resistencia una propiedad del calor y una medida de la diferencia de temperatura por la cual un objeto o material resiste un flujo de calor (Connor, 2020). Esto es relevante ya que esta propiedad determinará qué tan efectivo será este material en ciertas condiciones climáticas y de temperatura.

Para esta investigación será objeto de estudio la hoja caulinar de la guadua, la cual sale directamente del tallo y suele aparecer en los primeros estadios de crecimiento, con una función protectora (Londoño, 2002). Esta hoja será transformada en un panel laminado utilizando un método basado en la elaboración de la madera contrachapada. Actualmente la Norma Técnica Colombiana 6191 “Hojas Caulinares de Guadua angustifolia Kunth y productos artesanales elaborados a partir de ellas”, normatiza este recurso y sus productos artesanales derivados de ella, y será tomada como referencia en la realización de la envolvente con posibles modificaciones.

5.1. Cambio climático y sostenibilidad

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (CMNUCC) (1992), el cambio climático se definió como el cambio generado en el clima debido a la acción directa o indirecta de los humanos, alterando el estado de la atmósfera terrestre y que perdura durante un tiempo extendido, imponiéndose como una de las variabilidades naturales del clima, es decir, incluyéndose como una nueva normalidad.

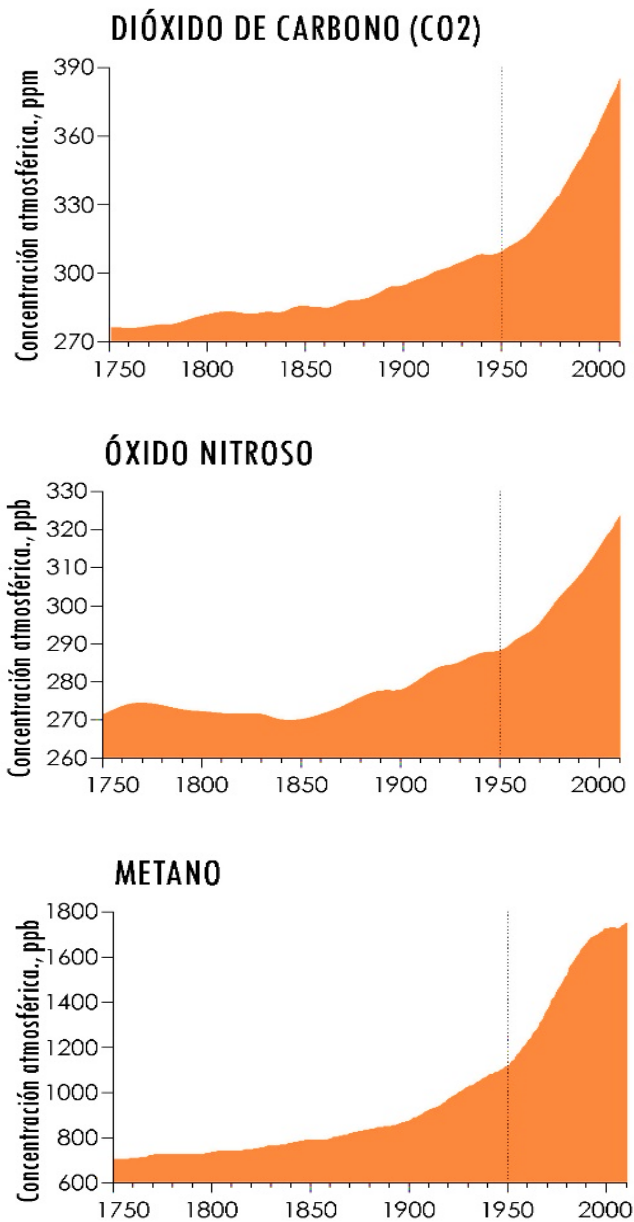
Es necesario aclarar que la causa del cambio climático es el calentamiento global, el cual es el aumento de la temperatura del planeta provocado por las emisiones a la atmósfera de gases de efecto invernadero, y está ligado con el inicio de la Revolución Industrial, a finales del siglo XVIII. Esta época también fue definida como el Antropoceno (Crutzen, 2002), y se explica como el periodo en el cual el planeta está experimentando grandes cambios negativos, evidentemente causados por la acción del ser humano y que afectan desde la biodiversidad hasta a la composición de la atmósfera, o, en resumen, la Edad de los seres humanos (Allenby, 2006).

² Totalidad de gases de efecto invernadero emitidos por efecto directo o indirecto por un individuo, organización, evento o producto. (Wikipedia, 2012)

En los siguientes gráficos se mostrarán dos recopilaciones de datos en los cuales se evidencia el aumento de las concentraciones de gases de efecto invernadero desde el año 1750 hasta el año 2000 (Figura 1) y la variación de la temperatura media anual del aire, desde el año 1960 hasta el año 2009 (Figura 2), apoyando lo dicho anteriormente.

Figura 1

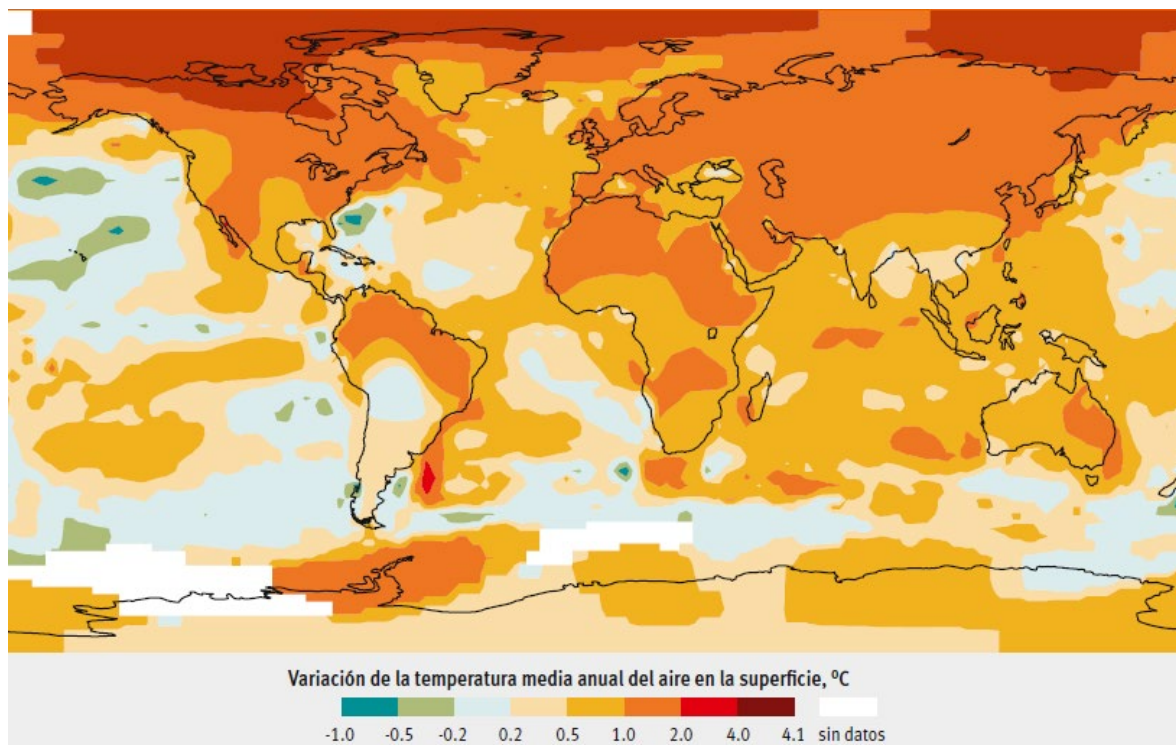
Concentraciones de gases de efecto invernadero



Nota. Adaptado de “The trajectory of the anthropocene: The great acceleration”, Steffen et al., 2015, *Sage Journals*.

Figura 2

Variación de la temperatura media anual del aire, 1960-2009



Nota. Adaptado de “Resumen para responsables de políticas” (p. 6), Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, 2012, Geo5.

El término sostenibilidad nace en los años 80 con el informe Brundtland donde se determinó que la tierra había alcanzado y sobrepasado los límites que se tenían establecidos para que ésta fuese capaz de sostener la vida humana, y, en consecuencia, amenazando el futuro la misma. (Meadows et al., 1972). Sostenibilidad se define entonces como “aquel que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones para satisfacer sus propias necesidades”.

La revista científica *Proceedings of the National Academy of Science* sugiere que debe actualizarse la definición establecida en el informe Brundtland, y propone una, la cual incluye a la ciencia como factor importante en la sostenibilidad: “La emergencia de la ‘Ciencia de la Sostenibilidad’ se construye hacia la comprensión de la interacción humanidad-ambiente con el doble objetivo de atender a las necesidades de la sociedad, al tiempo que se preservan los sistemas que dan soporte a la vida en el planeta” (Turner et al., 2003). Estos términos buscan evitar que la humanidad siga pensando en esto como un problema menor, y ayuda a crear conciencia del gran inconveniente y la verdadera magnitud del mismo. (Naciones Unidas, 2012).

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible de 2012 (Río +20), se expuso el quinto informe global GEO 5 (2012) el cual evaluó el estado de los acuerdos que se realizaron previamente, cuál ha sido su aplicación y eficacia, y

evidenció que de los noventa objetivos ambientales que se tenían planeados para esa fecha, sólo cuatro habían logrado un cambio significativo, y treinta y dos no tuvieron cambio alguno o incluso sufrieron retroceso.

Además de dar a conocer esas problemáticas, el GEO 5 plantea estrategias para su manejo enfocadas en tener una visión convincente de la sostenibilidad con enfoques y metas comunes basados en los conocimientos científicos y ejercer influencia por medio de la educación y la sensibilización, utilizando incentivos para promover buenas prácticas de sostenibilidad.

Con este cambio de mentalidad, y el entendimiento de que la tierra posee recursos limitados, se han dado desarrollos científicos y tecnológicos importantes, que han aportado a ese objetivo general que es el desarrollo sostenible, iniciando siempre por una educación ambiental. De esta manera, no sólo se “hace” sino que se “enseña y se aprende a hacer”.

5.2. Arquitectura Sostenible

La calidad medioambiental asocia el confort de los seres humanos al desarrollo sostenible de los recursos naturales y al control de los residuos. Aplicado a la arquitectura, este concepto supone la incorporación de nuevas exigencias en todo el proceso constructivo, alterando las costumbres de profesionales y usuarios. (Gauzin-Müller et al., 2002)

A la hora de hablar de arquitectura sostenible, se tiene en cuenta el respeto y compromiso con el medio ambiente. Se requiere un uso consciente y eficiente de los materiales, recursos, y procesos, buscando siempre reducir el impacto ambiental. Esto no sólo abarca edificios propiamente dichos, sino también el entorno y la manera cómo se integran para formar desarrollo urbano. (Ramirez, 2009)

La arquitectura sostenible posee un carácter multifocal, es decir, que implica distintos aspectos, como lo son: tecnológicos, políticos, sociales, económicos, ecológicos y éticos. Y se debe tener esto muy presente, ya que los beneficios y cambios se darán en muchos ámbitos, convirtiendo a la construcción sostenible en el enfoque principal. (Acosta, 1986)

En el texto de Domingo Acosta, se argumenta que la arquitectura y la construcción contribuyen al desarrollo de un país, tanto en lo social como en lo económico, sin embargo, también generan un impacto negativo en el medio ambiente, a través de la ocupación del espacio y del paisaje, de la extracción de recursos, y de la generación de residuos y contaminación. Los recursos que se utilizan convencionalmente son no renovables, como la minería y los recursos energéticos, afectando entonces también los recursos hídricos. Sin embargo, se han estudiado diversas maneras para que esto pueda cambiar y se han planteado soluciones que han demostrado ser muy eficaces para corregir este daño.

Se sabe que el consumo energético está presente durante todo el ciclo de vida de las edificaciones, comenzando por la extracción de materia prima y su transporte a las obras, pasando por el uso de las edificaciones, hasta las posteriores modificaciones y

demolición. Además, a la hora de ser transformados para su uso en las edificaciones, se generan desechos y residuos en forma de gases, calor y escombros, aumentando la contaminación y desechos tóxicos, originando costos adicionales por el material que se pierde, la mano de obra y energía adicionales que se emplean (Acosta, 1986), por lo tanto hay que aplicar mecanismos que contrarresten esto.

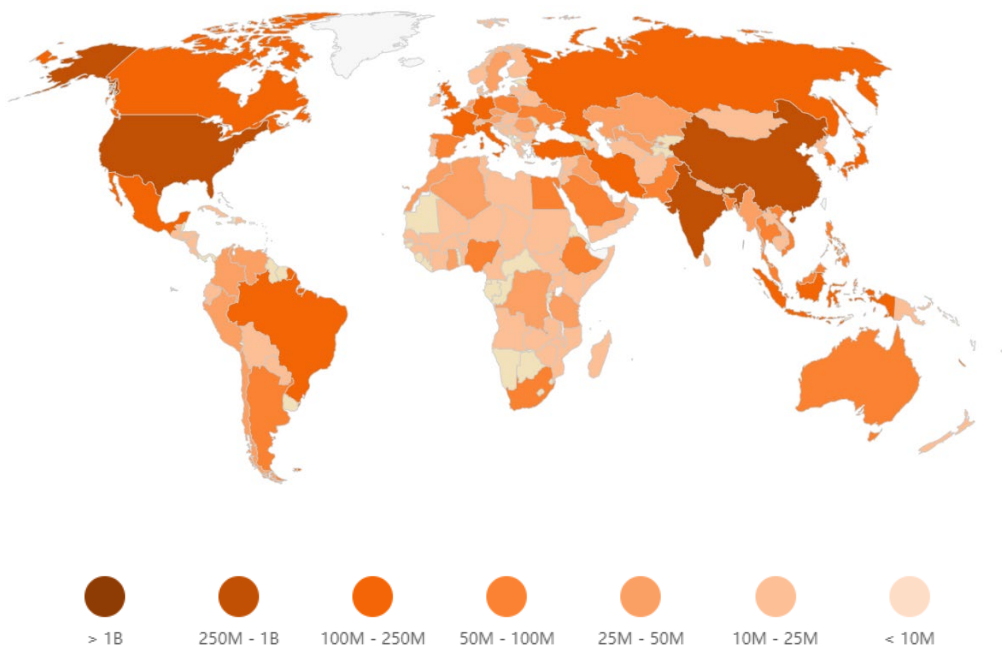
La huella ecológica³ media por habitante estimada es de 2,8 hectáreas, mientras que la superficie ecológicamente productiva o biocapacidad de la Tierra, es de 1,7 hectáreas por habitante, incluyendo los ecosistemas marinos, es decir que se está utilizando 1.6 veces la biocapacidad⁴ de la tierra. Esto confirma que se está generando un daño mayor del que la tierra es capaz de mitigar. (Vilches et al., 2009)

En la siguiente se muestra la huella ecológica de cada país. Está expresado en la unidad estándar llamada hectáreas globales (HAG)⁵. A medida que incrementa el tono rojizo, significa que la huella ecológica de ese país es mayor.

³ Es un indicador del impacto ambiental generado por la demanda humana que se hace de los recursos existentes en los ecosistemas del planeta, relacionándola con la capacidad ecológica de la Tierra de regenerar sus recursos (Wikipedia, 2018).

⁴ Se refiere a la capacidad de un área específica biológicamente productiva de generar un abastecimiento regular de recursos renovables y de absorber los desechos resultantes de su consumo (GreenFacts, n.d.).

⁵ Unidad de medida empleada para cuantificar la bio capacidad del planeta. Una hectárea global es la media de la bioproductividad de todas las hectáreas consideradas "productivas" en la Tierra (Wikipedia, 2008).

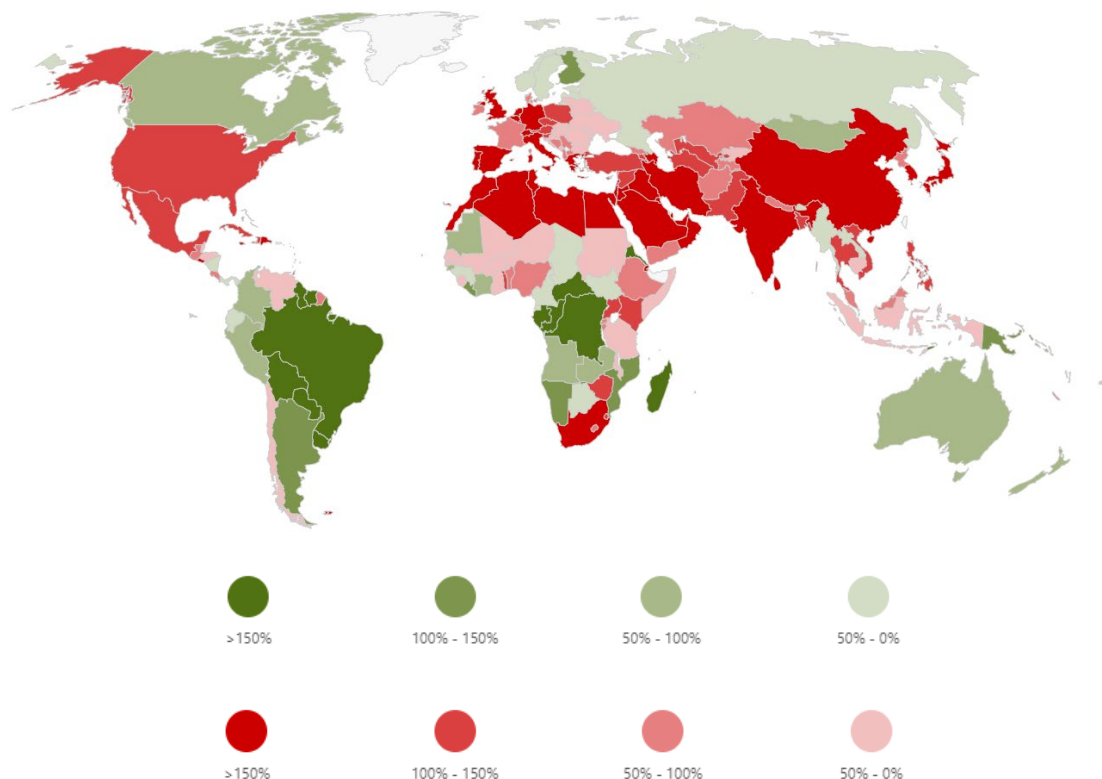
Figura 3*Huella ecológica mundial*

Nota. Adaptado de *Huella ecológica total*, por Global Footprint Network, 2019, Footprint Network (<https://data.footprintnetwork.org/#/>).

En la Figura 4 se muestra cuál es la capacidad ambiental de cada país. En tonos verdes los países que son “acreedores de biocapacidad” es decir, que su biocapacidad es mayor a su huella ecológica, y en tonos rojizos los países que son “deudores de biocapacidad”, es decir, los países que tienen una huella ecológica mayor a la biocapacidad.

Figura 4

Reserva o déficit ecológico. Biocapacidad mundial



Nota. Adaptado de *Déficit/Reserva ecológica*, por Global Footprint Network, 2019, Footprint Network (<https://data.footprintnetwork.org/#/>).

Colombia también hace parte de esta problemática, ya que como se puede observar en las Figura 3 y Figura 4, está en un punto intermedio en ambos aspectos, pero cada vez va incrementando más su huella ecológica lo que se traduce en costos a causa de la degradación ambiental que supera el 3,7% del PIB por año (Sánchez et al., 2007). Sin embargo, existe un plan de acción de la política de gestión ambiental urbana en Colombia la cual busca gestionar la sostenibilidad ambiental de las áreas urbanas, aplicable para áreas rurales igualmente, con estímulos para disminuir la generación de residuos, aprovechamiento de estos y adecuada disposición; entendiendo los residuos no sólo de construcción sino también residuos orgánicos aprovechables (Minambiente, 2008).

De esta forma, teniendo esta reglamentación, se hace obligatorio asumir una posición sostenible frente al manejo de los recursos.

Esto se puede sintetizar en la siguiente idea: “El potencial ambiental de una región no está determinado tan sólo por su estructura ecosistémica, sino por los procesos productivos que en ella desarrollan diferentes formaciones socioeconómicas” (Leff, 1994, capítulo IX, sección III, Productividad ecotecnológica y manejo integrado de recursos).

Es acertado considerar que una de las maneras para reducir el inconveniente de la degradación ambiental sea analizando y replicando el comportamiento de sociedades que ya han solucionado la problemática o por lo menos la han mitigado, por lo tanto, se han desarrollado técnicas de construcción lideradas por comunidades indígenas basadas en los materiales del entorno, así como la tierra, la piedra, la guadua, entre otros materiales de origen orgánico. Acevedo Agudelo, Vásquez Hernández, & Ramírez Cardona (2012, sección de La sostenibilidad en la construcción, párrafo 3) nos dicen:

Técnicas como el bahareque y la tierra pisada son fruto de la mezcla entre técnicas de construcción europeas e indígenas que, por su bajo consumo de energía asociado y su capacidad de implementar materiales del entorno inmediato, adquieren características de sostenibilidad.

Teniendo conocimiento de los efectos negativos derivados de la arquitectura y la construcción, se empieza a indagar en formas para enfrentar los inconvenientes que estos acarrean, por medio de alternativas más efectivas, que generan un menor impacto ambiental; las cuales son estrategias prácticas y concretas, desarrolladas en el campo académico y profesional, a través de la investigación y el desarrollo tecnológico (Acosta, 1986).

Con esta concientización se observan incrementos notables desde finales de los años ochenta en todos los campos con experimentación en el uso de energías alternativas, nuevos materiales, y aumento de la eficiencia energética, todo ello mediante la generación de documentos y normativas específicas que han permitido identificar los temas fundamentales y cómo abordarlos (Construmática, n.d.).

Según el Nuevo informe de Tendencias Globales Construcción Sostenible (2018), los proyectos de construcción sostenibles han aumentado en los últimos 10 años de manera significativa, y se prevé un aumento en la demanda de edificaciones sostenibles en los próximos 3 años. Esto se debe a la amplitud de beneficios que estas construcciones pueden ofrecer, además de los económicos y ambientales, los impactos sociales también son muy relevantes, como lo son la mejora de la salud y el bienestar de los ocupantes de los edificios.

Una encuesta global fue realizada en este informe de la cual se extraen puntos claves, como el hecho de que, si bien va en aumento el número de proyectos de construcción sostenible certificados bajo un sistema de calificación, también hay un incremento de proyectos no certificados, sin embargo, sí se apoyan en criterios de la certificación para la toma de decisiones en cuestiones de planeación, diseño, construcción y operación de los edificios. (Argos, 2018)

Igualmente se expone que, en gran parte de los encuestados, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y el consumo de energía son razones importantes para impulsar la construcción sostenible, aunque los costos siguen siendo una gran preocupación. Y por último se espera un fuerte crecimiento en los proyectos de construcción sostenible enfocados en el desarrollo de nuevos proyectos comerciales, residenciales en altura y algunos pocos proyectos institucionales en Sur América, América Central y el Caribe.

5.3. Confort y arquitectura

Partiendo de la idea de mantener un bajo consumo energético, es indispensable no sacrificar el confort térmico, de lo contrario se hace necesario ligar ambos términos de forma que se complementen, dando como resultado una eficiencia energética cuyo fin es no requerir medios activos para mantener una sensación agradable para el individuo (Blender, 2015), habiendo una relación entre los logros obtenidos al finalizar un proyecto y los recursos gastados.

Para controlar el confort en un edificio, se requieren de múltiples soluciones y no solo una, especialmente en edificios bioclimáticos. En los últimos años se ha hecho énfasis en hacer arquitectura enfocada en usar métodos pasivos para ahorrar energía y optimizar el confort (bioclimática). (Castilla et al., 2010)

El término bioclimático no es algo novedoso, pues sus bases se remontan a la forma en como nuestros ancestros se implantaban en un lugar, tomando solo lo necesario de su entorno para poder protegerse de las adversidades e intemperie, con métodos claramente pasivos; los cuales han sido desplazados por el desarrollo tecnológico de nuestro siglo. Retomando estos conceptos, Olgyay (1998) los estudia a profundidad y propone un método para llevar a cabo un proyecto bioclimático dividido en fases para poder analizar más detenidamente cada una, y así, englobar todo en un resultado final. Esta secuencia va de la siguiente manera:

Clima ► Biología ► Tecnología ► Arquitectura

En este sentido, este método señala la importancia de la tecnología en el momento de proyectar una edificación, comprendiendo esta el uso de los materiales ya que juegan un papel importante en el confort por tener formas de actuar específicas frente a las distintas manifestaciones del clima. Por ejemplo, algunos materiales funcionan como barreras o aislantes térmicos, mientras otros sirven de conductores térmicos. Ambos casos servirán en dos situaciones y contextos diferentes.

De aquí la importancia de la evaluación del comportamiento térmico de los materiales, que nos ayudarán a conocer si poseen características reflexivas o de absorción, para que pueda ser aplicado correctamente.

5.4. Envoltentes arquitectónicas

La envolvente arquitectónica además de integrar la cubierta y la fachada de una edificación, realiza las acciones de una piel la cual protege aquello que cubre y establece que tanta relación tiene el exterior con el interior, teniendo en cuenta factores como el aire, luz y calor. Por estas razones, la envolvente puede afectar negativa o positivamente la edificación y sus condiciones y no debería ser tomada como un elemento aislado. Inclusive, esta puede mejorar y solucionar problemáticas presentes en el diseño y construcción de una edificación tales como la eficiencia energética, optimización lumínica, el confort térmico, entre otras. (González Vásquez & Molina-Prieto, 2018)

Actualmente se encuentran algunas falencias en el proceso de diseño de un proyecto, ya que la elección de ciertos materiales se deja a criterios estéticos o

simplemente como última opción, afectando la edificación en sí. En este sentido es importante conocer las propiedades de los materiales que nos van a servir de cerramiento si buscamos unas condiciones específicas.

Con la envolvente es posible explorar opciones que resulten innovadoras y materiales nuevos a partir de tecnologías existentes, llevándolas por un proceso de evolución, transformación y optimización de sus propiedades. Ochoa Ávila explica en el texto “Innovación, tecnología y gestión tecnológica” (2007):

(La innovación...) Es un proceso que se realiza con un enfoque sistémico, que requiere de asociaciones y vínculos entre las distintas áreas del conocimiento, para la implementación y el funcionamiento de mejoras en las formas de hacer las cosas sobre la base de ideas creativas y transformadoras, y que busca siempre extrapolar dichas mejoras con éxito, al mercado, los productos, los procesos y los servicios para obtener un impacto económico, social o ambiental.

De esta manera se contribuye gestionando con eficiencia los recursos para lograr la consecución de los objetivos, incluso aportando a las bases y el desarrollo de la sostenibilidad.

Para poder determinar que un producto es innovador, Guerrero (2015) propone unas características las cuales debe poseer:

- Productos tecnológicamente nuevos o mejorados.
- Introducción de nuevos bienes y servicios y mejoras significativas de las cualidades y funciones de bienes y servicios existentes.
- Mejora de productos existentes, generando cambios en los materiales, técnicas, calidad y uso de los componentes para alcanzar un mejor rendimiento.
- Está compuesta de tecnología radicalmente nueva, puede basarse en combinar tecnología existente generando nuevos usos.

Asimismo, los materiales idóneos para elaborar las envolventes arquitectónicas deben poseer cualidades tales como: bajo contenido energético, baja emisión de gases de efecto invernadero como dióxido de carbono, óxido nítrico, dióxido de nitrógeno, dióxido de azufre, ser reciclables, que sean de la región, usar gran cantidad de materiales de reutilización, entre otros.

Junto con esta información, se debe realizar una evaluación del desempeño térmico que permita predecir y conocer el comportamiento de las distintas envolventes.

5.4.1. Envolventes arquitectónicas con fibras vegetales

Las envolventes arquitectónicas que usan materiales como fibras vegetales no son diferentes a las envolventes utilizadas convencionalmente en la actualidad, en el sentido que deben cumplir con los mismos requisitos mencionados anteriormente, los cuales son: ser productos tecnológicamente mejorados, ser reciclables, preferiblemente locales, y en lo posible, que su materia prima sea reciclable.

Los materiales naturales han sido usados desde los inicios de la construcción; inicialmente no resistían los diversos factores del entorno ya que no era necesario, sin embargo, las comunidades se comenzaron a asentar y empezaron a usar materiales más duraderos como la piedra, la tierra, madera, e incluso el yeso, la cal y la cerámica. (de Villanueva Domínguez, 2005)

Debido a la llegada de la revolución industrial, el uso de los materiales de origen natural o fibras vegetales se vio disminuido, donde la necesidad primaria era la cantidad y no necesariamente la calidad, aclarando que esta no sólo abarca la calidad misma del producto, sino también lo óptimo de su uso para la salud y el bienestar del ser humano. Es así como las fibras vegetales se vieron reemplazadas por materiales como el hierro, el acero, vidrio, entre otros; y posteriormente en el periodo postindustrial, el cual fue explicado igualmente por Villanueva (2005), se comienzan a emplear materiales sintéticos como el plástico.

El reemplazo de los materiales para la construcción con fibras vegetales, por materiales industrializados o sintéticos ha sido muy cuestionado en la actualidad debido a que no está debidamente fundamentado. Se suele considerar que los materiales sintéticos son más duraderos, pero esto no necesariamente es cierto, además de que estos últimos pueden acarrear problemáticas ambientales mayores y, en consecuencia, ser perjudicial su uso tanto para el ser humano como para el ecosistema. (Arenas Cabello, n.d.).

Se ha demostrado que materiales de origen natural son altamente competitivos en el mercado, ya que poseen características óptimas para ser utilizados en la construcción, tales como: bajo costo, peso ligero, materia prima renovable, baja densidad, lo que traduce en baja conductividad térmica y en ciertos casos mejor comportamiento térmico, incluso algunos poseen facilidad de procesamiento (Velásquez Restrepo et al., 2016), por lo tanto, resultaría beneficioso utilizar estos materiales como materia prima para la elaboración de envolventes arquitectónicas.

5.5. Guadua

La guadua ha sido un elemento importante en la historia colombiana puesto que esta ha sido la base para el desarrollo de la región cafetera, y en general, para el desarrollo social, económico y ambiental de varios departamentos del país. La situación actual de la guadua en Colombia está regulada por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo rural, quienes organizan la cadena de la Guadua integrando la silvicultura, cosecha y postcosecha, transformación y procesamiento, y finalmente el mercadeo y comercialización. Los usos principales que se le da a la materia prima están entre la fabricación de muebles, en la construcción y obras arquitectónicas, en el campo industrial en productos como pisos y aglomerados, en el campo estético con piezas artesanales y utensilios domésticos y hasta combustible (ver Figura 5, Figura 6 y Figura 7). Dentro de la cadena productiva de la guadua, se hace énfasis en la extracción y transformación de recursos, sin embargo, el tratamiento de los residuos restantes de esta actividad no son parte de la cadena. (Espinosa Pérez, 2004).

Figura 5*La Casa Ensemble Chacarrá*

Nota. Adaptado de *La Casa Ensemble Chacarrá*, de Ruta 4, 2016, Archidaily (t.ly/ZDK9).

Figura 6*Licorera bandeja*

Nota. Adaptado de *Licorera bandeja*, Artesanías del Quindío, n.d., Artesanías Quindío (t.ly/QtfG).

Figura 7

Puente en guadua Arnulfo Briceño



Nota. Adaptado de *Puente en guadua Arnulfo Briceño*, Gastón Bermudez Vargas, 2016, *Bambús ecológico* (t.ly/OY8J).

Sus variados usos se dan gracias a que este bambú es una planta autosostenible, de rápido crecimiento que no requiere demasiados cuidados, además ayuda en la protección y mejoramiento del suelo gracias a su extenso sistema de raíces previniendo erosiones (Londoño, 2011). El bambú es la gramínea⁶ más grande del mundo, llegando a crecer entre 10 y 20 metros en menos de un año (González Yebra, 2014).

Los servicios que presta la guadua al medio ambiente son diversos como lo señala Villegas (2003), el cual afirma que “conserva el suelo, controla la erosión, regula el caudal hídrico, aporta materia orgánica, contribuye a la biodiversidad” además de ayudar en la recuperación de tierras afectadas por la deforestación y actividades agrícolas. Una gran y diversa cantidad de flora y fauna albergan en los guaduales, siendo igualmente grandes captadores de CO₂.

También se destacan sus propiedades estructurales, su gran resistencia, fácil corte y transporte, lo que la hace apta para la construcción. En la Figura 8 se puede visualizar la extensa presencia del bambú en el mundo, teniendo una gran importancia económica en Asia y América.

⁶ Dicho de una planta: Del grupo de las angiospermas monocotiledóneas, con tallo cilíndrico, comúnmente hueco, interrumpido de trecho en trecho por nudos llenos, hojas alternas que nacen de estos nudos y abrazan el tallo, flores muy sencillas, dispuestas en espigas o en panojas, y grano seco cubierto por las escamas de la flor; p. ej., el trigo, el arroz o el bambú. (DRAE, n.d.-c)

Figura 8

La distribución geográfica natural del bambú



Nota. La imagen representa la presencia de bambú a nivel global en color verde. Adaptado de *Bambú: ¿una alternativa productiva?*, Broz et al., 2020, *Argentina Forestal* (<https://www.argentinaforestal.com/2020/03/28/bambu-una-alternativa-productiva/>).

En el mundo existen 90 géneros y 1.100 especies de bambú, predominando en Colombia los géneros *Chusquea* y *Guadua* (González Yebra, 2014), los cuales se denominan “leñosos” y se caracterizan por tener rizomas muy desarrollados y fuertes, brotes protegidos por hojas caulinares, sistemas de ramificación complejos y tener culmos lignificados (leñosos) (Londono, 1990). La lignina se refiere a un componente en la composición vegetal de vital importancia, pues es el cementante de las células fibrosas de los vegetales, funciona como relleno para darle rigidez al tallo de la planta y se encarga de engrosar el tallo (EcuRed, n.d.). En Colombia, la *Guadua* es uno de los géneros con mayor distribución en el país. La mayor cantidad y diversidad de especies leñosas se da en la cordillera oriental, seguida de la cordillera central (Londono, 1990), habiendo aproximadamente 51.000 hectáreas de *Guadua angustifolia*, la mayoría encontrada en el eje cafetero (Caldas, Quindío, Risaralda, Valle del Cauca y Tolima) (Sociedad Colombiana del bambú, n.d.).

Londoño (2011) habla sobre la diversidad del bambú en Colombia, y señala que se reconocen diez especies prioritarias en el país que aportan tanto social, como económica y culturalmente. De estas especies importantes, se puede decir que sólo la *Guadua angustifolia* Kunth tiene estudios más profundos en aspectos básicos y de aplicación, es de mucho más amplio uso tradicionalmente y tiene mejores oportunidades en el mercado nacional e internacional. Estos estudios abarcan:

“La taxonomía, genética molecular, fenología, anatomía, fisiología, biotecnología, ecología, flora y fauna asociada, biomasa, cuantificación de servicios ambientales, captura de CO₂, inventarios forestales, métodos de propagación, distancias de

siembra, fertilización, calidades de sitio, manejo y regímenes de aprovechamiento, preservación y secado, propiedades físicas y mecánicas, comportamiento estructural, uniones, y estudios de mercadeo.” (Londoño, 2011, p. 2)

La *Guadua angustifolia* Kunth se distingue por sus gruesos y largos culmos, con una óptima relación resistencia/peso (Londoño, 2011), por las bandas blancas en el nudo y sus hojas caulinares triangulares (Londoño, 2002). Su nombre es dado gracias que el botánico alemán Sigmund Kunth establece sus características y toma del vocablo indígena la palabra “guadua”, ya que así las comunidades nativas colombianas y ecuatorianas llamaban a este bambú, estableciéndose esta posteriormente como especie endémica de América. La palabra *angustifolia* se concede por su característica de “hoja angosta”. (Londoño, 2001)

La forma de propagación más común en la guadua, se da por el uso de las mismas partes de ella, como el rizoma o raíz, secciones del tallo con yemas desarrolladas; también se da por medio de semillas de una floración, pero al ser un proceso de ciclos más largos, no es tan común. (Hidalgo López, 1978)

En cuanto a su morfología, el bambú tiene una amplia diversidad. A continuación, se describe las partes que la conforman.

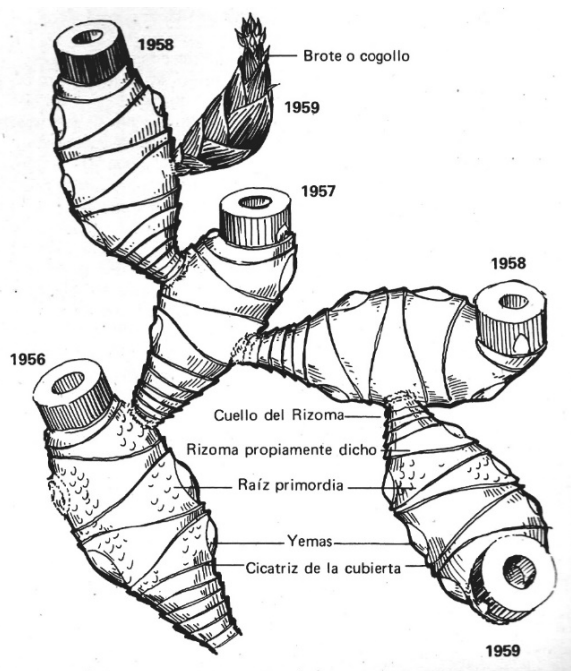
- Rizoma:

Es la base subterránea del bambú. Hay rizomas paquiformos, el cual es el tipo correspondiente a la *Guadua angustifolia*; leptomorfo y amfimorfo. (Londoño, 2002)

Mostrado en la Figura 9, los paquiformos se caracterizan por ser cortos y gruesos, con raíces en la parte inferior y yemas a los lados que dan vida a nuevos rizomas. Su desarrollo es radial y llegan a medir hasta 1,5 m de longitud.

Figura 9

Sistema de rizoma paquiformo, partes



Nota. Comprende varios rizomas producidos en años consecutivos. Adaptado de *Nuevas técnicas de construcción con bambú* (p. 8), por O. Hidalgo López, 1978, Universidad Nacional de Colombia.

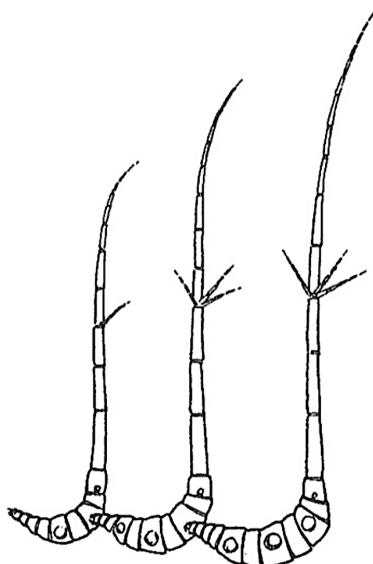
La *Guadua angustifolia* Kunth llega a su altura máxima (entre 15 y 30 m) en los primeros 6 meses, y alcanza su madurez normalmente a los 5 o 6 años, el cual es el momento idóneo para ser usada. Es de alta productividad si se le da un buen manejo.

El diámetro máximo para esta especie es de 22 cm, y el promedio de 9- 13 cm (Takeuchi, 2004); este es dado desde el suelo y no incrementa a medida que crece (Londoño, 2012).

Este tipo de rizoma hace que se forme una red subterránea (ver Figura 10) que trae beneficios al medio en que se encuentra, en términos ecológicos; pues ayuda a controlar la erosión amarrando el suelo a orillas de ríos.

Figura 10

Red de rizomas



Nota. Adaptado de *Nuevas técnicas de construcción con bambú* (p. 8), por O. Hidalgo López, 1978, Universidad Nacional de Colombia.

- Culmo:

Es la parte que brota del ápice⁷ del rizoma cubierto por hojas caulinares. En esta primera fase se le llama renuevo y su crecimiento es apical. (Londoño, 2002)

Se distingue en el ciclo de vida de la guadua una primera fase que es el renuevo (ver Figura 11), el cual es el periodo en el que brota del suelo hasta los 6 meses siguientes; luego la guadua joven comprendida entre 1 y 2 años (ver Figura 12), caracterizada por un color verde brillante con bandas blancas en los nudos, también conserva aún algunas hojas caulinares. La guadua adulta es el momento en el que está óptima para su aprovechamiento por alcanzar su máxima resistencia y se distinguen algunas manchas blancas a lo largo del culmo. Por último, en el estado de madurez final la guadua pierde propiedades físico- mecánicas y se usa como material de combustión. (Londoño, 2002)

⁷ Ápice: Extremo superior o punta de algo. (DRAE, n.d.-a)

Figura 11

Renuevo de guadua



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 12

Culmos jóvenes aún con hojas caulinares

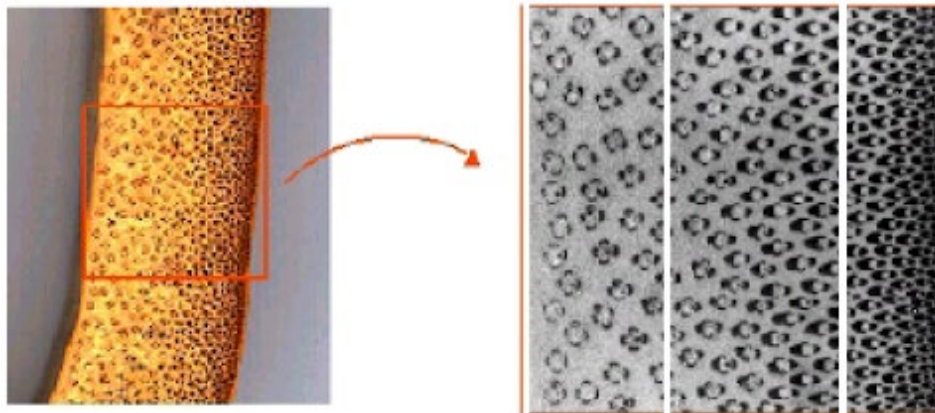


Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

En los entrenudos, las fibras tienen una orientación axial, y en el nudo se da adicional una interconexión transversal (Londoño, 2002). Un porcentaje relativamente alto de las fibras longitudinales de la guadua tienen alto contenido en sílice, lo que caracteriza su resistencia y flexibilidad. El espesor de la pared del culmo disminuye con la altura; y su densidad varía igualmente entre capas en su sección transversal, como se muestra en la Figura 13 (Flores Méndez et al., 2011). Son estas propiedades anatómicas de los culmos, lo que le determinan su uso final.

Figura 13

Distribución no-uniforme de las fibras en la Sección transversal del culmo. Vista microscópica



Nota. (1) Capa interna. (2) Capa media. (3) Capa externa. Adaptado de “El bambú como elemento estructural: la especie *Guadua Amplexifolia*” (p. 6), Sánchez Medrano et al., 2016, *Nova Scientia*.

- Ramas:

La ramificación se da normalmente en la parte media de los culmos adultos; en la guadua, las ramas basales se convierten en espinas. El follaje creado por las ramas es importante para el proceso de fotosíntesis que alimenta la planta. Estas también son usadas cuando están secas en labores agrícolas o para hacer escobas. (Londoño, 2002)

- Hoja caulinar:

Con una forma triangular (ver Figura 14), esta bráctea⁸ decidua⁹ protege las yemas de donde nacen ramas y follaje, recubre el tallo y una vez cumplen su ciclo, se desprenden y caen, y continúan con su proceso de biodegradación. La hoja caulinar crece de cada nudo y presenta variaciones a lo largo del culmo, en donde las hojas más características se encuentran en la parte media de este último. Se constituye por la vaina o parte basal, y la lámina o parte distal¹⁰; cuyos bordes son continuos (Londoño, 2002). Su envés es pubescente (con vellos) y de color café, y su haz no tiene pubescencia¹¹. En la Figura 15 y Figura 16 se describen gráficamente mejor sus partes.

⁸ Bráctea: *Bot.* Hoja que nace del pedúnculo de las flores de ciertas plantas, y suele diferir de la hoja verdadera por la forma, la consistencia y el color. (DRAE, n.d.-b)

⁹ Decidua: Que cae fácilmente, que se pierde. Termino usual para las especies que pierden las hojas con facilidad. (Deciduo, n.d.)

¹⁰ Distal: *Bot.* Extremo de una porción vegetal más próximo al punto vegetativo, del que surge la yema más desarrollada si dicha porción, separada de la planta de la cual forma parte, se utiliza como esqueje.

¹¹ Pubescencia: Cualidad de pubescente (ll veloso).

Figura 14

Hoja caulinar



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 15

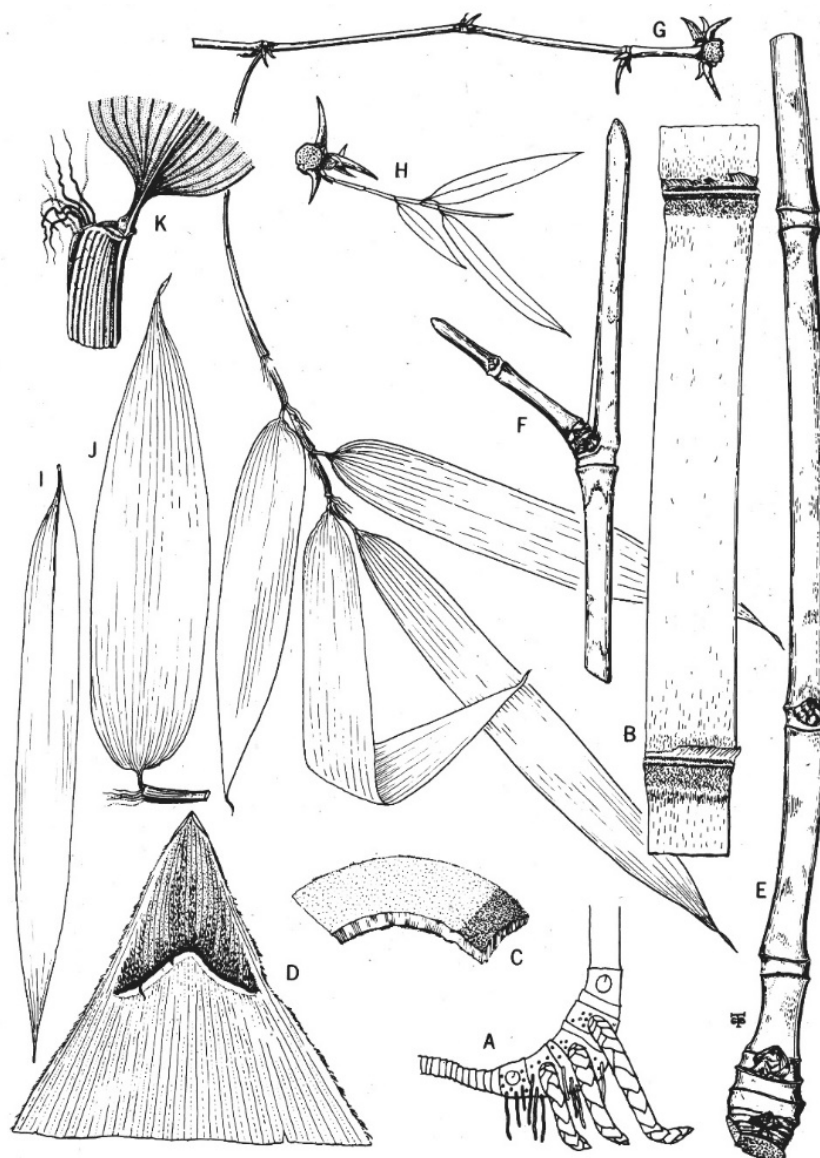
Bambusa Guadua Humbold y Bonpland



Nota. (A) Cubierta -bráctea- del tallo, vista por el lado interno. (B) Detalle ampliado de la base de la cubierta. (C) Porción superior de la cubierta vista por la cara externa. (D) Porción de las ramas de primer orden en las cuales se observan espinas. (E) Ápice de la cubierta de la hoja y base de la hoja. (F) Nudo del tallo con la yema de las ramas. (G) Brote de una rama espinosa en un nudo inferior del tallo. Adaptado de *Bambú, su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel construcción, ingeniería y artesanía* (p. 49), O. Hidalgo López, 1974, Estudios técnicos colombianos LTDA.

Figura 16

Bambusa Guadua Humbold y Bonpland



Nota. (A) Base del tallo con su rizoma y soportes que se desarrollan para sostener el tallo que puede alcanzar hasta 37 metros de altura y diámetro de 20 cm. (B) corte tangencial del internado y nudos V y VI del tallo. (C) Sector de la sección transversal de la pared del tallo en el internado. (D) Ápice de la cubierta del tallo, vista por el lado interno -envés-. (E) Parte basal de las ramas de primer orden de un nudo intermedio del tallo, que muestra yemas aún intactas. (F) Ramas de segundo orden con yemas aún intactas. (G) Ramas de tercer orden mostrando espinas y follajes. (H) Complemento de la espina con una rama que sale del nudo más próximo a la espina. (I/J) Ejemplos de las formas de las hojas. (K) Ápice de la cubierta de la hoja y base de la misma. Adaptado de *Bambú, su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel construcción, ingeniería y artesanía* (p. 49), O. Hidalgo López, 1974, Estudios técnicos colombianos LTDA.

Londoño (2013) hace énfasis que dentro de un mismo género (guadua) la hoja caulinar va a servir para diferenciar y clasificar las especies. La de la *Guadua Angustifolia* la describe como: “Hoja caulinar sin setas orales. Lámina foliar: 6- 20 cm de longitud por 0,5- 2 cm ancho, sin aurículas, presencia de fimbrias¹² en la parte superior de la vaina foliar.” (ver Tabla 1).

Tabla 1

Hoja caulinar

Tamaño (largo x ancho) (cm)	27-68 x 30-75
Color	Café
Tamaño lígula interna (cm)	1-2.5
Forma lígula interna	Arqueada en el centro y finaliza antes de las márgenes.

Nota. (Londoño, 2013)

Esta hoja va cayendo a medida que la guadua crece y así queda como un residuo orgánico abundante debido a la rápida reproducción de esta fibra vegetal. Esto genera que algunos cultivadores la incineran para evitar la acumulación de la misma, y un pequeño porcentaje se usa para la fabricación de artesanías.

Para que un gradual sea productivo y se pueda aprovechar de forma óptima, se requiere de un buen mantenimiento y cuidados. Aquellas guadas enfermas, viejas, caídas, partidas, etc. deben ser retiradas, pues impiden el movimiento y retiro de material; e igualmente afectan el crecimiento de otras guadas. Darle un correcto mantenimiento al gradual influye en la calidad de las hojas caulinares que este genera, y por lo tanto, serán un material con más posibilidades de manejo e implementación.

Así mismo, las fibras de la *Guadua angustifolia* también se verán afectadas positivamente por el correcto mantenimiento del cultivo, permitiendo el desarrollo de productos de mejor calidad en aglomerados, laminados, etc., los cuales poseen características de fortaleza, durabilidad, suavidad, entre otras; que han aumentado su demanda. (Londoño, 2011)

La importancia que se le debería dar no solo a esta fibra vegetal, sino a muchas otras disponibles en nuestro entorno, parte de la posibilidad de mantener los flujos de materiales con sus ciclos cerrados, lo que en sí sería la esencia de la sostenibilidad; pues estos materiales además de ser naturales, están cumpliendo funciones importantes dentro de los ecosistemas y a su vez nos están proporcionando recursos aprovechables en necesidades tan básicas como construir una vivienda. Luego de suplir estas necesidades, estos materiales al ser naturales pueden ser devueltos a la biosfera como residuos orgánicos para nuevamente comenzar su ciclo.

¹² Porción laciniada o dividida en segmentos muy finos de un órgano. (Botánica, 2016)

Si bien la guadua es un recurso que se ha usado ampliamente en nuestro medio, no ha sido aprovechado en su totalidad, y a raíz de esto nace el interés por la utilización del residuo orgánico que ésta genera, el cual es la hoja caulinar, y analizando que esta hoja cumple la labor de proteger la guadua mientras se desarrolla, se pone en cuestión la posibilidad de implementar esta materia prima como protectora de las edificaciones, es decir, como la envolvente arquitectónica.

5.5.1. Guadua como material de construcción

La *Guadua angustifolia* Kunth sobresale gracias a la alta resistencia que presenta estructuralmente, lo que la lleva a ser comparada con el acero y otras fibras de alta tecnología.

Colombia hace un uso diverso del bambú en términos constructivos, se emplea tanto en vivienda rural como en vivienda urbana. Hay grandes muestras del uso de este material, sobre todo en el eje cafetero del país (Londoño, 2011). Es importante mencionar que nuestros aborígenes han hecho uso de la guadua desde mucho antes que los españoles pisaran estas tierras, y que, a pesar de ser colonizados cultural y socialmente por ellos, este hecho no cambió e incluso hoy en día sigue viva esta tradición constructiva.

Londoño (2011) señala y destaca el aumento de desarrollo tecnológico de la guadua a raíz de desastres naturales ocurridos en Colombia, como el terremoto ocurrido en 1999 en el eje cafetero, donde a partir de esta eventualidad se decide normatizar la construcción con este material, debido a su gran comportamiento frente a los sismos. De igual forma la guadua se ve como una solución al déficit de vivienda producto de desastres naturales, debido a la rapidez y economía con la que se construyen casas con este material.

Se vuelve imprescindible el aumento del desarrollo y cultivo del bambú como eventual solución a la falta de madera y energía, y también por una serie de ventajas que presenta esta fibra vegetal frente a otros materiales; como por ejemplo la alta productividad, su auto-propagación, y sostenibilidad que la hacen un recurso destacable. (Londoño, 2011)

Como se mencionó anteriormente, la guadua es un material con propiedades físico-mecánicas muy favorecedoras, siendo muy resistente a las distas fuerzas que se le apliquen, esto gracias a su estructura anatómica. Durante el siglo XX, el arquitecto Simón Vélez introduce el uso de tuercas, arandelas y el relleno de mortero en los entrenudos como solución a la unión de piezas de guadua en una construcción.

Para un óptimo aprovechamiento del gradual con fines comerciales, se deben tener en cuenta aspectos como la correcta limpieza de malezas y la fertilización, de forma que el gradual se mantenga productivo. (Londoño, 2002)

Para su uso en la construcción, se requiere que la guadua sea tratada con químicos, evitando que las condiciones del medio afecten su durabilidad. La efectividad de este tratamiento es exitosa cuando penetra el tejido interno correctamente, lo cual se dificulta pues el bambú es muy resistente a los químicos. También hay métodos de

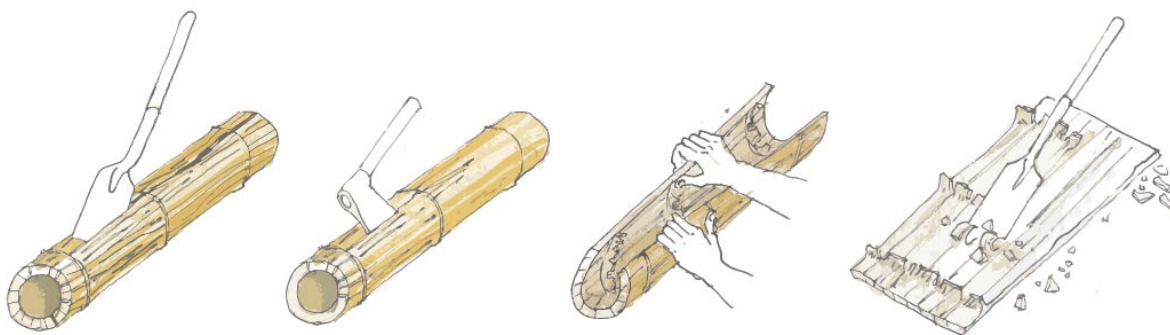
preservación del material que no involucran sustancias químicas, sino que son procedimientos realizados de manera natural. (Londoño, 2002)

Los tallos de la guadua tienen múltiples aplicaciones en la construcción, dependiendo de qué parte del tallo se va a tratar. Esta se suele dividir en 3: la porción basal, que es empleada en tareas donde se va a someter más a esfuerzos de compresión, como columnas y vigas maestras; la porción intermedia es usada en cerchas, paralelos o soleras de muros, y entresuelos o viguetas; y el tercio superior es usado en correas de techos por ser más delgado. Todo esto, teniendo en cuenta que el diámetro sea igual o mayor que 10 cm, y el grosor de pared sea de 1,5 cm.

Uno de los muchos usos que se le da a este material en la parte constructiva, es la esterilla. Esta se obtiene de hacerle cortes longitudinales al tallo en toda la periferia de cada nudo; se procede a abrir de forma que quede un tablero y con un machete se remueven los tabiques y la capa blanca de la pared interna (ver Figura 17). La esterilla tiene numerosas aplicaciones en la construcción, se hacen paredes interiores y exteriores, pisos, cielos rasos, al igual que artesanías.

Figura 17

Proceso de la fabricación de esterilla



Nota. Adaptado de *Manual para la Construcción con Bambú* (p. 42), L. Aguilar, 2017, Umbal Agroforestal.

5.5.2. Guadua como envolvente arquitectónica

El uso de este bambú es muy variado como se ha podido apreciar, son distintas sus aplicaciones en la envolvente de una edificación. En Colombia son muy comunes los sistemas de construcción de muros que involucran este material, como por ejemplo el bahareque.

El bahareque se destaca por ser sismo resistente, rápido y económico. Es un sistema constructivo característico del campesino colombiano, ya que hace uso de materiales del contexto y se intenta considerar como solución al déficit de vivienda en

toda Latinoamérica dándole un carácter colaborativo, que busca integrar a la comunidad en la construcción de sus propias viviendas. (Rivera, 2018)

En la zona del viejo Caldas (hoy en día Caldas, Risaralda y Quindío) se comienza a dar la colonización Antioqueña, trayendo consigo mismos el sistema heredado de la colonia: la tapia pisada, levantando muros en tierra sin cocer y cubierta en madera y/o guadua, siendo este último elemento muy importante en el proceso de poblamiento de esta región emergente. Para ese momento, construir con tapia pisada era sinónimo de importancia y perdurabilidad dentro de la sociedad, y el bahareque, por el contrario, era algo más temporal. (Salas Delgado & Avellaneda, 2008)

Con el tiempo, la tapia es desplazada por el bahareque, ya que la misma comunidad comprueba que la sismo resistencia del bahareque es mucho más favorable en esta “técnica de madera” como la llamaban, donde simplemente eran paredes de caña y tierra.

El bahareque se puede clasificar dependiendo del tipo de recubrimiento de los muros, ya sea tierra, madera, metal, o mortero de cemento. (Sísmica, 2002) A continuación, se explican brevemente las variaciones del bahareque actualmente conocidas.

- Bahareque de tierra:

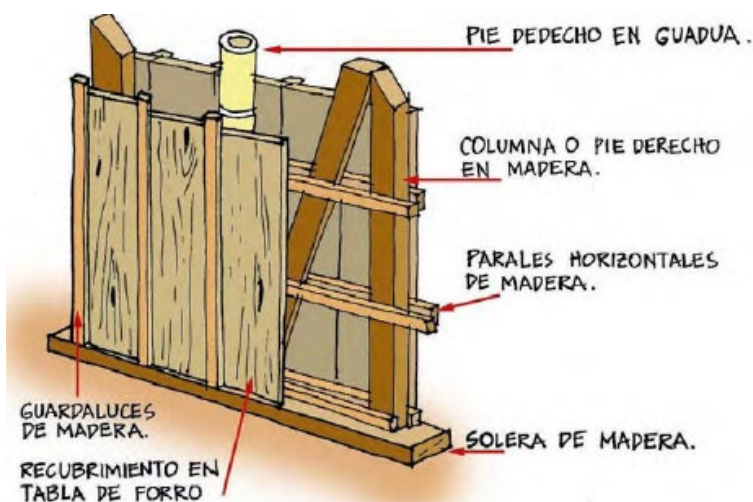
Utiliza entramados de madera y guadua, o solo guadua, con barro como complemento. Este bahareque tiene dos variaciones: relleno o hueco. En el relleno, aparte del entramado, al interior tiene tierra sostenida por latas de guadua, con un recubrimiento en tierra, cagajón y cal. Por el contrario, el bahareque hueco elimina el relleno de tierra y sustituye las latas de guadua por esterilla. El recubrimiento se mantiene como en el bahareque relleno. (Sísmica, 2002) Ambos sistemas se describen en la Figura 18.

Figura 18**Muro embutido en tierra**

Nota. Adaptado de *Manual de evaluación , rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002* (p. 6), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002, Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero.

- Bahareque de tabla:

Consiste entramados de madera aserrada y guadua, con recubrimiento en tablas (ver Figura 19) (Sísmica, 2002).

Figura 19**Bahareque de tabla**

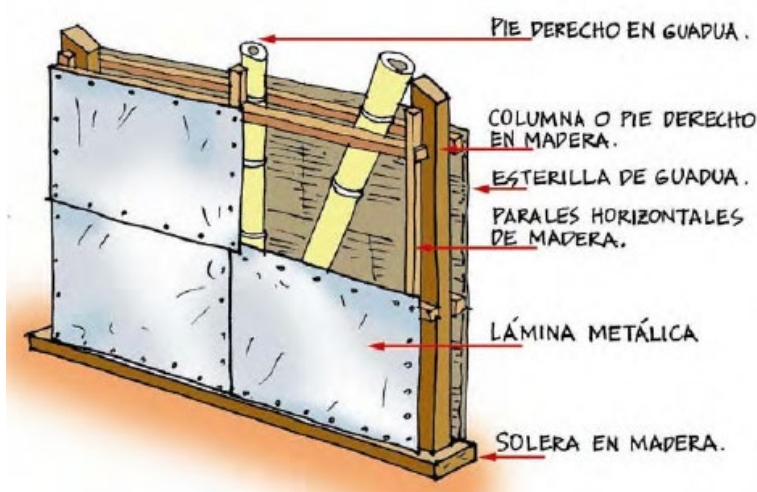
Nota. Adaptado de *Manual de evaluación , rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002* (p. 7), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002, Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero.

- Bahareque metálico

Conformado por entramados de madera y guadua, con recubrimiento de láminas metálicas. Es generalmente usado en fachadas. (ver Figura 20) (Sísmica, 2002)

Figura 20

Bahareque metálico



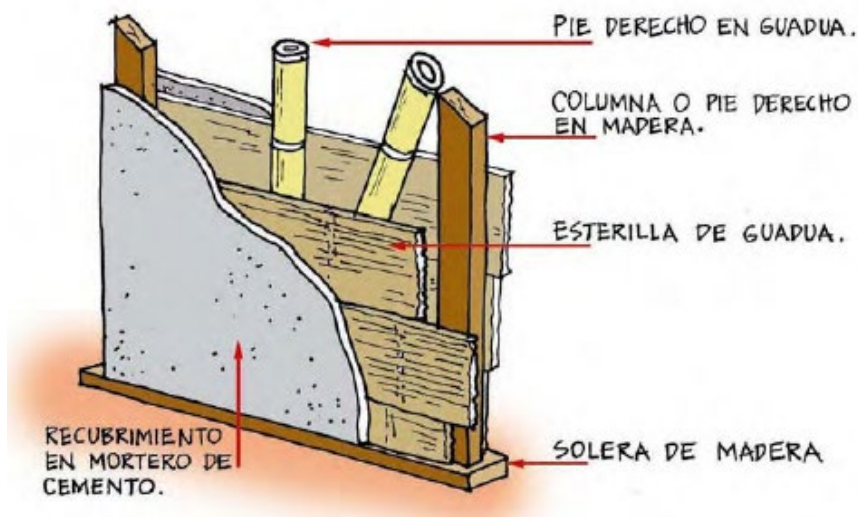
Nota. Adaptado de *Manual de evaluación , rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002* (p. 8), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002, Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero.

- Bahareque encementado

Está conformado por entramados de guadua y madera, o sólo guadua; revestido con esterilla, al cual se le aplica mortero de cemento y arena. (ver Figura 21) Es una de las técnicas más avanzadas dentro del bahareque tradicional. (Sísmica, 2002)

Figura 21

Bahareque encementado con recubrimiento en mortero de cemento



Nota. Adaptado de *Manual de evaluación , rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002* (p. 8), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002, Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero.

- Bahareque normatizado

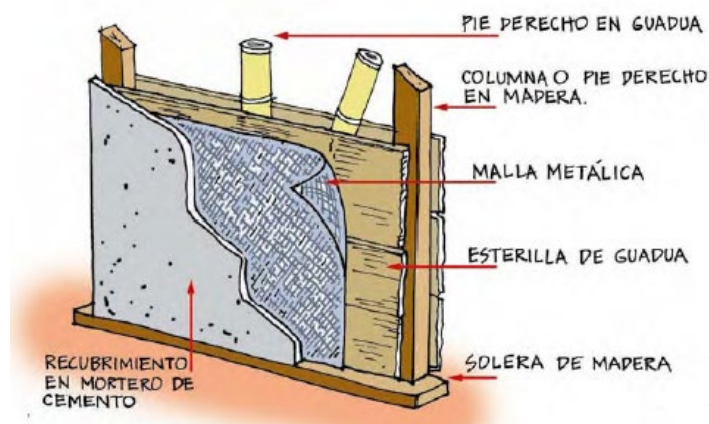
Es el sistema constructivo amparado por oficinas de planeación o curadurías. El título E de la NSR-10(2010), lo define como:

El bahareque encementado es un sistema estructural de muros que se basa en la fabricación de paredes construidas con un esqueleto de guadua, o guadua y madera, cubierto con un revoque de mortero de cemento aplicado sobre malla de alambre, clavada en esterilla de guadua que, a su vez, se clava sobre el esqueleto del muro (p. E-23).

La Figura 22 describe gráficamente la constitución de este sistema: el entramado y su recubrimiento.

Figura 22

Bahareque Encementado con recubrimiento en mortero de cemento y malla metálica



Nota. Adaptado de *Manual de evaluación, rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construidas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002* (p. 9), Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, 2002, Fondo para la reconstrucción y desarrollo social del eje cafetero.

Más adelante, por su carácter de “construcción rápida” empleada para albergues o por personas que requerían un refugio inmediato, se comenzó a estigmatizar de manera negativa el uso de este sistema, pues por lo explicado anteriormente y por su bajo costo, se asociaba con la pobreza (Salas Delgado & Avellaneda, 2008). Hoy en día, esa estigmatización sigue estando vigente en nuestra sociedad, y es incluso uno de los tantos problemas que hacen detonar y motivar investigaciones de este tipo, con este material tan rico y versátil en nuestro medio; creando más medios y condiciones para que su uso sea cada vez más aceptado y extendido.

Existe también una envolvente arquitectónica realizada con guadua llamada Laminado de esterilla, la cual es nueva en el mercado y actualmente se está produciendo en Colombia en la ciudad de Chinchiná, Caldas, por parte de la empresa V&V Laminados de Guadua S. A. S. (Ecotablero de Colombia), y posee una amplia variedad en su forma de utilización y brinda condiciones de aislamiento térmico excelentes, las cuales fueron determinadas por el arquitecto magíster Héctor Fabio Silva (2019).

Este laminado de esterilla pasa por un proceso industrializado desde el cepillado de la materia prima, hasta el armado de los laminados con tres capas dispuestas ortogonalmente, las dos capas externas en el sentido longitudinal y la capa intermedia en el sentido transversal de la lámina. En este caso, se hace uso de resina fenólica (polímero 66 DO) como adhesivo, en una proporción de 150 g/m².

El prensado del material se realiza con una presión de 1,2 MPa, a 150°C por un lapso de 25 minutos, resultando una lámina de 16 mm x 1,22 m x 2,44 m, con un peso de 12 kg por m², como se puede apreciar en la Figura 23.

Figura 23

Proceso de acabado



Nota. Adaptado de *Caracterización térmica de envolventes arquitectónicas en esterilla laminada de guadua* (p. 71), Silva Flórez, 2019, Universidad del Valle.

El laminado de esterilla de guadua puede ser usado de distintas maneras, tales como: Cerramiento, materia para mobiliario, piso, entre otros; incluso puede tener acabados y recubrimientos como barnices y lacas. También tiene amplias ventajas en términos de sostenibilidad, en comparación con el “tríplex”¹³ el cual es su competidor más fuerte (Silva Flórez, 2019).

5.6. Resistencia térmica

La conducción, la convección y la radiación, son los tres mecanismos de transferencia de calor a la cual le conciernen las razones de la transferencia, el tiempo requerido y la variación de temperatura. Recordemos que este proceso solo es posible cuando hay una diferencia de temperatura, donde la energía se dirige del medio más caliente al más frío, y deja de haber interacción en el momento que hay un equilibrio entre ambas temperaturas. (Çengel, 2007)

La conductividad térmica es el resultado de la interacción entre partículas, donde las más energéticas transfieren energía a las menos energéticas. De igual forma, la conductividad térmica es una propiedad presente en algunos materiales que permite el paso de calor, lo que supone un intercambio de energía, y produce energía cinética¹⁴

¹³ Es un tablero contrachapado de madera, producto derivado de la madera.

¹⁴ Energía de un cuerpo según su movimiento (Significados, 2017)

(Çengel, 2007). Esta propiedad es inversa a la resistividad térmica, la cual se opone a la transmisión de calor.

La capacidad de un material determinado de oponerse al flujo de calor, se define como resistencia térmica (FAO, n.d.). Para hallar este dato, se debe tener conocimiento de la conductividad térmica (k) del material a evaluar y su espesor. Partiendo de esta información, y en conjunto con un estudio experimental aplicado a un material, es posible obtener un acercamiento a su desempeño térmico.

Entre más alto sea el valor de conductividad térmica de un material (k), mejor conductor de calor será, como es el caso de los metales. Por el contrario, si este valor es bajo, se puede considerar el material como aislante, por ejemplo, las fibras vegetales y sintéticas, la madera y las espumas (Çengel, 2007). En este sentido, un buen aislante tendrá una resistencia térmica (R) alta (FAO, n.d.).

Gracias a este concepto se pueden establecer valores a los materiales los cuales nos ayudarán a determinar su uso dentro de una edificación, ya sea que cumpla una función como aislante térmico principalmente o como conductor térmico. Se hace indispensable para el diseño de un edificio la correcta selección de los materiales a usar, teniendo en cuenta no solo sus características térmicas, sino también factores como la durabilidad, su mantenimiento y su impacto ambiental.

5.6.1. Comportamiento térmico de envolventes arquitectónicas con fibras vegetales

Como se mencionó en el capítulo de envolventes arquitectónicas con fibras vegetales, estas superficies poseen un buen comportamiento térmico como aislantes debido a su baja densidad lo que traduce en baja conductividad térmica, y al ser materiales fibrosos o celulares¹⁵, poseen pequeñas cámaras de aire, las cuales son excelentes aislantes térmicos debido a que impiden la transferencia de calor por conducción y también por radiación, gracias a su bajo coeficiente de absorción. (Mosquera Casierra & Valencia Paz, 2014)

Estas características son necesarias tenerlas en cuenta para que, al momento de construir nuevas envolventes arquitectónicas, se tengan como objetivo y logren funcionar óptimamente con estos valores agregados.

A continuación, se mostrarán algunos ejemplos específicos los cuales son relevantes para esta investigación, ya que se encuentran muy ligados al tema a desarrollar debido a su naturaleza, procesos de elaboración, entre otros:

El bahareque, además de sus bondades medioambientales, posee un comportamiento térmico favorecedor frente a sistemas convencionales usados actualmente, lo que debería suponer un cambio de mentalidad por parte de los

¹⁵ Propiedad de los materiales que indica una cantidad de huecos espacios vacíos presentes en el volumen del cuerpo (Quimicas, n.d.).

constructores y diseñadores que permita la inclusión de estos materiales (guadua y tierra) en una mayor medida. Molina Padilla & Gómez Fernández (2018) realizan pruebas para caracterizar las propiedades térmicas del bahareque embutido en tierra con esterilla de guadua (ver Tabla 2), concluyendo que la tierra tiene una gran capacidad para ser un aislante térmico, y por su parte, la esterilla de guadua es de baja conductividad térmica. Por lo tanto, el bahareque embutido en tierra con esterilla de guadua es uno de los sistemas constructivos más eficientes en cuanto a confort térmico en una edificación.

Tabla 2

Resultados finales de coeficiente de conductividad térmica de la tierra y la esterilla de guadua

Material	k , W/ (m*K)
Esterilla de guadua	0.049
Tierra	0,254

Nota. (Molina Padilla & Gómez Fernández, 2018)

Por otro lado, Silva Flórez (2019) realiza igualmente pruebas de conductividad térmica a la esterilla laminada de guadua, obteniendo resultados favorables, incluso determinándose su comportamiento como un mejor aislante térmico que el fibrocemento y comparable con el poliestireno expandido. En la Tabla 3 se pueden consultar los coeficientes de conductividad térmica de los materiales mencionados, además de la guadua, una fibra vegetal comúnmente usada en la construcción.

Tabla 3

Coefficiente de conductividad térmica

Material	k , W/ (m*K)
Guadua angustifolia Kunth	0,157
Esterilla laminada de guadua	0,072
Poliestireno expandido	0,044
Fibrocemento	0,23

Nota. (Armando & Sanchez, 2015; Silva Flórez, 2019; FAO, n.d.; Pizarreño, n.d.)

Conociendo la relación existente entre la conductividad y resistencia térmica, es posible calcular el valor R de un material, pues considera datos como el coeficiente k, el espesor y área del mismo con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{L}{k \cdot A}$$

Las unidades de la resistencia térmica son $m^2 \cdot ^\circ C/W$ (Molina Padilla & Gómez Fernández, 2018). Esta medición se realiza con la finalidad de conocer que tan buen aislante es un material, lo cual es relevante tratándose de las fibras vegetales.

Lo visto en este capítulo son datos beneficiosos para la actual investigación por tratarse de una fibra vegetal y además por ser la hoja caulinar derivada de la guadua, la cual ha tenido una repercusión importante en la economía, tecnología y medio ambiente colombiano. Adicional, permitirá establecer comparaciones en cuanto al desempeño térmico del laminado de hoja caulinar y materiales usados actualmente.

6. Estado del arte

La especie nativa *Guadua angustifolia* Kunth ha sido normatizada en Colombia desde el año 2003 por parte del Comité Técnico 178 Bambú – Guadua. Esto es un gran logro ya que de esta manera se le proporciona al país un marco normativo adaptado a las características de este bambú y, debido a que por sus características especiales se distinguía de los demás bambúes, no era posible generalizarlo con ellos, y de esta manera se podría lograr el propósito de incrementar la calidad de los productos que utilizaran este material y mejorar la competitividad en el mercado para posicionarse nacional e internacionalmente. Adicionalmente, en esta normativa se determinan las propiedades específicas del material para su uso óptimo y seguro (ICONTEC, 2019). Esto podrá ser ventajoso desde el ámbito económico, hasta el ambiental y social.

La normativa incluye un capítulo sobre las hojas caulinares, el cual es indispensable para el manejo de este recurso, este capítulo es: *NTC 6191: Hojas caulinares de Guadua Angustifolia Kunth y productos artesanales elaborados a partir de ellas*. Aquí se establecen los requisitos de calidad de este material, los productos artesanales fabricados a partir de él y los pasos a seguir para su manejo.

La organización Caulinarte (2003) utiliza esta normativa para producir y comercializar artículos elaborados a partir de la hoja caulinar de la guadua, creando diseños de elementos decorativos y utilitarios (Artesanías del Quindío, n.d.). La elaboración de estas artesanías se dio gracias a la búsqueda de nuevos materiales que realizó el licenciado en artes plásticas, Julián N. Martínez Parra en 1997, en la cual encontró en la hoja caulinar las características necesarias para cumplir su objetivo.

Martínez Parra (comunicación personal, 10 de junio de 2020) argumenta que el uso de la hoja caulinar va más allá de lo estético. También refiere un valor ambiental significativo ya que la hoja caulinar al ser un desecho biológico, se le suele dar un manejo erróneo incluso llegando al punto de incinerarlas cuando se van acumulando en el guadua con el fin de limpiarlos y despejarlos, es por esto que, al ser utilizadas con un fin artístico, se le está dando un segundo uso sin afectar negativamente al ecosistema.

A continuación, se indicarán los procedimientos que establece la NTC 6191, acompañados de aportes de Julián N. Martínez que lo complementan.

Se inicia seleccionando y recogiendo las hojas caulinares recién desprendidas de la guadua, que tengan bordes en buenas condiciones y no hayan estado expuestas al sol y al agua por mucho tiempo (ver Figura 24). Estas hojas deben ser de la parte media

del culmo, de 2 a 3 metros sobre la base de la planta. Se enfatiza en que la hoja no debe ser desprendida por acción humana, sino que se debe caer por sí sola, es decir, cuando su ciclo con la guadua haya terminado.

Figura 24

Recolección de hojas caulinares en el guadual



Nota. Adaptado de *Proceso de recolección de hojas*, J. Martínez Parra, 2020, Circasia.

Una vez seleccionadas las hojas, se procede a cortarlas en el mismo guadual como se observa en la Figura 25, para así obtener el material requerido para su uso, y no transportar material innecesario. También se deja el sobrante en el sitio para que sea transformado por la naturaleza.

Figura 25

Corte de la hoja caulinar en el guadual



Nota. Adaptado de *Proceso de recolección de hojas*, J. Martínez Parra, 2020, Circasia.

Al momento de transportarlas, se debe hacer de tal manera que las hojas permanezcan abiertas.

Posteriormente, ya en el taller donde se continuará el proceso, se realiza la limpieza de la hoja caulinar que consiste en eliminar la pubescencia o pelos hispídos¹⁶ por medio del cepillado, evitando que la hoja se quiebre.

Después, se miden las piezas, se traza la figura que se desee y se cortan nuevamente. El corte se debe realizar teniendo en cuenta la orientación natural de la hoja caulinar, es decir, en el sentido longitudinal de la fibra.

Con el fin de proporcionar acabados diversos, la hoja se enrolla y se sumerge en una solución de alcohol al 90% y anilinas durante un periodo de 12 a 15 horas para tinturarla, sin embargo, esto es opcional. En caso de realizarse este procedimiento, se debe dejar secar la hoja a la sombra, por un periodo de dos horas, o hasta que se desenrolle por sí misma y quede casi totalmente abierta.

El tiempo para que la tintura impregne y pigmente totalmente la hoja es considerablemente largo, debido a que la hoja es casi impermeable en la cara más lisa. En la superficie a la cual se le retiró la pubescencia, aunque absorbe un poco más de líquido, no lo hace tan fácilmente, e incluso si se mantiene esta pubescencia se torna aún más resistente al agua. Este es un factor para tener en cuenta al momento de la

¹⁶ Pelos gruesos y recios (The free dictionary, n.d.). Presentes en una de las caras de la hoja caulinar de la guadua.

elaboración de la envolvente arquitectónica ya que puede ser ventajoso durante su implementación en intemperies o condiciones con humedad.

Una vez realizados estos pasos, se puede empezar a utilizar la hoja caulinar para la elaboración de artesanías.

Para adherir las piezas que serán utilizadas en el producto final, se utiliza un adhesivo con bajo contenido en tolueno¹⁷ aplicándolo en ambas superficies que entrarán en contacto.

Martínez Parra señala que no ha sido necesario realizar un proceso de preservación previa de la hoja, ya que, por su experiencia, sabe que los insectos y hongos no atacan el material. Como prueba de esto, las artesanías que realiza continúan en muy buen estado a pesar del largo tiempo que ha transcurrido, e incluso posee una obra realizada hace 25 años aproximadamente con hoja caulinar aún intacto (ver Figura 26).

Figura 26

Cuadro con hoja caulinar tinturada con tinta china



Nota. Adaptado de *Cuadro hecho por J. Martínez Parra, V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021, Circasia.*

Actualmente, la hoja caulinar de la guadua es utilizada principalmente en artesanías, por lo tanto, esta investigación pretende orientar el manejo de este recurso hacia las envolventes arquitectónicas, convirtiéndola en un laminado que nos permita

¹⁷ Tolueno: Es un líquido transparente e incoloro con un olor dulce característico que se utiliza ampliamente como disolvente en entornos industriales. El tolueno también es un ingrediente en algunos productos del consumidor, como pinturas, pegamentos y quitaesmaltes para uñas. (ChemicalSafetyFacts, n.d.)

evaluar su comportamiento térmico y así llegar a conocer la posible aplicación de este nuevo material, ya que denota algunas características con potencial para ser usada en el ámbito constructivo, como su durabilidad, impermeabilidad, y que de por sí el propósito inicial de esta hoja es brindar protección a la guadua, esto último como analogía a la posible protección que puede brindar en una edificación.

Por la forma en como este material pretende ser transformado y su naturaleza de fibra vegetal, se puede comparar con otros materiales, como el laminado de esterilla de guadua, el cual ya ha sido previamente evaluado con respecto a su comportamiento térmico, y así, poder establecer en qué se diferencia y determinar sus virtudes. Silva Flórez (2019) establece las características térmicas y el desempeño de laminado de esterilla como envolvente arquitectónica, sin embargo es un material que sigue siendo materia de estudio.

Este material se encuentra en el mercado actualmente y para efectos de la investigación de Silva Florez, la empresa V&V Laminados (ecotableros de Colombia) proveyó las probetas destinadas a ser evaluadas; estas sin ningún tipo de acabados, inmunizadas al vacío y secadas mecánicamente.

El panel del laminado de esterilla de guadua está conformado por tres capas contrachapadas de esterilla con aplicación de un adhesivo en resina fenólica, el cual se somete a prueba de placa caliente resguardada acogida a la norma *ASTM C177-04: Standard Test Method for Steady- State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties*.

Como resultado de la prueba de laboratorio, se establece que el coeficiente de conductividad térmica para el laminado de esterilla de guadua es de $0.0720 \text{ W/(m}^*\text{K)}$, y en las pruebas de campo realizadas para determinar su desempeño como envolvente arquitectónica mediante módulos con cerramiento en dicho material, se demuestra su función como aislante térmico. (Silva Flórez, 2019)

Silva Flórez también enfatiza en la relación existente y directa de la densidad del material y su funcionamiento como material aislante, pues entre más denso el material, mayor será su conductividad térmica. En este sentido, el laminado de esterilla de guadua tiene una densidad más alta que la madera contrachapada, sin que esto afecte significativamente su mejor comportamiento térmico.

Siguiendo por esta línea, es importante mencionar la madera, un material que tiene amplio uso en la construcción. Existen maderas blandas y maderas duras, teniendo las primeras una densidad inferior que las duras, debido a una mayor presencia de porosidades. La pérdida de agua en las fibras aumenta la unión de estas y su densidad, lo que se traduce en un incremento de resistencia y rigidez. (Askeland et al., 2011)

En cuanto a su comportamiento térmico, se establece un coeficiente de conductividad térmica de $0.159 \text{ W/(m}^*\text{K)}$ para las maderas duras, y para las maderas blandas (ó suaves) de $0.115 \text{ W/(m}^*\text{K)}$. (Çengel, 2007)

Con la madera contrachapada (ó triplex), nos encontramos un material cuya producción ha aumentado desde la segunda guerra mundial, siendo Europa líder. La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación (FAO) define la madera contrachapada como uno de los tres principales grupos de productos elaborados

a base de madera (junto con los tableros de fibra y los tableros de partículas), pudiendo esta tener aplicación estructural en la construcción.

El tablero contrachapado se consigue de “la unión de tres o más láminas, de tal forma que las fibras de cada chapa se crucen en ángulo recto con las de las capas inmediatas”. (FAO, 1964) Se enfatiza también en la exigencia de esta industria, pues se requiere que la materia prima para la fabricación de estos elementos sea de buena calidad, de buen aspecto y características estructurales.

Adicional a esto, se menciona que el contrachapado es generalmente realizado con un número de capas impares, capas ya sea de madera blanda, o madera dura en las capas expuestas y madera blandas al centro, cuya unión se hace con resina fenólica termoestable. (Askeland et al., 2011)

La conductividad térmica de la madera contrachapada es de $0.12 \text{ W/(m}^*\text{K)}$ (Çengel, 2007), coeficiente que puede variar según la densidad de la madera usada, estando en el rango de 0.09 y $0.24 \text{ W/(m}^*\text{K)}$. (Tipler & Mosca, n.d.)

De estas investigaciones podemos tener en cuenta cómo los resultados y características de un material se ven influenciados por su proceso de transformación y las condiciones o características que presenta la materia prima. Debido a esto, la esterilla laminada de guadua es el producto más cercano que tenemos como referente para esta investigación.

Un material referente igualmente, pero de origen sintético y frecuentemente usado en la construcción, es el poliestireno expandido. Si bien es un material que tiene un desempeño térmico favorecedor, el impacto ambiental que produce es bastante negativo pues su ciclo de vida es relativamente corto, convirtiéndose rápidamente en residuo y dejando grandes cantidades. La forma como se maneja este residuo usualmente es la incineración, causando un gran daño, así que los esfuerzos por reciclar este material cada vez aumentan más (Samper et al., 2008).

El fibrocemento también es un material ampliamente usado en la construcción, el cual en sus inicios era fabricado con asbesto, que cumplía con la función de una fibra de refuerzo, pero debido a que este agregado provocaba problemas de salud, e incluso se consideraba cancerígeno, se dejó de utilizar y se reemplazó por fibras de celulosa, vidrio, o fibras vinílicas sintéticas. Posee características que invitan al consumidor a escoger este material por encima de otros, como lo son la fácil trabajabilidad, los diferentes acabados que se le pueden aplicar, la rapidez de construcción, su alta resistencia a impactos y durabilidad, resistencia al fuego, entre otros (González, n.d.). Sin embargo, a pesar de sus beneficios, las láminas de fibrocemento son el segundo material de construcción más contaminante en cuanto a emisiones de CO_2 , con un porcentaje del 15% (Díaz Riveros, 2014). Este autor recomienda que se deben sopesar las ventajas y desventajas, y determinar cuál es el factor más importante a la hora de seleccionar un material.

Como se ha mencionado anteriormente, existe una tendencia fuerte e importante en la utilización de recursos que aporten beneficios en términos medioambientales. Se pueden encontrar avances e investigaciones importantes hechas con base en algunas

fibras vegetales que quedan como residuos de procesos industriales o bien materia orgánica que tiene características adecuadas para la utilización en ámbitos de ingeniería.

A continuación, se mencionarán materiales aglomerados elaborados a partir de fibras vegetales, que, a pesar de no entrar en la categoría de laminados, son creados a partir de residuos orgánicos, y comparten esta característica con la hoja caulinar de la guadua.

Existen diversas investigaciones donde se utiliza la cascarilla de arroz como materia prima, pero su diferencia radica principalmente en el aglutinante. Uno de los casos utiliza la *Saccharomyces Cerevisiae*, que es un tipo de levadura, la cual permite que el panel aumente su estabilidad física sin afectar su capacidad aislante, debido a que es un productor de porosidad. La conductividad térmica del aglomerado se encuentra alrededor de $0.096 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, no es atacado por hongos por su estabilidad química, y es ignífugo (Gutiérrez-M.D. et al., 2014). Las pruebas realizadas en esta investigación para determinar la conductividad térmica se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C 177 – 97, con un analizador automático ANACON TCA 88.

Se realizó otro estudio donde elaboran una probeta mezclando la cascarilla de arroz con almidón de yuca, fibra de banano, y fique, el cual dio como resultado $0.0965 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$, sin embargo, repiten este procedimiento con los mismos componentes, únicamente disminuyendo la presión que se le aplica durante la conformación del aglomerado, y su conductividad térmica se redujo a $0.0653 \text{ W}/(\text{m}^*\text{K})$. Con esto confirman que, a mayor presencia de porosidades, menor será su capacidad de conducción. En este caso, la norma que utilizaron para la realización de esta prueba fue la misma que la anterior, igualmente con el analizador automático ANACON modelo 88 (Cadena & Bula, 2002).

Por otro lado, se evaluó el material rastrojo de maíz el cual es el desecho resultante de la cosecha del maíz, siendo el residuo agrícola que presenta mayor relación de carbono/nitrógeno, haciéndolo difícil de descomponer por lo cual es un buen candidato para ser utilizado como panel aglomerado. Como aglutinante se utilizó Adhesivo PVA tipo D4. Este estudio indicó que la conductividad de este material es de $0.032 \text{ W}/(\text{m}^*\text{k})$, siendo muy baja en comparación de otros materiales ya que se evitó comprimirlo al máximo, manteniendo una porosidad significativa en su interior. Para este estudio se utilizó la norma chilena NCh 850 de 83 “Método para la determinación de la conductividad térmica en estado estacionario por medio del anillo de guarda” (Loyola Lavin, 2012).

La fibra de coco también ha sido un recurso base de estudio, ya que es una fibra de usos variados, teniendo entre sus características ser un material higroscópico, de alta resistencia mecánica, baja densidad y alta durabilidad (no se ve afectada por hongos e insectos). (Villa et al., 2019)

En esta ocasión, se evalúa su comportamiento como aislante térmico y acústico en un muro de estructura de pino con tableros de OSB¹⁸, cuyas cavidades se rellenan con fibra de coco seca y limpia, con una densidad promedio de $640 \text{ Kg}/\text{m}^3$. Las pruebas

¹⁸ Tablero conglomerado de virutas (Wikipedia, n.d.).

de laboratorio para la conductividad térmica se realizan bajo la norma ASTM C518-15 y ASTM C177-13, y con el equipo Tci Thermal Analyzer C-Therm. Cabe aclarar que la fibra de coco es puesta en las cavidades sin aplicar ningún tipo de presión o aglutinamiento. Cada material es analizado por separado, determinando que la conductividad térmica para el pino es de $0.26 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, para el tablero de OSB es de $0.45 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, y para la fibra de coco de $0.04 \text{ W/(m}\cdot\text{k)}$, demostrando este último su excelente comportamiento como aislante térmico, considerando un impacto positivo para el confort térmico en edificaciones.

Es importante encontrar en estos recursos oportunidades para aumentar el uso eficiente de las materias primas, el aprovechamiento de los residuos con grandes potenciales, además de la exploración de nuevos y distintos mercados, que permiten un amplio y variado espectro de aplicaciones en la construcción y llevan a que la arquitectura siga contribuyendo a la sostenibilidad del medio ambiente.

En la presente investigación se llevará a cabo un componente experimental con el fin de evaluar el comportamiento térmico del material creado a partir de la hoja caulinar, por lo cual el proceso realizado por Giraldo Castañeda (2013) orienta el procedimiento y el análisis de datos para esta investigación. El autor planteó estrategias de enfriamiento pasivo para la reducción de la temperatura radiante (T_r) o superficial en viviendas VIS en la ciudad de Cali. Estas estrategias fueron de 3 tipos: de prevención, modulación y disipación de calor, tanto en el componente térmico como en soluciones constructivas.

Una característica que busca en sus soluciones es que los materiales a usar sean livianos y de poco espesor, y que aun así logren un buen desempeño térmico, ya que estos se implementarían en viviendas tanto nuevas como construidas.

Elaboró 5 modelos incluyendo las estrategias de enfriamiento pasivo, en los cuales evaluó su desempeño térmico contrastando los niveles óptimos de T_r con la T_r calculada para envolventes típicas. Obtenidos estos datos por medio de la evaluación teórica, realizó mediciones empíricas en un laboratorio a cielo abierto con radiación solar directa.

Para esta prueba, realizó 5 módulos de 5 caras de $50 \times 50 \times 50 \text{ cm}$ con placas de poliestireno expandido en cuatro caras y una cara con placa de concreto, siendo esta cara la probeta que arrojaría los resultados ya que tienen variaciones en todos los módulos. Estos últimos se apoyaron sobre bases inclinadas para simular el asoleamiento de Cali (las pruebas se realizaron en La Plata, Argentina, con condiciones climáticas diferentes). La prueba consiste en exponer las estrategias de enfriamiento pasivo a radiación solar directa en unas horas críticas para evaluar su desempeño. El rango horario escogido fue desde las 12:00 hasta las 18:00 horas.

Se realizaron pruebas de control de densidad con la ayuda de una balanza y las dimensiones de diseño para calcular su volumen, y así confirmar la homogeneidad de las probetas y evitar las variaciones que afectarían el desempeño térmico de cada probeta. Para la prueba de control de transmitancia térmica, utilizó el método de caja caliente calibrada y así determinar la capacidad de cada probeta para transferir el calor por conducción.

Una calibración fue realizada previa a las pruebas definitivas, que consistió en que los módulos estuvieran libres de interferencias como sombras, reflejos, goteras o corrientes de aire, que afectarían el desempeño térmico de alguno.

Una vez realizadas las pruebas previas a las probetas, procedió a medir el porcentaje de reducción de la Tr con la ayuda de una cámara termográfica y un termohigrómetro digital Datalogger, tomando la medición en el centroide de cada módulo. Como primera medida, toma la Tr de la superficie interior y exterior de la probeta para verificar que sean similares. El registro de la Tr se tomó cada 30 minutos en el rango horario ya mencionado. Con el termohigrómetro toma datos de la temperatura del aire y la humedad relativa, y el registro de la radiación solar se hace gracias a los datos recopilados por un piranómetro de la estación meteorológica de la Universidad Nacional de la Plata.

Finalizadas las pruebas, los resultados fueron tabulados y graficados en hojas electrónicas para ser analizados posteriormente. También trasladó el equipo a un sitio protegido con el fin de enfriarlo para obtener una Tr igual en las siguientes pruebas a realizar. Los resultados que arrojan estas pruebas en su parte experimental, muestran una reducción de Tr que varían entre 5,4°C hasta 15,6°C siendo unas estrategias de enfriamiento pasivo más favorecedoras que otras.

Teniendo este proceso como referencia junto con las demás investigaciones ya mencionadas, se tendrá una base para llevar a cabo la investigación con el laminado de hoja caulinar desde la elaboración del laminado, pasando por la fase experimental y finalmente el análisis de datos y resultados.

7. Metodología

Para lograr la evaluación del laminado de hoja caulinar, se implementarán los siguientes procesos, divididos en cuatro fases:

Fase 1: Revisión bibliográfica y literaria.

Fase 2: Elaboración de panel laminado de hoja caulinar de guadua.

Fase 3: Pruebas experimentales de desempeño térmico

Fase 4: Resultados y análisis comparativo.

7.1. Revisión bibliográfica y literaria

Se realizó una investigación documental y se recopiló información ya existente sobre los temas a tratar durante todo el desarrollo de la misma, con el propósito de proporcionar un contexto y una justificación adecuada.

7.2. Elaboración de panel laminado de hoja caulinar de guadua

La elaboración del panel laminado de hoja caulinar se llevó a cabo en 2 etapas. En la primera etapa se recogió el material del guadua para su posterior preparación y transformación, donde se tuvo en cuenta unos lineamientos establecidos como lo son

retirar las partes dañadas, mantener la pubescencia del envés, lijar las superficies lisas de la hoja para lograr una mejor adherencia del pegante y cortar piezas para lograr las dimensiones de 30 x 30 cm del panel.

La segunda etapa consistió en unir cinco láminas de 30 x 30 cm, aplicando un adhesivo de contacto en ambas superficies (excepto las láminas que quedan al exterior de cada panel), para posteriormente armar cada panel que se llevó a la prensa hidráulica, y se aplicó una presión de forma que todas las probetas se realizaran de forma homogénea. La prensa permitió la elaboración de cuatro paneles simultáneamente, y su tiempo de curado fue de tres días. Pasado este tiempo, se retiraron de la prensa y se perfilaron los bordes, con el fin de que las probetas encajaran correctamente en el equipo con el cual se realizaron las pruebas.

7.3. Pruebas experimentales de desempeño térmico

Las pruebas experimentales se ejecutaron en el taller 1004 del edificio D5 de la Universidad del Valle. En este espacio se llevó a cabo la realización tanto de los paneles como de las pruebas a estos mismos, con la prensa hidráulica y el equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales respectivamente.

Se tiene presente que la densidad en las fibras vegetales influye en los datos que se generen a la hora de realizar las muestras, por lo tanto, se tomaron los valores de espesor, peso y volumen de cada una de las probetas a estudiar. A pesar de presentar ciertas variaciones, se encontraron disimilitudes numéricas no muy relevantes que hubiesen podido afectar los resultados.

Para realizar las pruebas y determinar la temperatura superficial del laminado de hoja caulinar, se utilizaron probetas de 8 a 9 mm de espesor aproximadamente con dimensiones de 30 x 30 cm, el equipo experimental ya mencionado, y 2 multímetros con termocuplas UT33C+ Series. A cada probeta se le definió una superficie de exposición directa y otra con exposición indirecta, disponiendo la fuente de calor, la cual es constante y estable, a una distancia que se determinó previamente, y pasado cierto tiempo se tomó la temperatura con ayuda de los multímetros hasta lograr una medición estable.

Esta prueba al ser experimental no posee datos comparables con otros materiales de referencia, por lo tanto, se evaluaron probetas con dimensiones y espesores iguales, de laminado de esterilla de guadua, poliestireno expandido, y fibrocemento, que nos arrojaron datos comparables para el análisis.

7.4. Resultados y análisis comparativo

Se realizaron pruebas a tres probetas de panel laminado de hoja caulinar, de las cuales se obtuvieron tres tipos de datos: temperatura superficial en cara expuesta directa, temperatura superficial en cara expuesta indirecta y la diferencia entre estas dos temperaturas. Esta misma prueba se realizó a las probetas de los materiales de referencia.

Una vez obtenidos los resultados se hizo un análisis comparativo entre ellos para así determinar las propiedades como aislante térmico del panel laminado de hoja caulinar. Adicionalmente, las densidades de todos los materiales evaluados fueron igualmente comparados.

8. Desarrollo

8.1. Revisión bibliográfica y literaria

Partiendo de la revisión de la literatura disponible, se puede concluir que actualmente no existen desarrollos tecnológicos o estudios técnicos basados en este material, por lo tanto, esta investigación es exploratoria con carácter cuantitativo. Para lograr los objetivos propuestos y satisfacer las necesidades expuestas en este documento, se realizaron los procedimientos que se mostrarán a continuación, cuyas bases fueron: el procedimiento realizado por J. Martínez Parra para la elaboración del panel, con ciertos ajustes, y el método aplicado por W. Giraldo Castañeda para la evaluación de las pruebas tanto para el panel laminado de hoja caulinar y los paneles de materiales de referencia.

8.2. Elaboración de panel laminando de hoja caulinar de guadua

Este proceso se dividió en dos fases para así elaborar el panel laminado de hoja caulinar de *Guadua Angustifolia* Kunth. Para lograr un armado homogéneo de los paneles, se usó una prensa hidráulica y un manómetro digital para medir la fuerza ejercida.

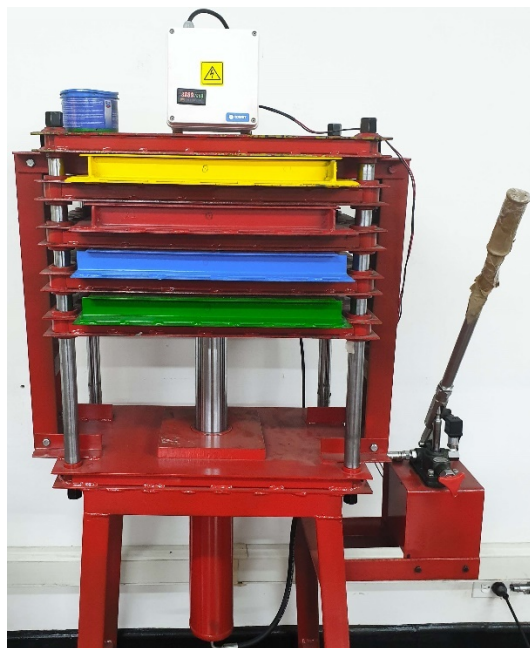
8.2.1. Instrumental

El instrumental usado para el prensado de los paneles fue una prensa hidráulica que con la ayuda de una celda de carga para medir la presión mide en unidades psi la fuerza que ejerce (Figura 27) lo que nos permite controlar la fuerza que se está ejerciendo sobre los paneles para lograr un prensado óptimo y uniforme. Esta celda funciona con electricidad, mientras que la prensa no la necesita. La máquina cuenta con múltiples bandejas de 0.40 x 0.40, con sus respectivas tapas. Estas bandejas hechas en hierro son desmontables para facilitar el armado de los paneles (Figura 28).

La prensa fue fabricada para la Universidad del Valle y probada previamente por los mismos fabricantes antes de ser usada para esta investigación.

Figura 27

Prensa hidráulica



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 28

Bandeja de la prensa hidráulica



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

8.2.2. Fase I: Preparación del material.

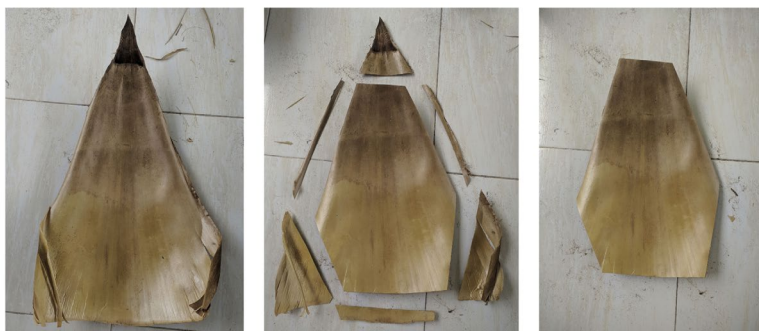
Se inició con la recolección de las hojas caulinares en guaduales de especie *Angustifolia* Kunth, las cuales debían cumplir las siguientes características: Sólo se tomaron hojas que se hayan caído por sí solas, que no tuvieran presencia de hongos o daños por insectos que afecten la totalidad de la hoja, no podían estar podridas por exceso de humedad, y debían estar lo más abiertas posible, sin quiebres o rupturas importantes, preferiblemente grandes.

Gracias a la experiencia de J. Martínez Parra, se estableció que la hoja no necesita pasar por un tratamiento de conservación previo o posterior que garantice su durabilidad. Igualmente determinó que la hoja caulinar de la *Guadua Angustifolia* Kunth posee una mejor estructura, es más grande, y no tan quebradiza en comparación a la de otras especies.

Posteriormente, las hojas recolectadas se trasladaron al lugar donde empezó su transformación, eliminando la parte apical y basal para evitar que se enrollen. También se retiraron las partes laterales que se encontraban en mal estado, así como se muestra en la Figura 29. La pubescencia presente en el envés de la hoja no se considera necesario retirarla ya que de esta manera absorbe menos cantidad de pegante durante el proceso de engomado.

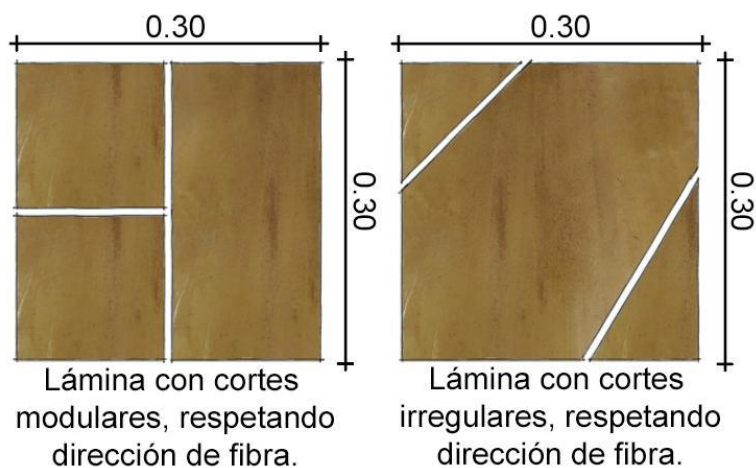
Figura 29

Transformación de la hoja



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Una vez preparadas las hojas, se dispusieron piezas contiguamente formando láminas de 30 x 30 cm, con sus fibras en la misma dirección. Las piezas fueron cortadas en figuras geométricas ortogonales modulares, lo cual facilitaba el armado, sin embargo, esto generaba más desperdicio. La lámina puede ser formada también a partir de piezas con figuras geométricas irregulares, disminuyendo el desperdicio, con un armado más dispendioso explicado gráficamente en la Figura 30. Fue necesario lijar el haz de las hojas ya que es una superficie lisa casi impermeable, para garantizar que el pegante se adhiera correctamente.

Figura 30*Panel armado*

Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Los paneles que se elaboraron para esta investigación están conformados por cinco láminas contrachapadas para lograr un espesor aproximado entre 8 y 9 mm, y de esta manera poderlos comparar con los materiales de referencia los cuales tienen el mismo espesor.

8.2.3. Fase II: Engomado y prensado.

Se hace la selección de láminas y se organizan para tener claro el orden en que se van a ubicar en la prensa. Hacia la parte externa se ubicaron láminas con superficies lisas y con las menores imperfecciones posibles, ya que son las caras visibles del panel. En las láminas intermedias esto es indiferente, sin embargo, se cuida que se dispongan de manera contrachapada, mostrado en la Figura 31.

Figura 31

Láminas organizadas



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Con los paneles armados, se procede a la aplicación de una capa uniforme del pegante “PL 285 uso profesional” (Figura 32) con la ayuda de una espátula plástica sobre ambas caras de las láminas (Figura 33), superponiéndolas de manera contrachapada como se explica en la Figura 34.

Figura 32

Pegante PL 285



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 33

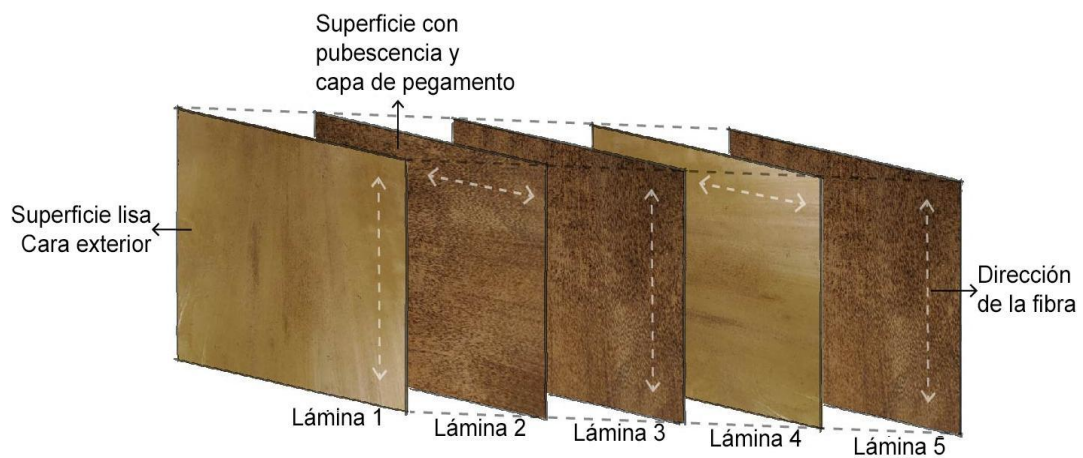
Aplicación del pegante



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 34

Composición de panel

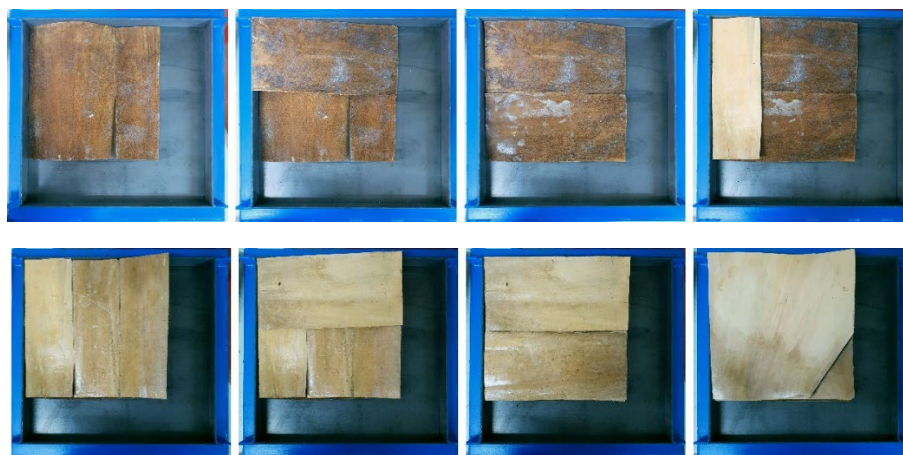


Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

La cantidad de pegante aproximada para una probeta de cinco láminas es de 330 ml aplicando una sola capa en cada superficie. El pegamento se deja secar por 20 minutos antes de apilar las cinco láminas en los moldes de la prensa (Figura 35), y se usó la prensa hidráulica. A partir del ensayo y error, se concluye que la presión adecuada para aplicar es de 1320 psi, lo que permitió una buena adherencia y un espesor entre 8 y 9 mm.

Figura 35

Armado de panel en el molde de la prensa



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Las probetas se dejaron presionadas por 3 días en la prensa ya que el pegamento especifica esa cantidad de tiempo para obtener un curado completo. Pasado este tiempo, se retiraron del equipo y debido a que las bandejas tienen dimensiones de 0.40 x 0.40, y los paneles son de 0.30 x 0.30, causó que las láminas se desfasaran unos milímetros. Por esta razón, fue necesario perfilar los bordes para lograr un acabado más parejo.

De cada probeta se observa que el grosor no es consistente en sus cuatro lados, esto se debe a la irregularidad que tiene la hoja caulinar por naturaleza, donde hacia el centro de la hoja tiende a ser más gruesa que hacia sus bordes.

A continuación, en la Tabla 4 se especificará las dimensiones y espesor de las probetas que se tomaron para realizar las pruebas experimentales de desempeño térmico.

Tabla 4*Características de los paneles*

Probeta #	Espesor en mm	Peso en gr	Dimensiones en cm
1	8,75	284	30x30
2	8	239	30x30
3	8,5	243	30x30

Nota. El dato del espesor es promediado.

8.3. Pruebas

Una vez obtenidas las probetas se procedió a realizar las pruebas empíricas con el equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales, el cual se explicará a detalle en el subcapítulo 8.3.1, con el fin de determinar la temperatura superficial del laminado de hoja caulinar.

8.3.1. Instrumental

El instrumental usado en las pruebas consistió en un solarímetros, dos multímetros con termocuplas y el equipo experimental.

El solarímetro marca EDTM modelo SP1065 (Figura 36), se usó para determinar los BTU¹⁹ de la radiación solar, dato necesario para ajustar el equipo experimental.

¹⁹ BTU: Unidad de energía British Thermal Unit. Señala que cantidad de energía se necesita, en condiciones atmosféricas normales, para incrementar en un grado Fahrenheit la temperatura que registra una libra de agua. (Definición.DE, n.d.)

Figura 36*Solar Power Meter*

Nota. Adaptado de *SP1065 BTU/Watt Solar Meter*, por EDTM, 2021, EDTM.com (<https://www.edtm.com/index.php/sp1065-digital-solar-power-meter>).

Con ayuda de dos multímetros marca UNI-T modelo UT33C+ y sus respectivas termocuplas (Figura 37), se tomaron las temperaturas superficiales tanto de la cara expuesta directa, como de la cara expuesta indirecta. Los datos arrojados son en grados centígrados.

Figura 37*UT33C+ Palm Size Multimeter*

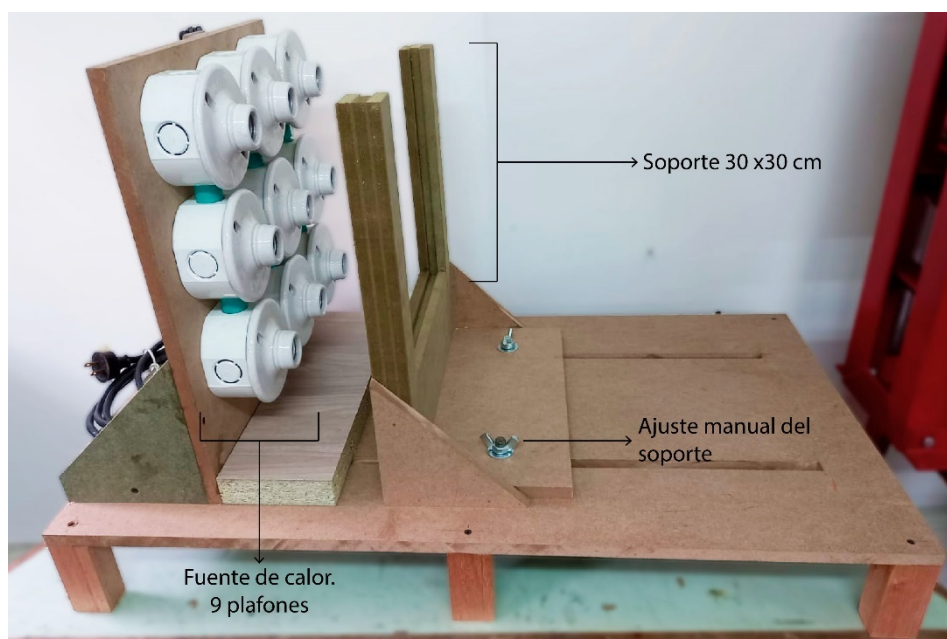
Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

El equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales irradia calor al elemento que se ubique en el soporte. Esta fuente de calor es proporcionada por nueve bombillos incandescentes de 100w, dispuestos en una cuadrícula de 3x3, y un soporte donde se pueden ubicar probetas de 30 x 30 cm, el cual permite ajustar la distancia de forma manual, y de esta manera, controlar el calor. También posee un interruptor que permite encender y apagar los bombillos según la necesidad. Ver Figura 38.

Este equipo fue fabricado para la Universidad del Valle y fue usado por primera vez en esta investigación. La fabricación de este equipo es relativamente sencilla en comparación con otras máquinas usadas para la determinación del desempeño térmico, lo que hace que sea fácilmente replicable.

Figura 38

Equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

8.3.2. Preparación

Ya obtenidos los datos de las características físicas de los paneles de hoja caulinar expuestos en la Tabla 4, se toman las mismas mediciones para los paneles de materiales de referencia, mostrados en la Tabla 5.

Tabla 5*Características de los paneles de materiales de referencia*

Probeta	Espesor en mm	Peso en gr	Dimensiones en cm
Laminado de Esterilla	7,7	458	30x30
Poliestireno Expandido	8,2	10	30x30
Fibro cemento	9,9	1189	30x30

Como se ha mencionado anteriormente, la densidad influye en el comportamiento térmico de un material. Por esta razón se calcula esta magnitud para cada probeta (Tabla 6), con el fin de ser analizado posteriormente una vez obtenidos los resultados de su desempeño térmico.

Tabla 6*Densidades de las probetas*

Probeta	Masa en kg	Volumen en m ³	Densidad kg/m ³
#1	0,284	0,0007875	360,63
#2	0,239	0,000720	331,94
#3	0,243	0,000765	317,65
Laminado de Esterilla	0,458	0,000693	660,89
Poliestireno Expandido	0,010	0,000738	13,55
Fibro cemento	1,189	0,000891	1334,45

También se ajustaron ciertas variables, con el fin de controlar las condiciones del entorno y de los procedimientos que se llevaron a cabo en el taller, como apagar las luces del taller para evitar que los bombillos irradiaran calor y generen brillos indeseados, ya que estos podrían afectar los resultados de las pruebas. Con la ayuda del solarímetro, se realizó una prueba de campo para determinar los BTU de la radiación solar entre las 12:00 m y la 1:00 pm para tomar el dato más alto (caso crítico) y replicarlo en el taller (Ver Figura 39). Este caso crítico fue de 280 BTU.

Figura 39

Prueba de campo afuera del edificio D5 para determinar BTU

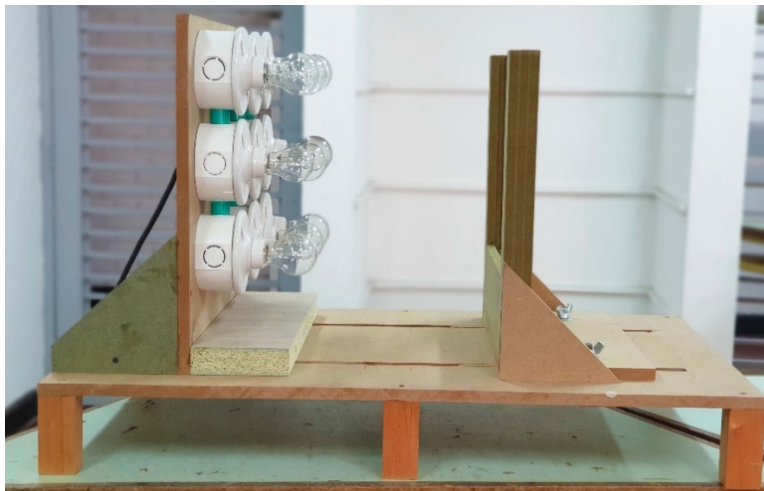


Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

El equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales cuenta con un sistema de ajuste de distancia entre la fuente de calor (los bombillos) y el soporte en donde se ubica la probeta. Ver Figura 40. Este soporte se ajustó a 25.2 cm de los bombillos, distancia en la cual se obtienen los mismos BTU que arrojó la prueba de campo.

Figura 40

Equipo experimental con soporte ajustado

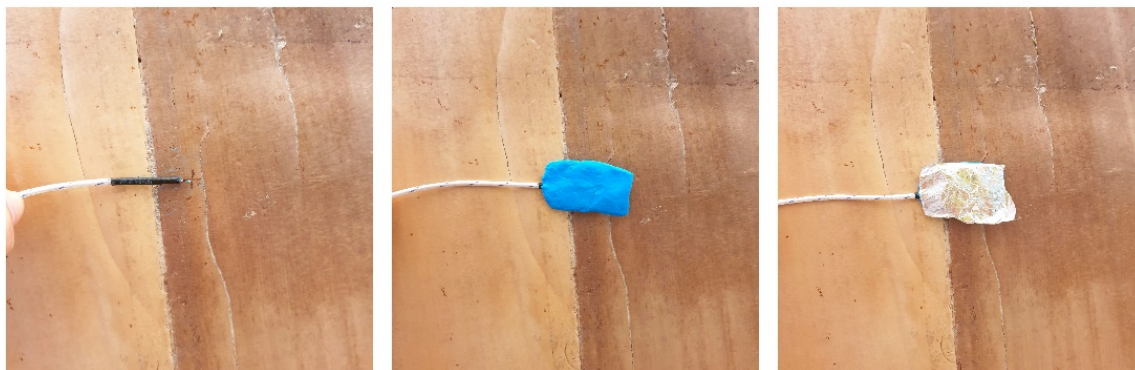


Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Para lograr resultados similares, las pruebas se realizaron en días diferentes a las mismas horas, es decir, entre las 12:00 y las 15:00. Una vez nos encontramos en este rango de tiempo, se posicionaron la probeta en el equipo y se situaron las termocupas en ambas caras, cuidando que las puntas de las termocupas hagan contacto directo con la superficie. Estas se adhieren con un trozo de caucho moldeable y adicional se cubre con foil de aluminio para evitar que factores externos incidan en el resultado que arroje la termocupla. Ver Figura 41.

Figura 41

Termocupla, caucho moldeable y aluminio



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

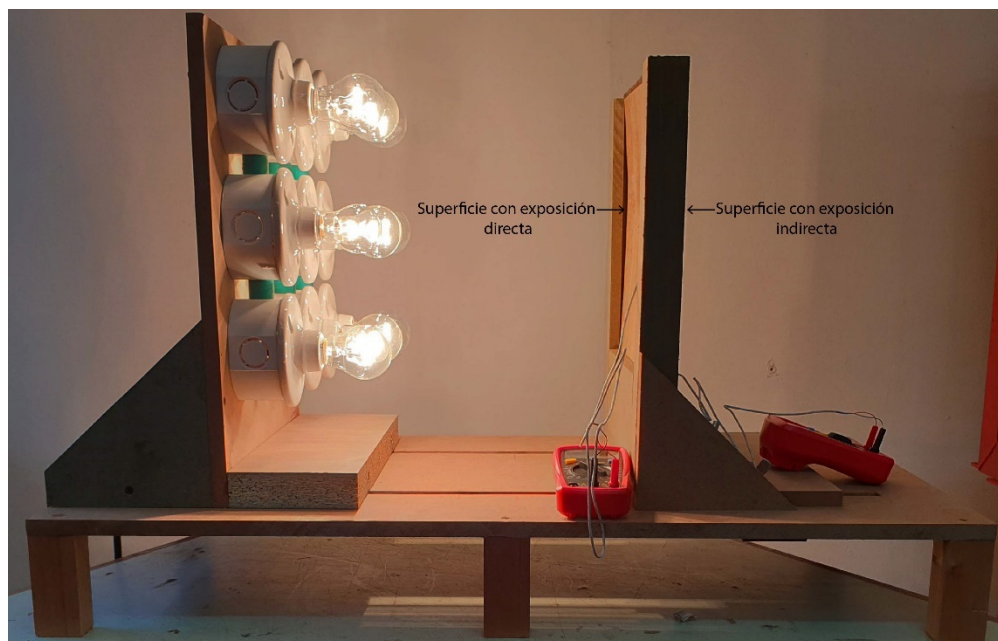
Antes de encender los bombillos del equipo, se toma un primer dato con los multímetros para verificar que la temperatura en ambas caras de la probeta sea la misma. Posterior a esto, se encienden los bombillos y se realiza la prueba de desempeño térmico. Una vez finalizada, se vuelven a apagar los bombillos, y se dejan enfriar para proceder con la prueba de la siguiente probeta.

8.3.3. Pruebas experimentales de desempeño térmico

Una vez ajustadas las variables, se ubican ambas termocupas en el centro geométrico de las probetas, tanto en la superficie con exposición directa como la superficie con exposición indirecta, mostrado en la Figura 42. El procedimiento que se va a describir a continuación, se les realizó a los tres paneles de laminado de hoja caulinar nombrados “Probeta #1”, “Probeta #2” y “Probeta #3”. Adicionalmente se realizó el mismo procedimiento a los tres paneles de los materiales de referencia, nombrados “Probeta Laminado de Esterilla” (Figura 43), “Probeta Poliestireno Expandido” (Figura 44), y “Probeta Fibrocemento” (Figura 45).

Figura 42

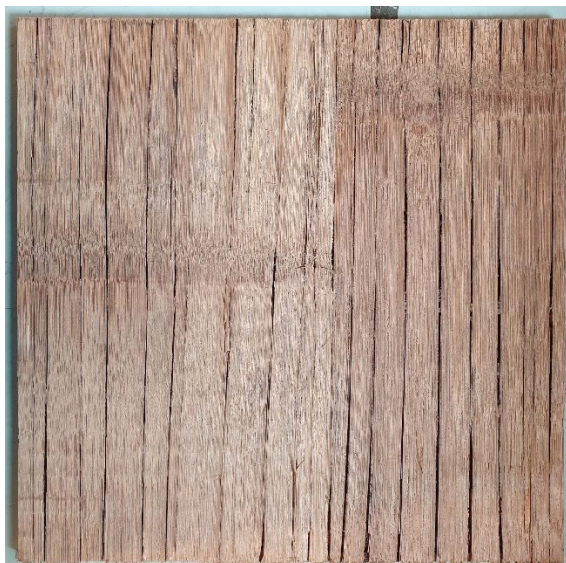
Equipo experimental en funcionamiento



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 43

Laminado de esterilla de guadua



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 44

Fibro cemento



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Figura 45

Poliestireno expandido



Nota. V. Soto Escobar & M. Urrea Cañas, 2021.

Tomado el dato de verificación con los bombillos apagados, se enciende el equipo. La medición de la temperatura superficial se realizó en intervalos de 5 minutos con la ayuda de los multímetros. Esta medición se hizo hasta que la temperatura en ambas superficies se estabilizara. Para esta investigación, se tomó como temperatura estable el dato arrojado en la cara con exposición indirecta, ya que esta cara es la que nos indica cuántos grados de temperatura puede aislar la probeta. Pasadas las primeras pruebas, se pudo determinar que la estabilización sucedió entre los 30 y 45 minutos, pero se extendieron las mediciones hasta llegar a los 55 minutos para corroborar esta temperatura. Este proceso se aplicó a las probetas #1, #2, y #3.

Los parámetros de medición para los paneles de hoja caulinar también fueron aplicados en las probetas de materiales de referencia, a excepción de la duración total de la prueba, ya que algunos paneles presentaron estabilidad en un mayor rango de tiempo.

Al finalizar las pruebas con las probetas #1, #2, y #3, se continuó con la probeta de esterilla laminada. Este material presentó estabilidad en la temperatura a los 55 minutos, durando la prueba un total de 70 minutos en el que se corroboró la estabilidad de la temperatura. La siguiente fue la probeta de poliestireno expandido, la cual presentó estabilidad en la temperatura a los 15 minutos. Y, por último, la probeta de fibrocemento, cuya estabilización se dio a los 45 minutos. Las pruebas de estos dos últimos materiales duraron 55 minutos cada una.

9. Resultados

Los resultados arrojados por las pruebas fueron tabulados en el formato mostrado en la Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11, y Tabla 12. Los datos que se enseñan en las tablas son: el número de la prueba, es decir, el orden en el que se realizó, el lugar y la fecha de realización, la densidad de dicho material, los minutos que tomó la realización de la prueba, en intervalos de 5 minutos, la temperatura en la cara con exposición directa, la temperatura en la cara con exposición indirecta, y la diferencia entre estas temperaturas. Los datos en color naranja señalan el momento de estabilización de la temperatura en la cara con exposición indirecta.

La Tabla 7, Tabla 8, y Tabla 9, muestran los resultados de las probetas elaboradas en hoja caulinar de guadua, la Tabla 10 enseña los resultados de la probeta de laminado de esterilla, la Tabla 11 muestra los resultados de la probeta de poliestireno expandido, y la Tabla 12 enseña los resultados de la probeta de fibrocemento.

Tabla 7

Resultados prueba 1, probeta #1 laminado de hoja caulinar

Prueba:	1		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Dia:	Noviembre 5 de 2021		
Probeta #1 Laminado de hoja caulinar			
Espesor	8,75 mm	Densidad	360,63 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	26	26	0
0:05	30	26	4
0:10	33	29	4
0:15	36	31	5
0:20	38	33	5
0:25	40	34	6
0:30	41	35	6
0:35	42	35	7
0:40	43	35	8
0:45	44	36	8
0:50	44	36	8
0:55	44	36	8

Tabla 8*Resultados prueba 2, probeta #2 laminado de hoja caulinar*

Prueba:	2		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Dia:	Noviembre 5 de 2021		
Probeta #2 Laminado de hoja caulinar			
Espesor	8 mm	Densidad	331,94 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	26	26	0
0:05	32	28	4
0:10	37	31	6
0:15	40	34	6
0:20	43	35	8
0:25	44	36	8
0:30	45	37	8
0:35	46	37	9
0:40	46	37	9
0:45	47	37	10
0:50	47	37	10
0:55	48	37	10

Tabla 9*Resultados prueba 3, probeta #3 laminado de hoja caulinar*

Prueba:	3		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Dia:	Noviembre 9 de 2021		
Probeta #3 Laminado de hoja caulinar			
Espesor	8,5 mm	Densidad	317,65 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	23	23	0
0:05	29	24	5
0:10	32	26	6
0:15	35	28	7
0:20	37	30	7
0:25	38	31	7
0:30	39	32	7
0:35	40	32	8
0:40	41	33	8
0:45	41	33	8
0:50	41	33	8
0:55	41	33	8

Tabla 10

Resultados prueba 4, probeta laminado de esterilla

Prueba:	4		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Dia:	Noviembre 13 de 2021		
Probeta Laminado de Esterilla			
Espesor	7,7 mm	Densidad	660,89 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	25	25	0
0:05	31	27	4
0:10	34	30	4
0:15	36	32	4
0:20	37	33	4
0:25	39	34	5
0:30	39	35	4
0:35	39	35	4
0:40	40	35	5
0:45	40	36	4
0:50	41	36	5
0:55	41	37	4
1:00	42	37	5
1:05	42	37	5
1:10	42	37	5

Tabla 11

Resultados prueba 5, probeta poliestireno expandido

Prueba:	5		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Dia:	Noviembre 13 de 2021		
Probeta Poliestireno Expandido			
Espesor	8,2 mm	Densidad	13,55 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	25	25	0
0:05	36	28	8
0:10	41	31	10
0:15	43	32	11
0:20	43	32	11
0:25	43	32	11
0:30	44	32	12
0:35	44	32	12
0:40	43	32	11
0:45	43	32	11
0:50	43	32	11
0:55	43	32	11

Tabla 12

Resultados prueba 6, probeta fibrocemento

Prueba:	6		
Lugar:	Taller 1004, edificio D5, Universidad del Valle		
Día:	Noviembre 13 de 2021		
Probeta Fibrocemento			
Espesor	9,9 mm	Densidad	1334,45 kg/m ³
Tiempo (Minutos)	Temp. Cara exposición directa °C	Temp. Cara exposición indirecta °C	Diferencias °C
0:00	24	24	0
0:05	29	27	2
0:10	34	31	3
0:15	37	35	2
0:20	40	38	2
0:25	41	40	1
0:30	43	41	2
0:35	44	42	2
0:40	45	42	3
0:45	45	43	2
0:50	46	43	3
0:55	46	43	3

El dato que se tomó como determinante para evaluar el desempeño como aislante térmico, fue la diferencia de temperatura en el momento de estabilización en la cara con exposición indirecta.

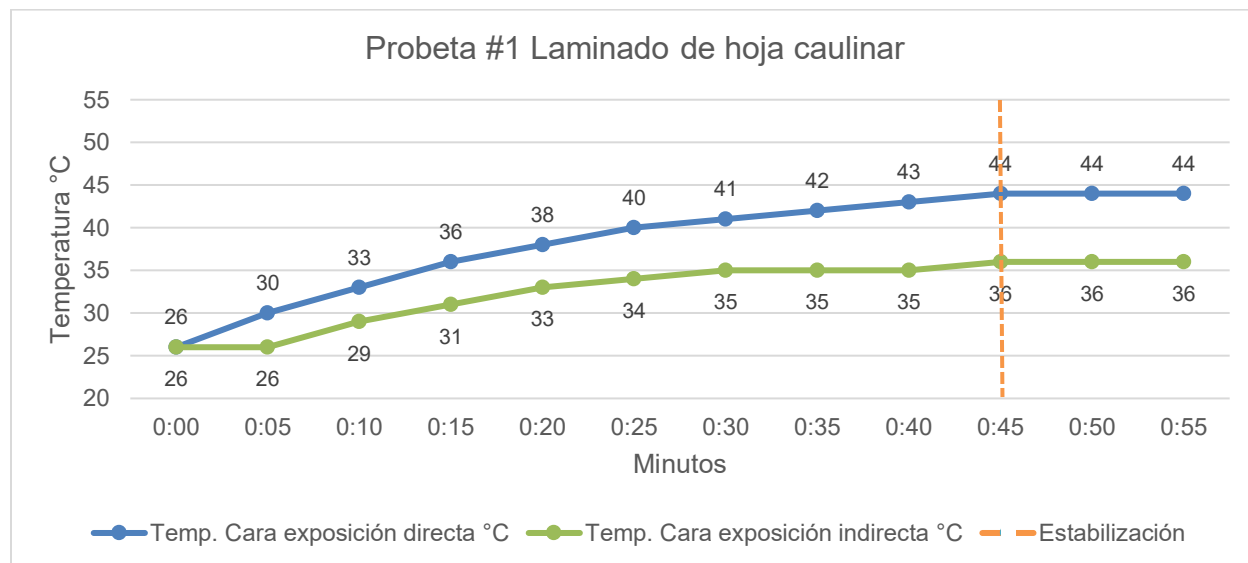
9.1. Análisis comparativo

En las siguientes figuras se evidencia la información de las tablas anteriores, con el fin de representar gráficamente los datos y mostrar en qué momento la curva de la temperatura comienza a ser estable.

La probeta #1 presentó una temperatura inicial de 26°C, alcanzando una temperatura de 44°C en la cara con exposición directa y de 36°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 45 minutos, igualmente de 36°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 8°C (Ver Figura 46).

Figura 46

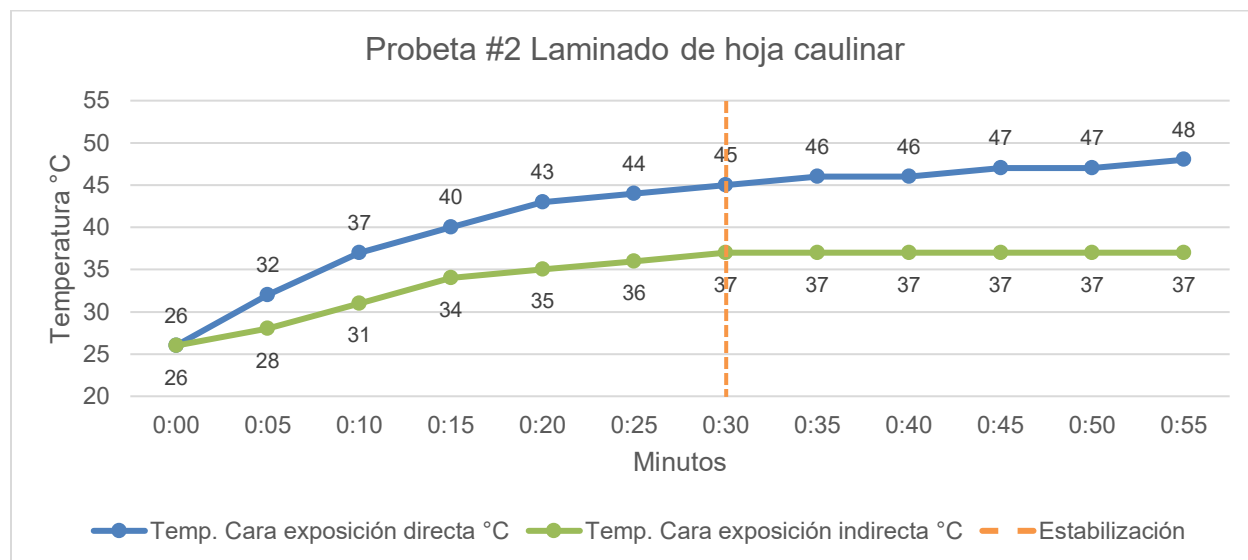
Comportamiento de la temperatura en probeta #1 Laminado de hoja caulinar



La probeta #2 presentó una temperatura inicial de 26°C, alcanzando una temperatura de 48°C en la cara con exposición directa y de 38°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 30 minutos con 37°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 8°C, sin embargo, la diferencia máxima en esta prueba fue de 11°C (Ver Figura 47).

Figura 47

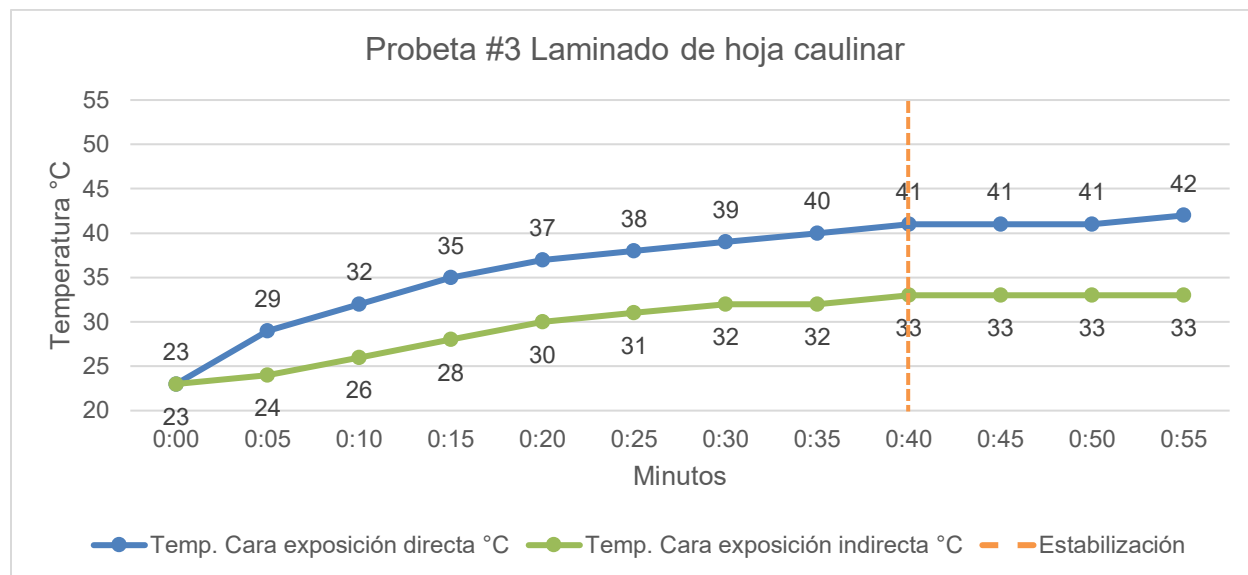
Comportamiento de la temperatura en probeta #2 Laminado de hoja caulinar



La probeta #3 presentó una temperatura inicial de 23°C, alcanzando una temperatura de 42°C en la cara con exposición directa y de 34°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 40 minutos con 33°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 8°C, sin embargo, la diferencia máxima en esta prueba fue de 9°C (Figura 48).

Figura 48

Comportamiento de la temperatura en probeta #3 Laminado de hoja caulinar



En las tres pruebas con las probetas de laminado de hoja caulinar el tiempo de estabilización fue entre 30 y 45 minutos con temperaturas diferentes, pero en los tres casos la diferencia siempre fue de 8°C durante el tiempo de estabilidad. Se puede notar la consistencia de los resultados a pesar de que tanto las temperaturas iniciales como las finales tengan disimilitudes, incluso, a pesar de que en las probetas #2 y #3 la temperatura subió 1°C en la cara con exposición directa en el minuto 55, la temperatura en la cara con exposición indirecta se mantuvo estable.

Adicionalmente, en la medición realizada a los 5 minutos de iniciar la prueba, la diferencia de temperatura fue de 4°C, a excepción de la probeta #3 donde su diferencia en la primera medición fue de 5°C, lo que corresponde a la mínima diferencia de temperatura en las pruebas a estas tres probetas.

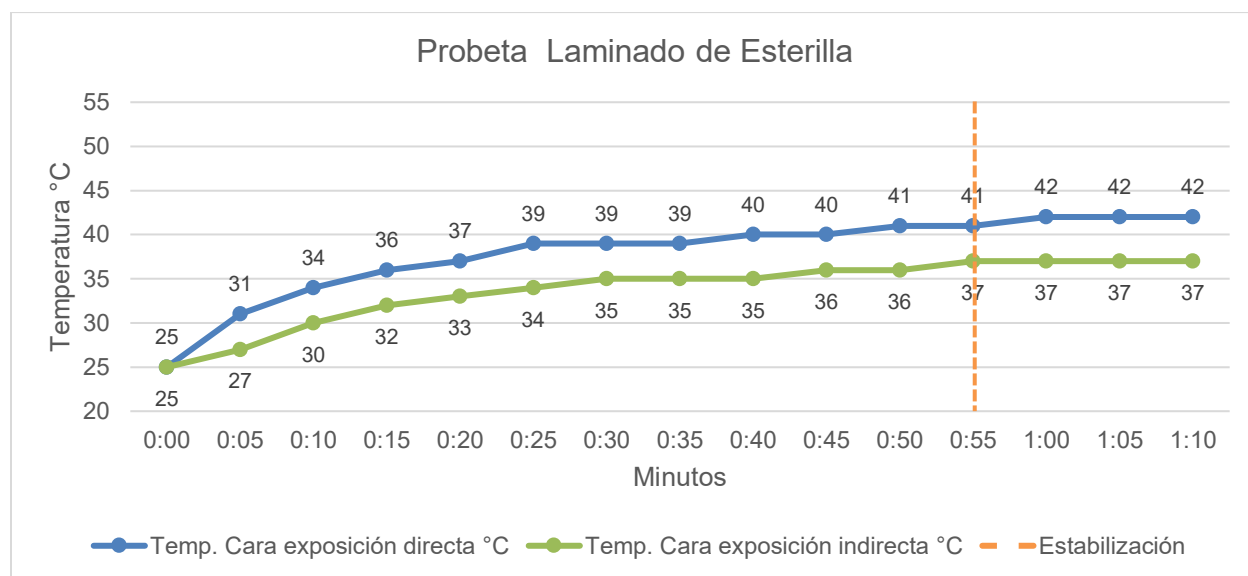
El incremento de la temperatura ocurre rápidamente durante los primeros 20 minutos, a partir de este momento la temperatura se torna más estable y el incremento más lento.

Para las tres pruebas fue posible determinar que la duración total fuera de 55 minutos gracias a la proximidad en los tiempos de estabilización.

La probeta Laminado de Esterilla presentó una temperatura inicial de 25°C, alcanzando una temperatura de 42°C en la cara con exposición directa y de 37°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 55 minutos con 37°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 4°C, sin embargo, la diferencia máxima en esta prueba fue de 5°C (Ver Figura 49). De las seis pruebas realizadas, esta fue la más prolongada con una duración total de 1 hora 10 minutos, ya que la temperatura estable fue más tardía. El incremento de la temperatura ocurre rápidamente durante los primeros 15 minutos, a partir de este momento la temperatura se torna más estable y el incremento más lento.

Figura 49

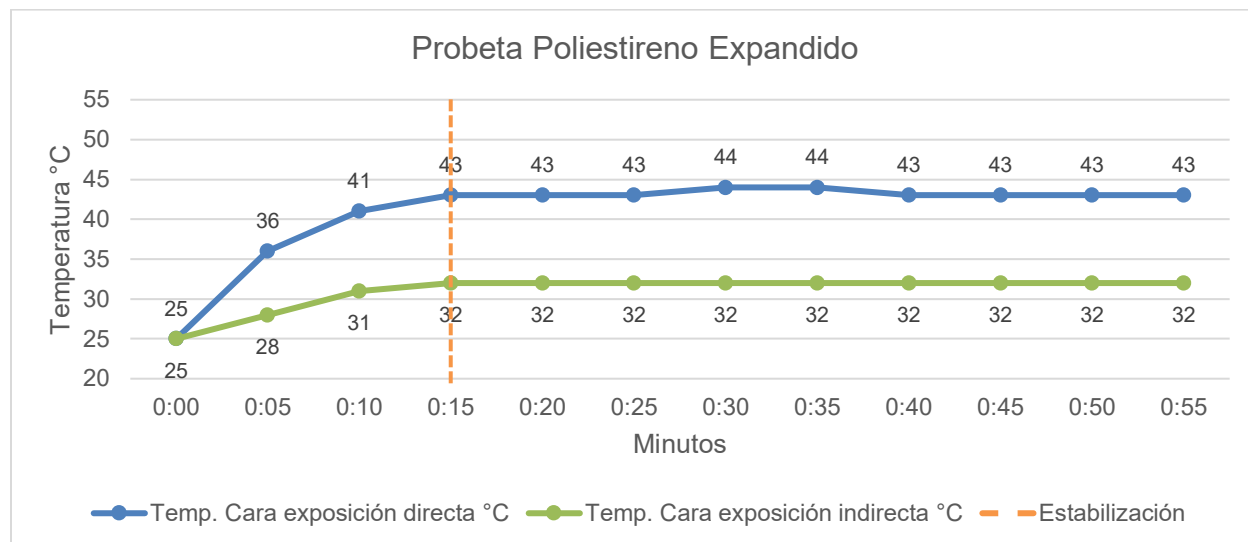
Comportamiento de la temperatura en probeta laminado de esterilla



La probeta Poliestireno Expandido presentó una temperatura inicial de 25°C, alcanzando una temperatura de 43°C en la cara con exposición directa y de 32°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 15 minutos con 32°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 11°C, sin embargo, la diferencia máxima en esta prueba fue de 12°C (Ver Figura 50). El incremento de la temperatura ocurre rápidamente durante los primeros 10 minutos, a partir de este momento la temperatura se torna más estable y el incremento más lento.

Figura 50

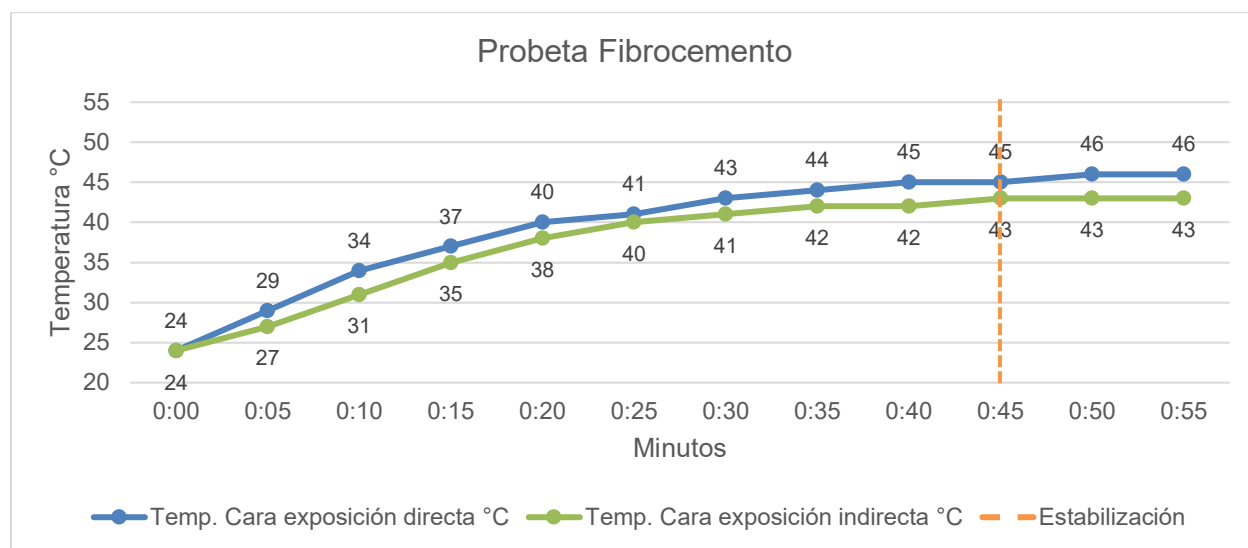
Comportamiento de la temperatura en probeta poliestireno expandido



La probeta Fibrocemento presentó una temperatura inicial de 24°C, alcanzando una temperatura de 46°C en la cara con exposición directa y de 43°C en la cara con exposición indirecta. Su temperatura estable se alcanzó a los 45 minutos con 43°C, logrando una diferencia entre ambas superficies de 2°C, sin embargo, la diferencia máxima en esta prueba fue de 3°C (Ver Figura 51). El incremento de la temperatura ocurre rápidamente durante los primeros 25 minutos, a partir de este momento la temperatura se torna más estable y el incremento más lento.

Figura 51

Comportamiento de la temperatura en probeta fibrocemento



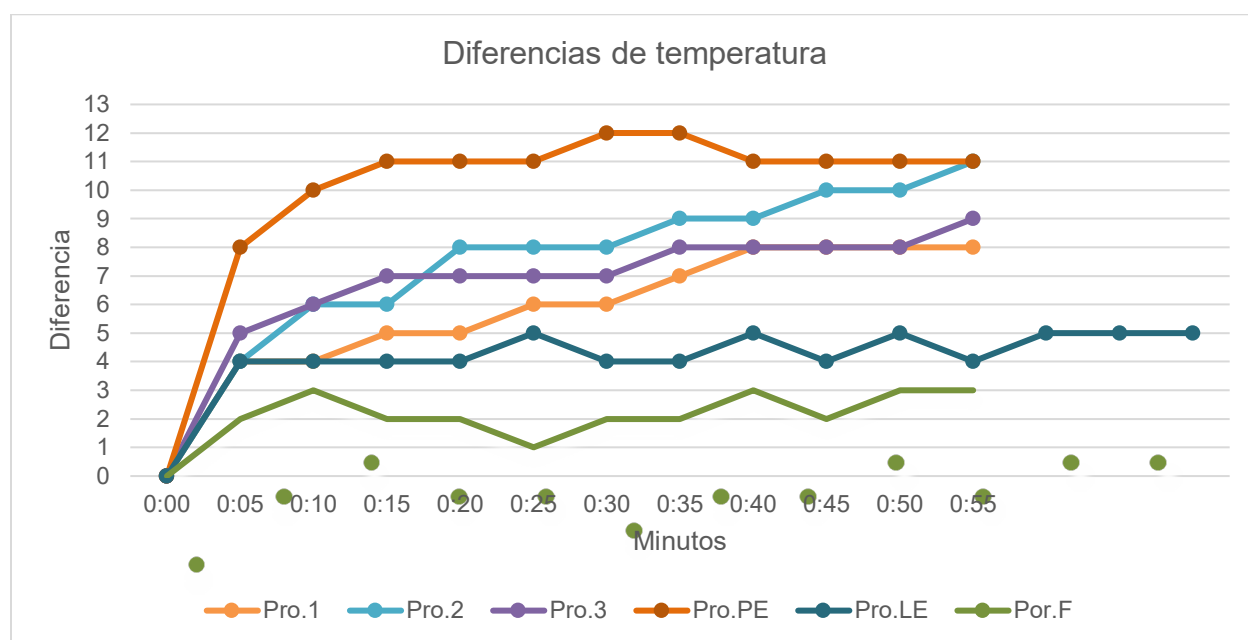
En cuanto a las diferencias de temperatura presentadas en las seis pruebas, las cuales se muestran en la Figura 52, se encontró que el panel laminado de hoja caulinar tuvo resultados óptimos con un rango de diferencia entre ambas superficies de 4°C y 11°C, en comparación con el laminado de esterilla cuyo rango estuvo entre los 4°C y 5°C. Esta diferencia resulta importante al ser el laminado de esterilla una fibra vegetal con un desempeño térmico positivo.

El poliestireno expandido fue el material que presentó mayores diferencias con un rango entre 8°C a 12°C, teniendo un mejor desempeño térmico que el laminado de hoja caulinar. Sin embargo, no hay que desconocer que el impacto ambiental generado por este material sintético es negativo.

Por último, el fibrocemento fue el material que obtuvo las diferencias más bajas de temperatura con un rango entre 1°C y 3°C, lo que se traduce en un desempeño térmico no tan beneficioso comparado con los otros materiales evaluados.

Figura 52

Diferencias de temperatura de todas las probetas



Como se mencionó anteriormente, la densidad es un factor que influye en el comportamiento térmico de un material, por lo tanto, se calculó este dato para las probetas evaluadas (Ver Tabla 13) encontrando que el laminado de hoja caulinar tiene una densidad más baja que el laminado de esterilla y el fibrocemento, relacionándose de manera proporcional esta afirmación con los datos arrojados de las diferencias de temperatura. En este sentido, el poliestireno expandido presentó una densidad significativamente baja, lo cual es una diferencia muy marcada con respecto al laminado de hoja caulinar, sin embargo, en los datos de diferencias de temperatura no hay gran variación entre estos dos materiales.

Dicho esto, el poliestireno expandido es el material con la menor densidad y la mayor diferencia de temperatura estable, y por el contrario el fibrocemento es el material más denso y con menor diferencia de temperatura estable. Con esto se comprueba que, a menor densidad, mejor es el comportamiento térmico del material. Esto se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13

Espesor, densidad y diferencia de temperatura estable de las probetas

Probeta	Espesor mm	Densidad Kg/m ³	Diferencia de temperatura estable °C
#1 Laminado hoja caulinar	8,75	360,63	8
#2 Laminado hoja caulinar	8	331,94	8
#3 Laminado hoja caulinar	8,5	317,65	8
Laminado de esterilla	7,7	660,89	4
Poliestireno expandido	8,2	13,55	11
Fibrocemento	9,9	1334,45	2

Los materiales de referencia poseen estudios técnicos que permitieron conocer el coeficiente de conductividad térmica k , el cual como se ha mencionado anteriormente, entre más bajo, se considera el material un buen aislante. En el caso de estos materiales evaluados, el poliestireno expandido tiene un coeficiente k más bajo, seguido por la esterilla laminada, y por último el fibrocemento con un coeficiente más alto. Igualmente, teniendo conocimiento de k , el espesor, y área de los materiales de referencia, fue posible hallar el valor R , el cual corresponde a la resistencia térmica, sabiendo también que entre más alto este valor se considera al material un mejor aislante. En este sentido, el valor R más alto lo obtuvo el poliestireno expandido y el más bajo el fibrocemento. Ver Tabla 14.

Tabla 14

Coefficiente k y valor R de los materiales de referencia

Material	$k, W/(m \cdot K)$	Espesor m (L)	Área m ² (A)	$R, m^2 \cdot ^\circ C/W$
Esterilla laminada	0,072	0,0077	0,09	1,19
Poliestireno expandido	0,044	0,0082	0,09	2,07
Fibrocemento	0,23	0,0099	0,09	0,48

Nota. (L) y (A) corresponden a los datos que se reemplazan en la fórmula de la resistencia térmica vista en apartado 5.6.1. (Silva Flórez, 2019; FAO, n.d.; Pizarreño, n.d.)

Estos datos concuerdan con los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, por lo tanto, se infiere que el coeficiente de conductividad térmica y la resistencia térmica del laminado de hoja caulinar estaría entre los valores de la esterilla laminada y el poliestireno.

Es importante mencionar que la temperatura estable de la cara con exposición indirecta sigue igualmente la lógica de los datos obtenidos en las pruebas, en el sentido que la menor temperatura estable alcanzada fue en la probeta de poliestireno expandido, siguiendo con las probetas de laminado de hoja caulinar, luego la probeta de laminado de esterilla y finalizando con la probeta de fibrocemento con una mayor temperatura (Ver Tabla 15). Esto corrobora que el laminado de hoja caulinar tiene una capacidad aislante menor que el poliestireno expandido, pero mayor que el laminado de esterilla y el fibrocemento.

Tabla 15

Temperatura estable de la cara con exposición indirecta

Probeta	Espesor mm	Temperatura estable. Cara exposición indirecta $^\circ C$
#1 Laminado hoja caulinar	8,75	36
#2 Laminado hoja caulinar	8	37
#3 Laminado hoja caulinar	8,5	33
Laminado de esterilla	7,7	37
Poliestireno expandido	8,2	32
Fibrocemento	9,9	43

10. Conclusiones

La presente investigación establece que el panel laminado de hoja caulinar de *Guadua Angustifolia* Kunth tiene un desempeño térmico óptimo, considerando que se logró con este material una diferencia de temperatura entre ambas superficies de 8°C destacando su capacidad aislante, y una baja densidad promedio de 336,74 Kg/m³, resultando beneficioso para ser implementado como material en el ámbito de la construcción. Esta información permite determinar que el laminado de hoja caulinar es 2 veces mejor aislante y 1,96 veces menos denso que el laminado de esterilla, 4 veces mejor aislante y 3,96 veces menos denso que el fibrocemento, y 1,38 menos aislante, pero 24,85 veces más denso que el poliestireno expandido. Con respecto a este último material, se demuestra que, a pesar de tener una diferencia en la densidad tan notoria, la capacidad aislante del laminado de hoja caulinar es sumamente efectiva.

De los análisis de la conductividad térmica, se concluye que el coeficiente k de este nuevo material puede resultar competitivo frente a los valores de materiales con baja conductividad como el poliestireno expandido y el laminado de esterilla.

A pesar de que el equipo experimental para identificación de propiedades térmicas de materiales usado en esta investigación no se rige a las normas de evaluación de transferencia de calor, se pudo comprobar que los resultados que arrojan las pruebas realizadas con él, son acordes a la teoría existente de materiales a los cuales sí se les determinó su desempeño térmico con pruebas normatizadas, por tanto, el equipo experimental es un instrumento útil para lograr un acercamiento al verdadero comportamiento térmico de nuevos materiales.

Otro aspecto por destacar es que, al usar el desecho orgánico de la guadua como materia prima, se puede generar un impacto positivo en el medio ambiente y a su vez se logra evidenciar su efectividad para crear un material nuevo con un desempeño favorecedor térmicamente. Caso contrario a lo que sucede con el poliestireno expandido y algunos tipos de fibrocemento, los cuales generan un impacto ambiental negativo desde su extracción hasta que se convierten en desechos.

Se confirma con este estudio que es posible la transformación de desechos orgánicos y agrícolas en materiales aprovechables en la construcción conociendo los beneficios que estos pueden brindar con respecto a su comportamiento térmico y en términos medioambientales.

El panel laminado de hoja caulinar resulta ser un material ligero y agradable estéticamente en caso de querer ser usado como un acabado o revestimiento. Se encuentra también muy favorable el hecho de que la superficie lisa de la hoja caulinar sea casi impermeable, lo que se traduce en que no sea fácilmente afectada por la humedad y hongos.

De la elaboración de este panel, se destaca el rescatar técnicas manuales y artesanales para la transformación de este material, al igual que el uso de un material local, evocando la construcción tradicional colombiana ya que la guadua tiene una trayectoria importante en términos constructivos en el país.

El manejo que se le da actualmente a la hoja caulinar es de carácter artesanal, estando incluso normatizada su transformación, aunque este sector siga siendo muy reducido. Sin embargo, el material a pesar de su gran potencial y amplia disponibilidad en Colombia, carece de estudios previos científicos que lo caractericen en distintos ámbitos. Se considera entonces esta investigación como base para el futuro desarrollo tecnológico del laminado de hoja caulinar y la activación de una nueva industria.

10.1. Recomendaciones

Posibles investigaciones pueden resultar de factores que no fueron evaluados para la presente investigación, como lo es el ciclo de vida, las emisiones de CO₂ y los costos de producción del laminado de hoja caulinar. Igualmente, el análisis de humedad y resistencia estructural del material.

Es indispensable hallar el coeficiente de conductividad térmica y realizar pruebas de transferencia de calor bajo la norma "ASTM C177: Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties", y así poder realizar una comparación más fiable con otros materiales.

Se debería complementar la investigación teórico- experimental con pruebas de campo al material y simulaciones, probando su efectividad como envolvente aplicándolo a prototipos de pequeña escala.

Otra investigación puede surgir al integrar el laminado de hoja caulinar al sistema constructivo de bahareque o sistemas livianos, al igual que aplicándole diferentes acabados como revoque y estuco, y también adicionando más capas de láminas al panel, para posteriormente realizar pruebas que evalúen su comportamiento térmico.

Se podría pensar igualmente en el uso de este material con fines diferentes al de aislante térmico, como lo son acabados y construcción de muebles.

Se sugiere realizar paneles laminados de hoja caulinar retirando la pubescencia de las superficies para comparar el desempeño térmico de los paneles a los que no se le retiró dicha pubescencia. También, se recomienda realizar investigaciones con hojas caulinares de diferentes especies de bambú, e igualmente explorar otros adhesivos, con el fin de determinar si esto influye en el comportamiento térmico del material.

11. Bibliografía

- Acevedo Agudelo, H., Vásquez Hernández, A., & Ramírez Cardona, D. A. (2012). Sostenibilidad: Actualidad y necesidad en el sector de la construcción en Colombia. *Bdigital Revistas UNAL*.
- Acosta, D. (1986). Arquitectura y construcción sostenibles. *DEARQ Revista de Arquitectura de La Universidad de Los Andes*, 1982, 14–24.
- Aguilar, L. (2017). *Manual para la Construcción con Bambú*.
- Allenby, B. (2006). Macroethical systems and sustainability science. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-006-0003-8>
- Amorim Isolamientos. (n.d.). *Corkcoco, Aislante termoacústico*.
- Arenas Cabello, F. J. (n.d.). *Los materiales de construcción y el medio ambiente*.
- Argentina Green Building Council. (2019). Arquitectura sustentable: volver al origen. *Revista Cabal*.
- Argos. (2018). *Tendencias de construcción sostenible en Colombia*.
- Arteasánías del Quindío. (n.d.). *Caulinarte*.
- Askeland, D. R., Fular, P. P., & Wright, W. J. (2011). Ciencia e ingeniería de los materiales. In *Zeitschrift fur Naturforschung - Section B Journal of Chemical Sciences* (Sexta edic). <https://oswaldoweb.files.wordpress.com/2016/04/ciencia-e-ingenieria-de-materiales-sexta-edicic3b3n.pdf>
- Bermudez Vargas, G. (2016). *El puente de guadua según 'Fabric Architecture Magazine'*. <https://bambusecologico.blogspot.com/2016/07/el-puente-de-gadua-segun-fabric.html>
- Bioark Arquitectura Biopasiva. (2011). *Aislamiento térmico y huella ecológica*.
- Blender, M. (2015). El Confort Térmico. *Portal de Eficiencia Energética y Sostenibilidad En Arquitectura y Edificación*. <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/>
- Botánica, G. (2016). *Fimbria*. <https://glosarios.servidor-alicante.com/botanica/fimbria>
- Broz, D., Sosa, H., Camargo, J. C., Bulman, C., Korth, S., & Gutierrez, I. (2020). *Bambú: ¿una alternativa productiva?* <https://www.argentinaforestal.com/2020/03/28/bambu-una-alternativa-productiva/>
- Brundtland, G. H. (1987). Informe de la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y el Desarrollo: Nuestro futuro común. *Documentos de Las Naciones, Recolección de Un*
- Cadena, C., & Bula, A. (2002). Estudio de la variación en la conductividad térmica de la cascarilla de arroz aglomerada con fibras vegetales. *Ingeniería y Desarrollo: Revista de La División de Ingeniería de La Universidad Del Norte*, 12, 1–9.
- Castilla, M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L.

- (2010). Técnicas de control del confort en edificios. *RIAI - Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*, 7(3), 5–24.
<https://doi.org/10.4995/RIAI.2010.03.01>
- Çengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa* (R. Del Bosque Alayón (ed.)).
- ChemicalSafetyFacts. (n.d.). *Tolueno*. <https://www.chemicalsafetyfacts.org/es/tolueno/>
- Cinieri, V., & Zamperini, E. (2013). Arquitectura vernácula: memoria y protección. El caso italiano desde el abandono hasta el econocimiento de un nuevo patrimonio. *IBA-BA, ArquiMemória 4 – Encuentro Internacional Sobre Preservación Del Patrimonio Edifi Cado. Segoe UI, Salvador de Bahia., September 2014.*
- Connor, N. (2020). ¿Qué es la resistencia térmica? Resistividad térmica: definición. <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-resistencia-termica-resistividad-termica-definicion/>
- Construmática. (n.d.). *Construcción sostenible: Historia.*
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind. In *Nature*. <https://doi.org/10.1038/415023a>
- de Villanueva Domínguez, L. (2005). Las tres edades de la construcción. *Informes de La Construcción*, 57(498), 41–45.
- Deciduo. (n.d.). *BioDic*. <https://www.biodic.net/palabra/deciduo/#.Xnv3sYhKiHs>
- Definición.DE. (n.d.). *BTU*. <https://definicion.de/btu/>
- Díaz Riveros, C. A. (2014). Evaluación de las fuentes de emisión de CO₂ y energía consumida por los procesos tecnológicos del sistema constructivo industrializado: paneles de fibrocemento. *Ciencia, Tecnología y Cultura*, 11, 30–38.
- DRAE. (n.d.-a). *Ápice*. <https://dle.rae.es/ápice>
- DRAE. (n.d.-b). *Bráctea*. <https://dle.rae.es/bráctea>
- DRAE. (n.d.-c). *Gramíneo*. <https://dle.rae.es/gramíneo>
- EcuRed. (n.d.). *Lignina*. <https://www.ecured.cu/Lignina>
- EDTM. (2021). *SP1065 BTU/Watt Solar Meter*.
<https://www.edtm.com/index.php/sp1065-digital-solar-power-meter>
- Elizondo-Mata, M., gomez Amador, A., Ojeda Sanchez, J. A., & Esparzar López, C. J. (2015). *Evaluación térmica de materiales compuestos como aislante térmico para casas habitación en el Estado de Colima a partir de bambú y tierra cruda. November 2016.*
https://www.researchgate.net/publication/282577276_Evaluacion_termica_de_materiales_compuestos_como_aislante_termico_para_casas_habitacion_en_el_estado_de_Colima_a_partir_de_bambu_y_tierra_cruda
- Espinosa Pérez, D. C. (2004). *La cadena de la guadua en Colombia*. 2003(35), 28.
- Eurosur. (n.d.). *Industrialización, medio ambiente, y dependencia.*
- FAO. (n.d.). *Materiales termoaislantes, características técnicas y criterios de selección*.
<https://www.fao.org/3/y5013s/y5013s07.htm>

- FAO. (1964). *Las industrias de Paneles a Base de Madera*.
<http://www.fao.org/3/30164s/30164s0c.htm>
- Flores Méndez, E., Correa Giraldo, V. M., Queiros, M., & Ordóñez Candelaria, V. R. (2011). *Estado Actual de la Construcción con Bambú*. 55, 1–18.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=61851598002>
- García Ochoa, J., Quito Rodríguez, J., & Pedromo Moreno, J. (2020). *Análisis de la huella de carbono en la construcción y su impacto sobre el ambiente*.
- Gauzin-Müller, D., Favet, N., & Maes, P. (2002). *Arquitectura Ecológica* (G. Gili (ed.)). Editorial Gustavo Gili.
- Giraldo Castañeda, W. (2013). *Optimización del confort térmico en clima ecuatorial con tecnologías pasivas en fachadas. El caso de las viviendas de interés social en Cali*. Universidad Nacional de la Plata.
- Global Footprint Network. (2019). *Open Data Platform*.
<https://data.footprintnetwork.org/#/>
- González, J. F. (n.d.). *Fibro cemento: rentable sostenibilidad*.
<https://www.imcyc.com/ct2009/feb09/sustentabilidad.htm>
- González Vásquez, M. R., & Molina-Prieto, L. F. (2018). Envolvente arquitectónica: un espacio para la sostenibilidad. *Arkitekturax Visión FUA*, 1(1), 49–61.
<https://doi.org/10.29097/26191709.201>
- González Yebra, Ó. (2014). *Caracterización del bambú Guadua (“Guadua Angustifolia”) para el diseño e industrialización en España* (Print book). Editorial Universidad de Almería D.L. 2014.
- GreenFacts. (n.d.). *Biocapacidad*.
- Guerrero, A. (2015). Architectural Eco-Envelopes in Higher Education Institutional Buildings of the City of Maracaibo. *Agustiniana Revista Academica*, 9, 91–106.
- Gutiérrez-M.D., J., Cadena, C., & Bula Silvera, A. J. (2014). Thermal insulation produced from rice husk agglomerated using starch produced by *saccharomyces cerevisiae*. *Dyna*, 81(184), 138. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37679>
- Herrera Franco, P. J., & Valadez Gonzalez, A. (2008). *Properties and Performance of Natural-Fibre Composites*. Elsevier.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1533/9781845694593.3.375>
- Hidalgo López, O. (1974). *Bambú, su cultivo y aplicaciones en: fabricación de papel construcción, ingeniería y artesanía* (E. T. Colombianos (ed.); 1974th ed.).
<https://repository.agrosavia.co/handle/20.500.12324/33244>
- Hidalgo López, O. (1978). *Nuevas técnicas de construcción con bambú*. Estudios Técnicos Colombianos. <https://books.google.com.co/books?id=EP9jAAAAMAAJ>
- Iberdrola. (n.d.). *¿Cuáles son las consecuencias de la sobreexplotación de los recursos naturales?*
- ICONTEC. (2019). *Norma Técnica Colombiana: Compendio Guadua* (ICONTEC (ed.)).

- Leff, E. (1994). *Ecología y capital: racionalidad ambiental, democracia participativa y desarrollo sustentable*. January 1994.
- Londono, X. (1990). Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambúes de Colombia (Poaceae: Bambusoideae) Aspectos sobre la distribución y la ecología de los bambues de Colombia (Poaceae: Bambusoideae). *Caldasia*, 16(77), 139–153.
- Londoño, X. (2001). La Guadua un bambú importante de América. In *Memorias primer Seminario Bamboo 2001*.
- Londoño, X. (2002). *Distribución, morfología, taxonomía, anatomía, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo* (Issue 5).
- Londoño, X. (2011). *El bambú en Colombia*. Biotecnología Vegetal Vol. 11. <https://revista.ibp.co.cu/index.php/BV/article/view/485/882>
- Londoño, X. (2012). Una visión integradora del recurso guadua. In *I Seminario Internacional de Innovación en Materiales e Ingeniería Civil*.
- Londoño, X. (2013). Dos nuevas especies de guadua para el Perú (Poaceae: Bambusoideae: Bambuseae: Guaduinae). *Journal of the Botanical Research Institute of Texa*, 7(1), 145–153.
- Loyola Lavin, F. E. (2012). Desarrollo de aislantes térmicos empleando rastrojos de maíz para la construcción de viviendas. *Universidad Del Bío-Bío Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Mecánica*.
- Meadows, D. H., Meadows, D. L., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *Los límites del crecimiento: informe al Club de Roma sobre el predicamento de la Humanidad*. 1972, 1–3.
- Minambiente. (2008). Resolución 909 de 2008. *Ideam*.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente*. 406. https://www.culturarecreacionydeporte.gov.co/sites/default/files/reglamento_construccion_sismo_resistente.pdf
- Molina Padilla, D., & Gómez Fernández, M. C. (2018). *Caracterización de las propiedades térmicas del bahareque embutido en tierra con esterilla de guadua*. Universidad del Valle.
- Mosquera Casierra, I. F., & Valencia Paz, J. S. (2014). *Análisis de transferencia de calor de un material para aislamiento térmico de bebidas refrigeradas en envases o en empaques cilíndricos*. [Universidad Autónoma de Occidente]. <https://doi.org/10.4324/9781315853178>
- Muñoz, Deyanira & Cabrera, G. (2007). El fique como aislante térmico. *Revista Biotecnología II*, 5, 9–16.
- Naciones Unidas. (2012). *Objetivos del desarrollo sostenible (ODS)*.
- Ochoa Ávila, M. B., Soa, M. V., & Aballe, Y. Q. (2007). Innovación, tecnología y gestión tecnológica. *Acimed*, 16(4).

- Olgyay, V. (1998). *Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas* (Illustrate). Gustavo Gili Diseño.
- Peñaranda, L. V., Montenegro, S. P., & Giraldo, P. A. (2018). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), 141–150. <https://doi.org/10.22490/21456453.2040>
- Pizarreño. (n.d.). *Eterplac ESPECIFICACIONES TÉCNICAS*.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2012). Resumen para responsables de políticas. *Geo* 5, 22.
- Quimicas. (n.d.). *Materiales porosos*.
- Quindío, A. (n.d.). *Licorera bandeja*. http://artesaniasquindio.com/producto-detalles-id-349-nombre-licorera_bandeja.htm
- Ramírez, A. (2009). La Construcción Sostenible. *Microelectronics Journal*, 40(2), 4.
- Residuos Profesional. (n.d.). *El potencial de los residuos orgánicos como materiales de construcción*.
- Rivera, Y. (2018). *Bahareque, una técnica constructiva sismoresistente en Colombia*. <https://www.archdaily.co/co/892994/bahareque-una-tecnica-constructiva-sismoresistente-en-colombia>
- Rodríguez, E. C., & Fernández, V. L. (2016). Characterization of Agroindustrial Residues With a View To Its Exploitation. *Centro Azúcar*, 43, 27–35.
- Ruta4. (2016). *La Casa Ensamble Chacarrá*. <https://www.archdaily.co/co/766057/la-casa-ensamble-chacarra-la-arquitectura-como-un-gesto-de-reparacion>
- S.N. (2017). *CUTECMA*. <http://cutecma.es/wordpress/la-huella-de-co2-de-los-materiales-de-construccion/>
- Salas Delgado, E., & Avellaneda, J. (2008). Actualidad y futuro de la arquitectura de bambú en Colombia Simon Vélez : Símbolo y búsqueda de lo primitivo [Universitat Politècnica de Catalunya]. In *TDX (Tesis Doctorals en Xarxa)*. <https://www.tdx.cat/handle/10803/6130#page=1>
- Samper, M. D., Rico, M. I., Ferrandiz, S., & López, J. (2008). Reducción y caracterización del residuo de poliestireno expandido. *I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos*, 1–8. <http://www.redisa.uji.es/artSim2008/tratamiento/A27.pdf>
- Sánchez, E., Kulsum, T., & Awe, A. Y. (2007). *Prioridades ambientales para la reducción de la pobreza en Colombia*. (MAYOL edic). Banco Mundial.
- Sánchez Medrano, M. T., Espuna Mújica, J. A., & Roux Gutierrez, R. S. (2016). El bambú como elemento estructural: la especie *Guadua Amplexifolia*. *Nova Scientia*, 8(17). <https://doi.org/10.21640/ns.v8i17.451>
- Semana Sostenible. (2020). *El 78% de los hogares colombianos no recicla*.
- Significados. (2017). *Conductividad térmica*. <https://www.significados.com/conductividad-termica/>

- Silva Flórez, H. F. (2019). *Caracterización térmica de envolventes arquitectónicas en esterilla laminada de guadua*. Universidad del Valle.
- Sísmica, A. colombiana de ingeniería. (2002). *Manual de evaluación , rehabilitación y refuerzo de viviendas de bahareques tradicionales construídas con anterioridad a la vigencia del decreto 052 de 2002*.
<https://www.desenredando.org/public/libros/2005/cersrv/mre-Bahareque.pdf>
- Sociedad Colombiana del bambú. (n.d.). *Investigaciones*. <http://bambuguadua.org/>
- Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., & Ludwig, C. (2015). The trajectory of the anthropocene: The great acceleration. In *Anthropocene Review*.
<https://doi.org/10.1177/2053019614564785>
- Takeuchi, C. (2004). *Comportamiento estructural de la guadua*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- The free dictionary. (n.d.). *Híspido*.
- Tipler, P. A., & Mosca, G. (n.d.). *Physics for Scientists and Engineers, 6th Edition* (W. H. Freeman (ed.)).
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensene, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polsky, C., Pulsipher, A., & Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Unidas, N. (1992). *Convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático*. 62301.
- Velásquez Restrepo, S. M., Peaéz Arroyave, G. J., & Giraldo Vásquez, D. (2016). Uso de fibras vegetales en materiales compuestos de matriz polimérica : una revisión con miras a su aplicación en el diseño de nuevos productos Use of vegetable fibers in polymer matrix composites : a review. *SENA Centro Nacional de Asistencia Técnica a La Industria*, 77–86.
- Vilches, A., Gil Pérez, D., Toscano, J. C., & Macías, O. (2009). Crecimiento económico y sostenibilidad. *OEI*.
- Villa, K., Echavarría, C., & Blessent, D. (2019). Wood walls insulated with coconut fiber. *DYNA (Colombia)*, 86(210), 333–337.
<https://doi.org/10.15446/dyna.v86n210.73685>
- Wikipedia. (n.d.). *Oriented Strand Board*.
- Wikipedia. (2008). *Hectárea global*. https://es.wikipedia.org/wiki/Hectárea_global
- Wikipedia. (2012). *Huella de carbono*. https://es.wikipedia.org/wiki/Huella_de_carbono
- Wikipedia. (2018). *Huella ecológica*. https://es.wikipedia.org/wiki/Huella_ecológica
- World Green Building Council. (2018). *Nuevo Informe de Tendencias Globales Construcción Sostenible*. 1–3.