

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**“EFECTOS DEL INTEMPERISMO SOBRE
LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS
DEL TALLO DE BAMBÚ *Guadua*
angustifolia KUNTH PROVENIENTE DE
CAJAMARCA, PERÚ”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL

ANGELA MOLINA LOVATÓN

LIMA - PERÚ

2020

**La UNALM es titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24 – Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES

**“EFECTOS DEL INTEMPERISMO SOBRE LAS PROPIEDADES
FÍSICO-MECÁNICAS DEL TALLO DE BAMBÚ *Guadua
angustifolia* KUNTH PROVENIENTE DE CAJAMARCA, PERÚ”**

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERA FORESTAL

ANGELA MOLINA LOVATÓN

Sustentada y aprobada ante el siguiente jurado:

.....
Ing. Manuel Chavesta Custodio, Mg. Sc.
Presidente

.....
Ing. Milciades Leonidas Miguel Castro, Mg. Sc.
Miembro

.....
Mg. Sc. Graciela Egoavil Cueva-Gálvez
Miembro

Ing. Héctor Enrique Gonzáles Mora PhD.
Asesor

Ing. Moisés Pascual Acevedo Mallque Mg. Sc.
Coasesor

DEDICATORIA

Con amor y orgullo dedico este trabajo:

*A mis padres Percy y Ayda por su amor y apoyo incondicional,
dándome siempre ese impulso y motivación tan necesarios.*

*A esa persona que estuvo a mi lado en todo momento,
gracias por darme esa fuerza en los momentos realmente importantes.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento

A mi asesor PhD. Héctor Enrique Gonzáles Mora por darme la oportunidad de participar en este proyecto y guiar con gran profesionalismo el desarrollo de la investigación. Le agradezco el tiempo invertido, la paciencia y los consejos impartidos.

A mi coasesor Mg. Sc. Moisés Pascual Acevedo Mallque; por acompañar el desarrollo de la tesis con sus consejos y paciencia.

Al FONDECYT-CONCYTEC, programa de Ciencia Activa, del convenio N° 174-2015 “Circulo de Investigación para el Desarrollo de la Cadena de Valor del Bambú para el Desarrollo Científico Tecnológico” por el apoyo brindado; así mismo, a mi alma mater la Universidad Nacional Agraria La Molina y a mi Facultad Ciencias Forestales por ser parte de la investigación.

A Teresa Huamán y Jhonaly Marchand, por su amistad durante todos estos años, su cariño y apoyo siempre.

A los amigos que me acompañaron durante el desarrollo de la tesis, Liz López, Gabriela Mucha, Juan Pablo Meléndez, Felipe Palma, Juan Carlos Mejía y Marcos Panduro, que me apoyaron de una u otra manera, gracias por todo.

ÍNDICE GENERAL

| | | |
|------|--|----|
| I. | INTRODUCCIÓN | 1 |
| II. | REVISIÓN DE LITERATURA..... | 3 |
| 1. | BAMBÚ <i>Guadua angustifolia</i> KUNTH | 3 |
| 1.1. | GENERALIDADES..... | 3 |
| 1.2. | DISTRIBUCIÓN GEOGRÁFICA..... | 4 |
| 1.3. | TAXONOMÍA | 7 |
| 1.4. | MORFOLOGÍA DE LA GUADUA | 9 |
| 1.5. | CARACTERÍSTICAS ANATÓMICAS | 12 |
| 1.6. | PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS..... | 17 |
| 1.7. | PRINCIPALES USOS | 23 |
| 1.8. | PRINCIPALES AGENTES DE DETERIORO..... | 28 |
| 2. | INTEMPERISMO Y EFECTOS SOBRE EL BAMBÚ | 29 |
| 2.1. | EFECTO DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DEL LUGAR DE EXPOSICIÓN | 30 |
| 2.2. | FACTORES QUE INFLUYEN DURANTE EL INTEMPERISMO | 31 |
| 2.3. | EFECTO DEL INTEMPERISMO SOBRE LAS PROPIEDADES DEL BAMBÚ | 35 |
| III. | MATERIALES Y MÉTODOS | 39 |
| 1. | LUGAR DE COLECCIÓN DE MUESTRAS | 39 |
| 2. | LUGAR DE EJECUCIÓN | 42 |
| 3. | MATERIALES Y EQUIPOS..... | 43 |
| 3.1. | MATERIA PRIMA | 43 |
| 3.2. | EQUIPOS Y HERRAMIENTAS..... | 43 |
| 4. | MÉTODOS Y PROCEDIMIENTOS..... | 45 |
| 4.1. | IDENTIFICACIÓN Y COLECTA DE TALLO O CULMOS..... | 46 |
| 4.2. | CODIFICACIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE PROBETAS..... | 46 |
| 4.3. | DIMENSIONAMIENTO Y CORTE DE PROBETAS | 48 |
| 4.4. | ENSAYO DE INTEMPERISMO | 49 |
| 4.5. | EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO MECÁNICAS..... | 53 |
| 4.5. | EVALUACIÓN MICROSCÓPICA SEM: SCANNER ELECTRONIC MICROSCOPY..... | 62 |
| 5. | DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO..... | 63 |
| IV. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 65 |
| 1. | CARACTERÍSTICAS FÍSICAS..... | 65 |
| 1.1. | VARIACIÓN DEL COLOR | 65 |
| 1.2. | CONTENIDO DE HUMEDAD..... | 69 |

| | |
|---------------------------------------|-----|
| 1.3. DENSIDAD SECA AL AIRE..... | 73 |
| 2. PROPIEDADES MECÁNICAS. | 77 |
| 2.1. COMPRESIÓN PARALELA. | 77 |
| 2.2. FLEXIÓN ESTÁTICA | 84 |
| 2.3. TENSIÓN..... | 88 |
| 3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA..... | 93 |
| V. CONCLUSIONES | 97 |
| VI. RECOMENDACIONES..... | 98 |
| VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 99 |
| VIII. ANEXOS..... | 112 |

Índice de tablas

Página

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Condiciones de sitio óptimas para el bambú. | 7 |
| Tabla 2: Género y número de especies de bambú en el Perú..... | 8 |
| Tabla 3: Distribución porcentual de tejidos en el culmo de <i>G. angustifolia</i> | 14 |
| Tabla 4: Datos biométricos de las fibras de <i>Guadua angustifolia</i> Kunth. | 16 |
| Tabla 5: Densidad seca del culmo de la <i>Guadua angustifolia</i> | 18 |
| Tabla 6: Resistencia máxima (RM) y módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela de <i>G. angustifolia</i> | 19 |
| Tabla 7: Resistencia máxima (RM) en compresión paralela a la fibra de <i>G. angustifolia</i> | 20 |
| Tabla 8: Resistencia máxima (RM) y módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela a la fibra de <i>G. angustifolia</i> | 20 |
| Tabla 9: Resistencia máxima (RM) en compresión paralela de <i>G. angustifolia</i> de diversos autores. | 21 |
| Tabla 10: Módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) en flexión de <i>G. angustifolia</i> | 22 |
| Tabla 11: Valores de flexión estática a escala natural en <i>G. angustifolia</i> | 22 |
| Tabla 12: Módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) en tensión de <i>G. angustifolia</i> | 23 |
| Tabla 13: Módulo de ruptura (MOR) en tensión de <i>G. angustifolia</i> , según otros autores..... | 23 |
| Tabla 14: Durabilidad del bambú en diferentes condiciones..... | 29 |
| Tabla 15: Tamaño de muestras y distribución de probetas para ensayos físico-mecánicos. | 47 |
| Tabla 16: Distribución y número probetas para los ensayos físicos y mecánicos. | 50 |
| Tabla 17: Valores climatológicos del 2017, para La Molina - Lima. | 52 |
| Tabla 18: Valores de irradiación UV para Lima (La Molina). | 52 |
| Tabla 19: Codificación de las probetas..... | 54 |
| Tabla 20: Fechas de evaluación de las propiedades físicas durante el ensayo de intemperismo. | 54 |
| Tabla 21: Diseño experimental de los tratamientos empleados en el análisis estadístico de las propiedades físico-mecánicas en el tallo de bambú..... | 64 |
| Tabla 22: Resultados promedio y desviaciones estándares de las variaciones de color de las probetas de <i>G. angustifolia</i> | 66 |
| Tabla 23: Análisis de variancia de los resultados de color de las probetas de <i>G. angustifolia</i> | 66 |
| Tabla 24: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para variación de color en probetas de <i>G. angustifolia</i> | 67 |
| Tabla 25: Resultados promedio y desviaciones estándar del contenido de humedad. | 71 |
| Tabla 26: Análisis de variancia de los resultados de contenido de humedad. | 71 |
| Tabla 27: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para el contenido de humedad. | 72 |
| Tabla 28: Resultados promedio y desviaciones estándar de densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo. | 74 |
| Tabla 29: Análisis de variancia de los resultados de densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo. | 74 |
| Tabla 30: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo. | 75 |
| Tabla 31: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de compresión paralela. | 77 |
| Tabla 32: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de compresión paralela. | 78 |
| Tabla 33: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de compresión paralela. | 78 |
| Tabla 34: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de flexión estática de bambú. | 84 |
| Tabla 35: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de flexión estática. | 84 |
| Tabla 36: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de flexión estática. | 85 |
| Tabla 37: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de tensión..... | 88 |
| Tabla 38: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de tensión..... | 88 |
| Tabla 39: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de tensión..... | 89 |

Índice de figuras

| | Pagina |
|--|--------|
| Figura 1: Distribución natural del bambú a nivel mundial. | 4 |
| Figura 2: Distribución natural del bambú en Perú. | 5 |
| Figura 3: Zonas de producción de bambú en Perú. | 6 |
| Figura 4: Partes de la guadua. | 11 |
| Figura 5: Variación de fracción volumétrica de las fibras en el espesor del culmo de bambú <i>Guadua angustifolia</i> | 13 |
| Figura 6: Estructura anatómica del espesor total a 20X de la zona basal. | 14 |
| Figura 7: Haz vascular de <i>Guadua angustifolia</i> | 15 |
| Figura 8: Microestructura de las fibras. a) Fibra de madera b) Fibra de bambú. | 16 |
| Figura 9: Comparación de resistencia máxima (RM) a la compresión paralela en culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia. | 21 |
| Figura 10: Uso integral del bambú. | 24 |
| Figura 11: Andamiaje de bambú en la ciudad de Kowloon, Hong Kong. | 27 |
| Figura 12: Ángulos de exposición durante el intemperismo. | 34 |
| Figura 13: Representación del sistema CIE L*a*b* o CIELAB. | 36 |
| Figura 14: Ecuaciones que representan el sistema CIE LAB. | 37 |
| Figura 15: Imagen aérea de lugar de colección y CP La Florida, Cajamarca. | 39 |
| Figura 16: Mapa de ubicación de La Florida - San Miguel – Cajamarca. | 41 |
| Figura 17: Ubicación de la estación meteorológica Von Humboldt – La Molina SENAMHI. | 42 |
| Figura 18: Diagrama de flujo de la metodología a seguir para el presente estudio. | 45 |
| Figura 19: Cañas de <i>G. angustifolia</i> recolectadas en La Florida, Cajamarca. | 46 |
| Figura 20: Esquema de ubicación de probetas en el tallo. | 47 |
| Figura 21: Uso de ingletadora telescópica para elaboración de probetas. | 48 |
| Figura 22: Elaboración de probetas para el ensayo de tensión. | 48 |
| Figura 23: Probetas para los ensayos físico-mecánicos. | 49 |
| Figura 24: Ángulos de exposición de las probetas, en el lugar de ejecución. | 50 |
| Figura 25: Acondicionamiento de mesas y caballetes para el ensayo de intemperismo. | 51 |
| Figura 26: Datos climáticos de La Molina del 05 de junio al 04 de diciembre del 2017. | 53 |
| Figura 27: Evaluación periódica de las probetas durante el periodo de intemperismo. | 55 |
| Figura 28: Probetas durante prueba de intemperismo (168 días = 20 de Nov.) | 57 |
| Figura 29: Ensayo de compresión paralela de <i>G. angustifolia</i> | 58 |
| Figura 30: Ensayo de flexión estática de <i>G. angustifolia</i> | 59 |
| Figura 31: Pieza de ensayo de forma de cuña para ensayos de tensión. | 60 |
| Figura 32: Ensayo de tensión de <i>G. angustifolia</i> | 61 |
| Figura 33: Proceso de metalización y microscopia electrónica de muestras de <i>G. angustifolia</i> | 63 |
| Figura 34: Valores de L* de las probetas de bambú durante el intemperismo. | 65 |
| Figura 35: Variación de color de las probetas de bambú durante el periodo de intemperismo. | 68 |
| Figura 36: Variación del color de las probetas de bambú al final del intemperismo. | 68 |
| Figura 37: Probetas expuestas a intemperismo que presentan ataque de hongos e insectos (1), grietas (2). | 69 |
| Figura 38: Variación del contenido de humedad durante el intemperismo según el ángulo de exposición y zona del tallo. | 70 |
| Figura 39: Variación del contenido de humedad durante el intemperismo según el ángulo de exposición y presencia del nudo. | 70 |
| Figura 40: Contenido de humedad de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según zona del tallo. | 72 |
| Figura 41: Contenido de humedad luego de las probetas de seis meses de intemperismo en La Molina, según presencia de nudo. | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 42: Densidad seca al aire de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según zona del tallo. | 75 |
| Figura 43: Densidad seca al aire de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según presencia de nudo. | 76 |
| Figura 44: Resistencia máxima ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según zona del tallo. | 80 |
| Figura 45: Resistencia máxima ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según presencia de nudo. | 81 |
| Figura 46: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según zona del tallo. | 82 |
| Figura 47: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según presencia de nudo. | 82 |
| Figura 48: Módulo de ruptura ensayo de flexión de bambú, luego del intemperismo. | 86 |
| Figura 49: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de flexión de bambú, luego del intemperismo. | 87 |
| Figura 50: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona basal y media. | 90 |
| Figura 51: Módulo de ruptura ensayo de tensión de bambú, luego del intemperismo. | 90 |
| Figura 52: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de tensión de bambú, luego del intemperismo. | 91 |
| Figura 53: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona basal ensayadas a tensión. | 93 |
| Figura 54: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona media ensayadas a tensión. | 95 |
| Figura 55: Fotografías SEM de la corteza en corte transversal de <i>Guadua angustifolia</i> a 800 y 1 500X. . | 95 |

Índice de anexos

| | Página |
|--|--------|
| Anexo 1 Datos de los parámetros climáticos en la molina durante el ensayo de intemperismo..... | 112 |
| Anexo 2 Datos para la determinación de la variación de color durante el intemperismo..... | 113 |
| Anexo 3 Fotografías SEM..... | 118 |
| Anexo 4 Datos para la determinación del contenido de humedad y densidad después del intemperismo..... | 119 |
| Anexo 5 Datos para determinar el ensayo de flexión..... | 121 |
| Anexo 6 Datos para determinar el ensayo de compresión paralela..... | 123 |
| Anexo 7 Datos para determinar el ensayo de tensión..... | 126 |
| Anexo 8 Análisis estadístico del cambio de la variación de color después del intemperismo..... | 128 |
| Anexo 9 Análisis estadístico del contenido de humedad después del intemperismo..... | 128 |
| Anexo 10 Análisis estadístico de la densidad después del intemperismo..... | 129 |
| Anexo 11 Análisis estadístico de la resistencia máxima a la flexión después del intemperismo..... | 129 |
| Anexo 12 Análisis estadístico del módulo de elasticidad en flexión después del intemperismo..... | 130 |
| Anexo 13 Análisis estadístico de la resistencia máxima a la compresión paralela a la fibra después del intemperismo..... | 130 |
| Anexo 14 Análisis estadístico del módulo de elasticidad en compresión paralela a la fibra después del intemperismo..... | 131 |
| Anexo 15 Análisis estadístico de la resistencia máxima a tensión después del intemperismo..... | 131 |
| Anexo 16 Análisis estadístico del módulo de elasticidad en tensión después del intemperismo..... | 132 |

RESUMEN

Esta investigación, trata sobre la evaluación del efecto del intemperismo en las propiedades físicas y mecánicas en tallos de bambú *Guadua angustifolia* Kunth, provenientes de la plantación de La Florida, Cajamarca. Las muestras de bambú, fueron sometidas a intemperismo durante seis meses (Junio a Diciembre 2017) en el distrito de La Molina, provincia de Lima, Perú, colocadas en tres ángulos de exposición: 0, 45 y 90 grados. Durante este periodo, las propiedades físicas evaluadas fueron el contenido de humedad y densidad; adicionalmente, se realizaron pruebas de cambio de color. Al finalizar el proceso, se hizo la comparación de las propiedades mecánicas de compresión paralela, flexión estática y tensión, antes y después del periodo de exposición. Se encontró que las condiciones climáticas como: temperatura, radiación y humedad en el distrito de La Molina, Lima – Perú, afectaron significativamente las características del tallo de bambú; variando propiedades como el color, y disminuyendo el módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela y la resistencia máxima (RM) en tensión. Por el contrario; el módulo de ruptura (MOR) en flexión estática, no se observó variación alguna, ni el módulo de elasticidad (MOE) luego del periodo de intemperismo, de igual manera, la resistencia máxima (RM) en compresión paralela, no mostró influencia significativa luego del periodo de exposición. Por otra parte, se puede inferir que la zona media del tallo presentó un mejor comportamiento en cuanto a las propiedades de densidad y tensión en relación a la zona basal.

Palabras claves: intemperismo, propiedades físico-mecánicas, bambú, *Guadua angustifolia*, culmo, Perú.

ABSTRACT

This research aims to assess the effect of intemperism on physical and mechanical properties of bamboo stalks *Guadua angustifolia* Kunth, which came from a plantation located in La Florida, Cajamarca. The bamboo samples were subjected to intemperism for six months (June to December 2017) in the district of La Molina, province of Lima, Peru, placed at three exposure angles: 0, 45 and 90 degrees. During this period, physical properties such as moisture content and density were evaluated; additionally, color change tests were performed. At the end of the process, some mechanical properties like compression parallel to grain, bending and tension were compared before and after the exposure period. It was found that characteristics of bamboo were significantly affected by climatic conditions as: temperature, radiation and humidity at La Molina, Lima – Peru, therefore it was noticed variation in color properties, decreasing the modulus of elasticity (MOE) of compression parallel to grain and maximum resistance (RM) of tension. On the other hand, no variation was observed neither in the modulus of rupture (MOR) of bending nor the modulus of elasticity (MOE) after the intemperism period. Besides the maximum resistance (RM) of compression parallel to grain, showed no significant influence after the exposure period. Moreover, it can be inferred that middle area of the stem presented better behavior in terms of density and tension properties than basal area.

Keywords: intemperism, physical-mechanical properties, bamboo, *Guadua angustifolia*, culm, Peru.

I. INTRODUCCIÓN

La *Guadua angustifolia* Kunth, un bambú leñoso conocido en el Perú como caña Guayaquil, es considerado como el tercer bambú más alto del mundo, llegando a medir de 20 a 30 metros de altura y pertenecer a las 20 mejores especies de bambú de la tierra, debido a que es una planta multiusos (Añazco, 2014).

Entre las ventajas que esta especie tiene son: la alta velocidad de crecimiento, 10 a 21 cm por día, el aprovechamiento o cosecha puede ser a partir de los cuatro años dependiendo del producto y uso final; otra de las ventajas del bambú, es ser un material alternativo con respecto a la madera por sus excelentes propiedades físico-mecánicas y su comprobada utilización en la industria de la construcción, en estructuras, pisos, paneles y aglomerados.

Las plantaciones existentes de bambú (*G. angustifolia*), se encuentran en la zona norte del territorio peruano, específicamente en las regiones de Piura, Tumbes, Cajamarca y Lambayeque, con una superficie total aproximada de 4 000 ha (Sierra exportadora, 2012). Una de las de mayor importancia se encuentra en las plantaciones de La Florida - Cajamarca, donde todavía no se ha determinado la superficie y volumen potencial de extracción (Malleux, 2009).

El bambú actualmente tiene diversidad de usos, el principal uso en el Perú es en la industria de la construcción, donde sus beneficios son diversos en referencia a los materiales convencionales, siendo algunos de ellos; el presentar resistencia a la tensión y compresión similar al acero y hormigón, respectivamente. Entre las aplicaciones de arquitectura, se tiene la Terminal T4 (NAT) del aeropuerto de Barajas (Madrid, España), como uno de los proyectos de construcción más importantes del mundo hecho de bambú, ya que tiene una superficie de 1,2 millones de metros cuadrados (Esteve, 2012). Sin embargo, aún existe falta de información en cuanto al comportamiento del material a los factores del medio donde prestara servicio.

La importancia del presente estudio, es relevante puesto que en el Perú, existe un incremento en el uso de este material con fines estructurales, no obstante, no se tienen valores definidos en cuanto a la disminución de sus propiedades, frente a los distintos factores, como son: la humedad, radiación UV, temperatura, precipitación. Por lo que es importante generar información del estudio de la vida útil de dichas estructuras.

Se analizó el comportamiento de las propiedades físico mecánicas de la *Guadua angustifolia* frente a las condiciones climáticas que se presentan en el distrito de La Molina, región Lima; de esta manera se contribuye aportando información nueva sobre las propiedades del bambú y el efecto del intemperismo, la cual en la actualidad es insuficiente.

Con los resultados obtenidos, se pretende establecer bases para estudios posteriores, en el diseño de estructuras y vida útil de las mismas, con la intención de contribuir al desarrollo del uso del bambú en nuestro país, en la industria de la construcción.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. Bambú *Guadua angustifolia* Kunth

1.1.Generalidades

Díaz, Mendoza e Inga (2017), señalan que en el mundo existen más de 1 100 especies diferentes que comúnmente reciben el nombre de bambú. El género *Guadua* ha estado en discusión a través de los años: Humboldt en 1801 se refirió a la *Guadua* como un bambú que los indígenas llamaban *Guadua*, sin embargo, en 1806 Bompland la clasificó como *Bambusa*, no es hasta 1822 que el británico alemán Karl S. Kunth determinó que constituía un género en sí misma y la identificó como *Guadua angustifolia*, posteriormente en 1971 Mc Clure como un sub género de la *Bambusa* y finalmente Suderstron y Londoño en 1987 la reconocen como género *Guadua*. (Giraldo y Sabogal, 1999).

La *Guadua angustifolia*, nativa de Colombia, es una de las más importantes, gracias a sus propiedades físico-mecánicas y al avance en el estudio silvicultural y estructural que se viene llevando a cabo en este país en los últimos años. Gracias a su rápido crecimiento, puede llegar a tener un incremento en altura de hasta 1,21 metros por día; todas estas cualidades hacen a esta especie especialmente atractiva como cultivo para fines comerciales, ya que puede ser utilizada entre tres y seis años después de sembrada, época en que adquiere su máxima resistencia. (Villegas, 2001)

La *Guadua* es un tallo leñoso extraordinariamente resistente, por la consistencia de sus fibras vegetales y por su forma cilíndrica, pero también sorprendentemente liviana, pues es hueca, con sólo membranas internas que son trabajadas muy fácilmente; la fibrosidad que presenta es extrema y a la vez finísima lo que le confiere una flexibilidad difícilmente igualada con otro material natural y con una fortaleza semejante, al mismo tiempo todas estas características facilitan los trabajos de cortarla, manejarla y adaptarla a un sinnúmero de usos y circunstancias, a lo que también contribuyen sus dimensiones excepcionales. (Villegas, 2001).

1.2. Distribución geográfica

El bambú es una gramínea, de rápido crecimiento, se encuentra en la mayor parte de las regiones tropicales y subtropicales del mundo y en algunas zonas templadas a excepción de Europa, se distribuye entre los trópicos de Cáncer y Capricornio y desde el nivel del mar hasta el límite de las nieves. (Londoño, 1991).

El Bassam, Meier, Gerdes y Korte (2002), presentan de manera global la distribución natural del bambú; la cual se da en la zona tropical (figura 1). La distribución de la subfamilia Bambusoideae, está dividida por regiones: región Asia – Pacífico (63 por ciento), región americana (32 por ciento), región de África y Oceanía (5 por ciento). (Abdul Khalil *et al.*, 2012).



Figura 1: Distribución natural del bambú a nivel mundial.

FUENTE: El Bassam *et al.* 2002.

En América existen 440 especies de bambú, las más importantes del género *Guadua* son 16 especies aproximadamente. El género *Guadua* se encuentra ampliamente distribuida en América Latina, desde la zona central y sur de México hasta Argentina, incluyendo gran parte del Centro, Norte y Sur del continente, áreas que se encuentran entre 22 y 23° de latitud norte hasta los 30° de latitud sur y desde el nivel del mar (costas Pacífico y Atlántico), hasta los 2 200 metros de altura sobre el nivel del mar, preferencialmente en los andes ecuatoriales. Los bambúes generalmente ocupan lugares con condiciones de suelos fértiles, húmedos selváticos y también lugares secos

costeros. (Giraldo y Sabogal, 1999).

La distribución natural de las diferentes especies de bambú, presentes en el Perú se muestra en la figura 2, donde se registra el género *Guadua* como uno de los más ampliamente distribuidos luego del género *Chusquea*. Las especies nativas y exóticas de los bambúes se encuentran ubicadas en las diferentes regiones del Perú como: Ucayali, Madre de Dios, Cusco y Junín, que en su totalidad tienen aproximadamente 39 978 km² de bosque, siendo el género dominante la *Guadua*. Se observa que la *Guadua* se encuentra en regiones como: Cajamarca, Loreto, Ucayali, Madre de Dios, Cusco, Lima. (Perúbambú, 2015).

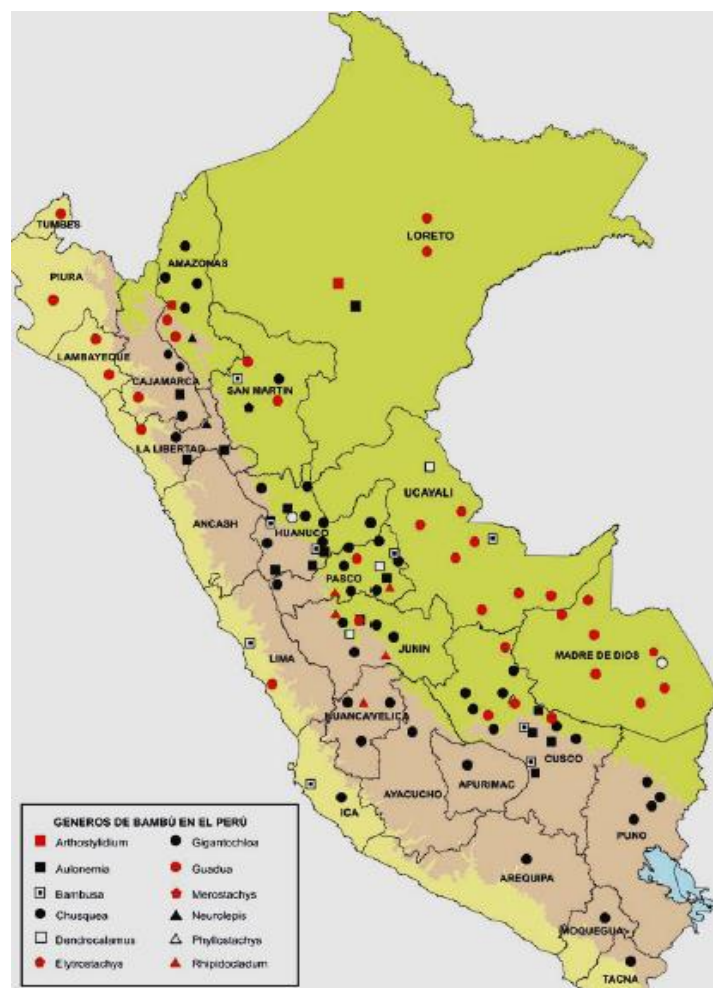


Figura 2: Distribución natural del bambú en Perú.

FUENTE: Perúbambú, 2015.

Asimismo, existen tres zonas de producción a nivel nacional, las cuales se encuentran en el norte del país, en las regiones de Piura, Cajamarca y San Martín como se observa en la figura 3; teniendo una distribución de: 1 000 ha. en Cajamarca y unas 600 has. aproximadamente en Lambayeque y Piura según MINAGRI (2010).

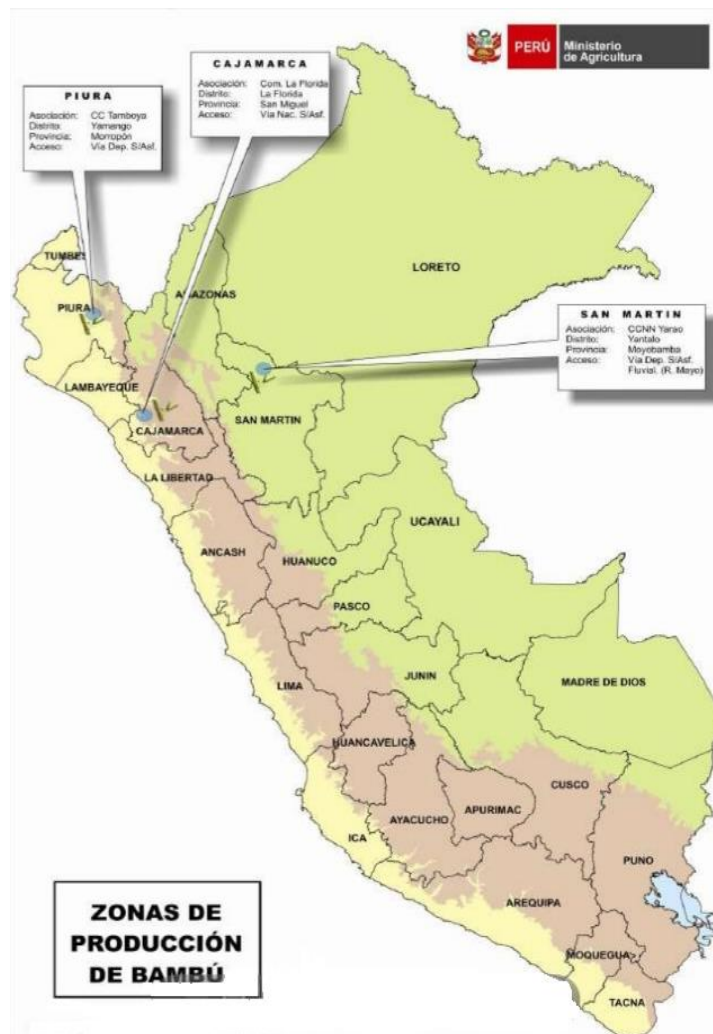


Figura 3: Zonas de producción de bambú en Perú.

FUENTE: MINAGRI, 2010.

Takahashi (2012), manifiesta que en la mayoría de los departamentos del Perú, la situación de las plantaciones de bambú es precaria, debido a que no se le brindó la atención necesaria, desde el punto de vista económico, técnico ni científico. El área natural aún es extensa, pese a las interacciones de deforestación a las que fueron sometidas y se encuentra en la mayoría de los casos alejados de los centros poblados. (Ministerio de Agricultura, 2010).

En el Perú se estima prioritario trazar metas a través del Plan Nacional de Plantaciones de Bambú, 500 000 has. en el ámbito nacional al año 2020 y para ello estructura un programa coordinado de soporte y desarrollo al producto y protección al consumidor a través de la capacitación y concientización con los gobiernos regionales, locales, empresas privadas, asociaciones de productores, entre otros. (Ministerio de Agricultura, 2015).

En la Tabla 1, se presentan las condiciones de sitio óptimas, consideradas por Cortés (2015), para el mejor desarrollo de un bambusal, los parámetros que deben ser considerados son: altitud, temperatura, precipitación, humedad relativa y suelos.

Tabla 1: Condiciones de sitio óptimas para el bambú.

| Parámetros considerados para la instalación de bambú | |
|---|--|
| Altitud (msnm) | 400 – 2 000 |
| Temperatura (°C) | 18 - 22 |
| Precipitación (mm/año) | Superior a 1 300 |
| Humedad relativa (%) | 80 |
| Suelos | Areno/limosos, arcillosos, sueltos, profundos, bien drenados y fértiles. |

FUENTE: Cortés, 2015.

1.3. Taxonomía

Dentro de la Taxonomía, los bambúes pertenecen al grupo de las Gramíneas, gigantes, que son de dos tipos: herbáceos y leñosos, siendo que los de tipo herbáceos se caracterizan por tener rizomas poco desarrollados, culmos herbáceos o ligeramente lignificados, sistemas simples de ramificación, carecen de hojas caulinares y presentan floraciones frecuentes pero no cíclicas a diferencia de los leñosos, que presentan tallos lignificados, hojas caulinares y floraciones esporádicas poco frecuentes. (Takahashi, 2012).

Especies a nivel del mundo

A nivel Mundial, los bambúes representan un grupo diverso, con alrededor de 78 a 120 géneros y 1 450 especies descritas hasta la actualidad, incluyendo bambú leñosos y herbáceos (Judziewicz, Clark, Londoño y Stern, 1999). En Centro y Sudamérica, crecen cerca de 40 géneros y 480 especies de bambúes (Judziewicz *et al.* 1999). Según Clark (1995, 2001), Judziewicz *et al.* (1999), Londoño, Camayo, Riaño y Lopez (2002).

Especies en América Latina

Londoño (2001), menciona que América Latina tiene el 39 por ciento de las especies y el 31 por ciento de los géneros del total de 1 100 especies y 65 géneros de bambúes leñosos conocidos en el mundo. Siendo Brasil el país que tiene mayor diversidad de bambú con 137 especies, seguido por Colombia (70), Venezuela (60), Ecuador (44), Costa Rica (39), México (37) y Perú (37).

La mayoría de las especies útiles en América Latina pertenecen al género *Guadua* y al género asiático *Bambusa*, a pesar de que los géneros *Apoclada*, *Aulonemia*, *Chusquea*,

Elytrostachys, *Otatea* y *Rhipidocladum*, también tienen especies que son utilizadas de diversas maneras, pero principalmente para usos domésticos en zonas rurales. El cultivo de bambú en una escala comercial en América Latina, se limita a la especie *Guadua angustifolia*, *G. amplexifolia*, y la introducción de algunas especies asiáticas como *Bambusa vulgaris*, *B. tuldoides*, *Phyllostachys aurea* y *Dendrocalamus spp*, (Londoño, 2001).

Por debajo de los 1 000 metros de altitud, la diversidad disminuye, registrándose un mayor incremento en el número de individuos en el rango de especie y un predominio de los géneros *Arthrostyidium*, *Guadua* y *Rhipidocladum*. Por encima de los 3 000 metros únicamente se encuentran especies de los géneros *Chusquea*, *Neurolepis* y *Aulonemia*.

Especies de bambú en Perú

En el Perú, se han identificado ocho géneros con más de 40 especies de bambúes nativos, siendo la más común la denominada *Guadua*; y cuatro géneros con alrededor de 15 especies exóticas. Sin embargo, es muy probable que existan mayor número de especies nativas por identificar (PERUBAMBU, 2010). Los departamentos de Pasco y Cusco son los que albergan la mayor diversidad, mientras que los departamentos de Madre de Dios y Amazonas son los que tienen la mayor área cubierta por bambúes. (Londoño, 2010).

Asimismo, existe una diversificación de bambúes entre nativas y exóticas, que presentan una gran capacidad adaptiva a los diferentes ecosistemas, como son lluvias prolongadas, grandes sequías y suelos ácidos poco alcalinos y otros. En la Tabla 2, se presentan los principales géneros y número de especies:

Tabla 2: Género y número de especies de bambú en el Perú.

| Especies nativas | N° especies | Especies exóticas | N° especies |
|--------------------------|--------------------|--------------------------|--------------------|
| <i>Arthrostyidium sp</i> | 2 | <i>Aulonemia sp</i> | 7 |
| <i>Chusquea sp</i> | 22 | <i>Bambusa sp</i> | 5 |
| <i>Elytrostachys sp</i> | 1 | <i>Dendrocalamus sp</i> | 1 |
| <i>Guadua sp</i> | 5 | <i>Phyllostachys sp</i> | 2 |
| <i>Merostachys sp</i> | 1 | <i>Gigantocloa</i> | 1 |
| <i>Neurolepis sp</i> | 2 | | |
| <i>Rhipidocladum</i> | 2 | | |

FUENTE: Ministerio de Agricultura, 2010.

De acuerdo a Díaz, *et al.* (2017) la especie *Guadua angustifolia* Kunth está clasificada de la siguiente manera:

| | |
|--------------|---------------------|
| Reino: | Vegetal |
| División: | Spermatohyta |
| Subdivisión: | Angiosperma |
| Clase: | Monocotiledónea |
| Orden: | Glumiflorales |
| Familia: | Poaceae |
| Subfamilia: | Bambusoideae |
| Tribu: | Bambuseae |
| Subtribu: | Guaduinae |
| Género: | <i>Guadua</i> |
| Especie: | <i>angustifolia</i> |

1.4.Morfología de la guadua

Morfológicamente, en la *Guadua angustifolia* se distinguen las siguientes partes: raíz, tallo, hojas, flores y frutos, sin embargo, es el tallo el que tradicionalmente se ha aprovechado para diferentes aplicaciones. El tallo o culmo se origina en el ápice del rizoma y una vez que brota del suelo lo hace cubierto de hojas caulinares, con el diámetro máximo que tendrá de por vida (Hidalgo, 1974). Dependiendo de las condiciones climáticas, edáficas y de la época de brotes, toma de cuatro a seis meses para desarrollar su altura definitiva. (Arbeláez, 1998).

La Guadua, generalmente alcanza los 20 metros de altura y a veces más de 30; presenta cañas laxamente agrupadas; entre nudos con 20 cm de largo y hasta 13 cm de diametro, glabros y lisos; vainas inferiores del culmo sublongadas o rómbicas, grandes, cubiertas exteriormente de pelos. (Villegas, 2001).

A continuación se presenta las partes de la *Guadua angustifolia* y sus características respectivas. (Jaramillo y Sanclemente, 2003).

- **Rizoma:** Aparte del ser el órgano almacenador de nutrientes es el elemento apto para la propagación asexual, en la *G. angustifolia* es de tipo paquimórfico y es comúnmente conocido como caimán.
- **Ramas:** A diferencia del tallo son macizas, en algunos casos se atrofian y son reemplazadas por unas espinas de 10 a 15 centímetros, sus ramas son muy especiales, crecen casi solitarias sin hojas. Las ramas seleccionadas a partir de la tercera en altura y de la mitad de la rama se utilizan también en la reproducción de la especie.
- **Hojas:** Son de color verde especial, inconfundible en la distancia y en medio de otras plantaciones, sobresale el color de sus hojas para mostrarnos su existencia. Generalmente las hojas tienen la punta muy similar a una lanza, por lo tanto son hojas lanceoladas y lisas.
- **Semilla:** Se asemeja a un grano de arroz (es una gramínea), de coloración blancuzca muy clara en su interior y con un café muy claro en su exterior, es de aproximadamente de cinco a ocho milímetros de largo y tres milímetros de espesor.
- **Flores:** Son muy pequeñas y se asemejan a una orquídea, de color rosáceo o violáceo, se dice que su color depende de la calidad del suelo donde está plantada, es una flor de vida muy corta, dura aproximadamente 48 horas y está ubicada en las partes terminales de las ramas superiores y en el primer tercio de la espiga.
- **Tallo o culmo:** Se caracteriza por tener forma cilíndrica y entrenudos huecos, separados transversalmente por tabiques o nudos que le imparten mayor rigidez, flexibilidad y resistencia. El culmo o tallo está formado por fibras longitudinales que de acuerdo a su edad (juvenil, madura, sobre madura) se lignifican, entregándonos una extraordinaria resistencia.

La figura 4, muestra las partes de la guadua y sus respectivos usos, según Sabogal (2003).

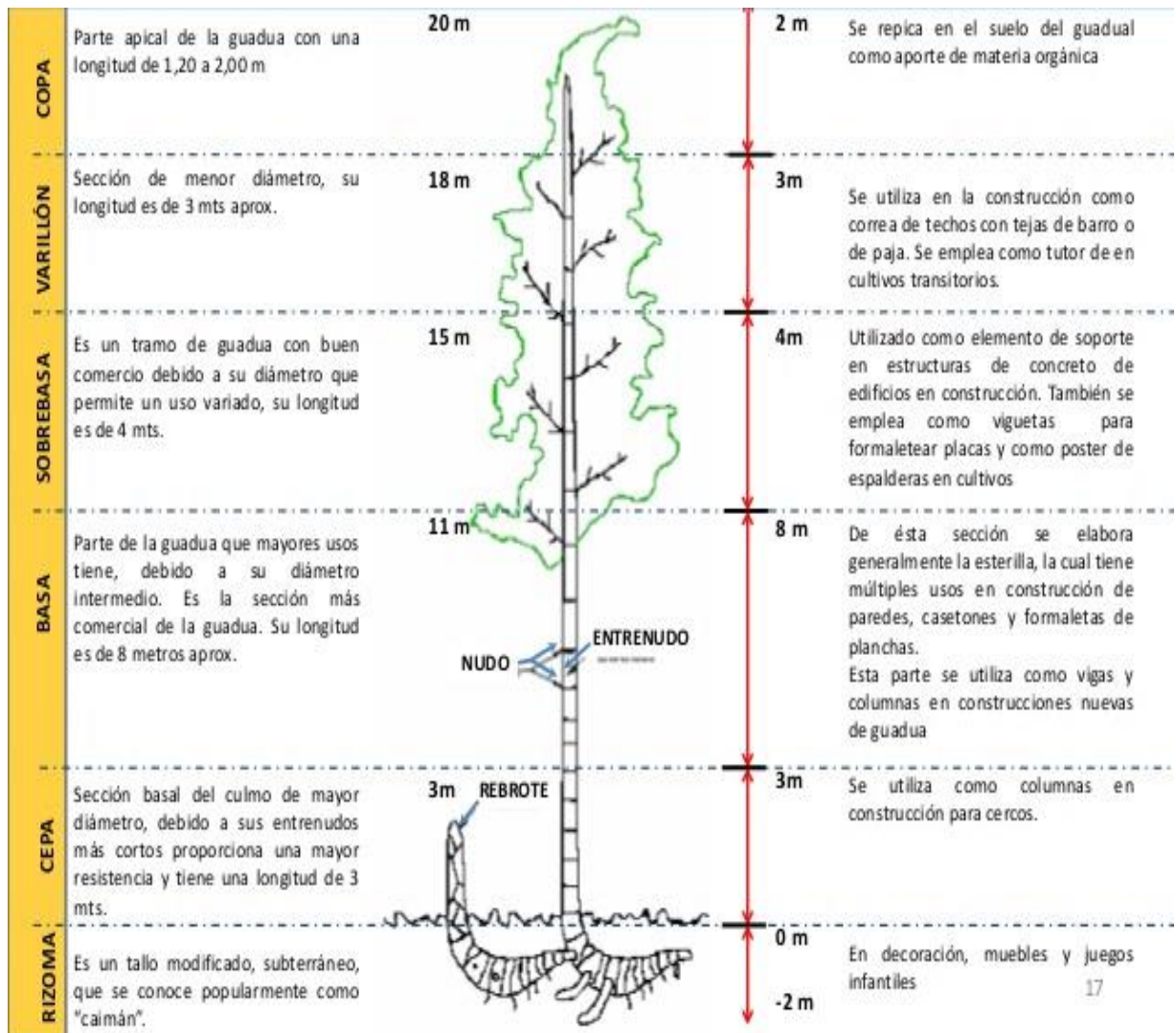


Figura 4: Partes de la guadua.

FUENTE: Sabogal, 2013.

Estructura aérea del Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth):

- **Culmo o tallo:** De aproximadamente 15-20 metros de alto y entre 10-12 centímetros de diámetro. Formado por los entrenudos y nudos. Los nudos se caracterizan por ser blancos; los entrenudos corresponden a la sección de tallo que se encuentra entre cada nudo.
- **Yema:** Se encuentran ubicadas en cada nudo, de forma alternada. Tienen la capacidad de producir ramas o raíces.
- **Hoja caulinar:** Hoja de forma triangular color café, ubicada en cada nudo del tallo. Su función es proteger las yemas y el tallo durante su desarrollo y crecimiento.

- **Ramas:** Crecen de forma alternada a partir de las yemas. Conforman el follaje por medio de sus hojas alargadas y en algunos casos presentan espinas.
- **Inflorescencia:** Esta es muy esporádica en el bambú, por lo que no siempre es posible de apreciar, Produce semillas similares al arroz; sin embargo, tienen poco poder germinativo, por lo que no es la principal forma de reproducción del bambú.

El culmo de esta especie es un cilindro hueco y delgado, dividido en segmentos o internudos separados por diafragmas (nudos), en el tallo o culmo se distinguen tres tercios: basal, medio y apical, cuyos diámetros promedios son respectivamente: 11,5, 11,05 y 5,84 cm. En cuanto a los internudos, llegan a alcanzar diámetros entre 10 y 14 centímetros y alturas comprendidas entre 17 y 23 centímetros. (Hidalgo, 2003).

1.5. Características anatómicas

El conocimiento de las estructuras anatómicas de los materiales biológicos ayuda al entendimiento de sus propiedades mecánicas, por lo que es importante considerar las características anatómicas de la *G. angustifolia*, ya que reflejan el uso final de este material (Londoño, Riaño y Camayo, 2002).

Anatómicamente un bambú está compuesto por: corteza, parénquima, fibras y haces vasculares. La forma, tamaño, número y concentración de haces vasculares varía desde la periferia hasta la parte interna del culmo, como se observa en la Figura 5 (Ghavami y Marinho, 2005), y desde la base del culmo hacia el ápice del mismo (Lozada, 2012).

En la *G. angustifolia* se establecen cuatro zonas en el área de corte transversal del culmo según Londoño *et al.* (2002). Estas son:

- La zona de la periferia: que mide entre 0,67 y 0,77 mm de longitud y está compuesta por haces vasculares inmediatamente adyacentes a la corteza, representa el 4,5 por ciento del espesor de pared.
- La zona de transición: que mide entre 1,23 y 2,55 mm de longitud y corresponde al 10,7 por ciento del grosor de la pared del culmo.
- La zona central o media: que mide entre 4,95 y 16,34 mm de longitud y corresponde al 73,9 por ciento del grosor de la pared del culmo.
- La zona interna: que mide entre 1,3 y 2 mm de longitud y corresponde al

10,8 por ciento del grosor de la pared del culmo.

El porcentaje de fibra crece de la zona interna a la periférica, mientras que el porcentaje de parénquima es mayor en la zona interna que en la periférica. De igual manera, el porcentaje de tejido conductivo crece de la zona periférica a la interna (Liese, 1998). En la Figura 5, se aprecia la distribución de estos elementos en un corte transversal de la zona media, se observa que las fibras se ubican en las zonas oscuras, las cuales rodean al tejido conductivo, a diferencia del parénquima que se ubica en las zonas claras.

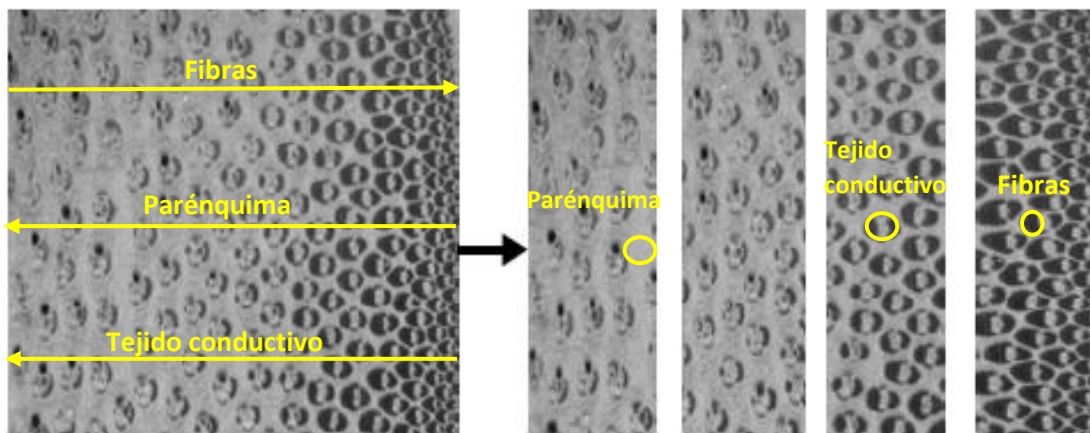


Figura 5: Variación de fracción volumétrica de las fibras en el espesor del culmo de bambú *Guadua angustifolia*.

FUENTE: Ghavami y Marinho, 2005.

La sección transversal del culmo, presenta tres componentes típicos muy bien diferenciados en cuanto a la anatomía, ellos son: la epidermis o corteza exterior, la capa interior de la pared del tallo y el área fibrovascular. Esta última está localizada entre las dos anteriores y allí aparecen células parenquimáticas que constituyen el tejido del tallo, los haces vasculares como tejido conductivo y las fibras. (Londoño, *et al.*, 2002).

La composición de tejidos en un culmo de *Guadua angustifolia* es 40 por ciento fibra, 52 por ciento parénquima y ocho por ciento tejido conductivo, también llamados haces o vasos vasculares (Liese, 1998). El contenido de fibra es más alto en el segmento apical (56 por ciento) que en el segmento medio (26 por ciento) y basal (29 por ciento) (Castaño y Moreno, 2004). Comparativamente con otros bambúes tropicales y subtropicales, esta especie presenta un porcentaje de fibra relativamente alto y un mayor contenido de sílice en la epidermis, lo que explica sus asombrosas propiedades de resistencia y flexibilidad (Lozada, 2012).

En relación a esto, Londoño *et al.* (2002), encontraron que la *Guadua angustifolia* Kunth se encuentra compuesta por un 51 por ciento de tejido de parénquima, un 40 por ciento de fibras y un nueve por ciento de tejido conductivo, siendo estos porcentajes similares a los presentados por Liese (1998). Sin embargo, el porcentaje de fibra puede variar según la zona del tallo o culmo como se muestra en la tabla 3 presentado por Nieto (2008).

Tabla 3: Distribución longitudinal de tejidos en el culmo de *G. angustifolia*.

| Tejido | Segmento del culmo | | |
|------------|--------------------|-----------|------------|
| | Basal (%) | Media (%) | Apical (%) |
| Parénquima | 63 | 64 | 36 |
| Fibras | 29 | 26 | 56 |
| Conductivo | 8 | 10 | 8 |
| Total | 100 | 100 | 100 |

FUENTE: Nieto, 2008.

Osorio, Vélez y Ciro (2007), encontraron que el espesor total de la cepa (zona basal), es mayor en promedio que el de la basa (zona media) a lo largo del culmo o tallo. Además, se puede observar en la figura 6, que el porcentaje de parénquima se incrementa desde la capa externa hacia la interna tanto en la zona basal como en la zona media. Esta distribución de células de parénquima coincide con las reportadas por Liese (1998), en la pared del *Phyllostachys makinoi* y por Londoño *et al.* (2002), en *G. angustifolia* Kunth.

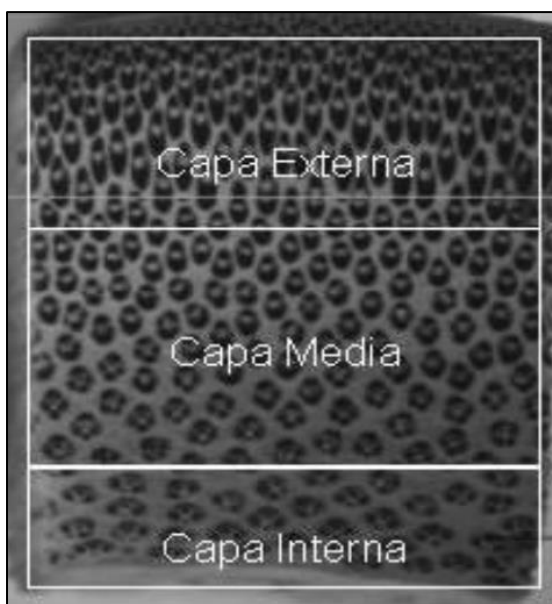


Figura 6: Estructura anatómica del espesor total a 20X de la zona basal.

FUENTE: Osorio *et al.* 2007.

Según Grosser y Liese (1971), la estructura anatómica del tallo esta principalmente determinada por los haces vasculares colaterales embebidos en el tejido del parénquima. La forma, tamaño, número y concentración de haces vasculares varía desde la capa externa hacia la capa interna y desde la base del tallo hacia el ápice del mismo. Cerca de la capa externa los haces vasculares son pequeños, numerosos y concentrados mientras que en la parte media del culmo son más grandes y con una distribución más amplia (Liese, 1998; Londoño *et al.*, 2002; Pereira y Beraldo, 2007; Nieto, 2008). En todos los bambúes el tamaño de los haces vasculares disminuye notoriamente desde la base hacia el ápice pero el número de haces vasculares aumenta.

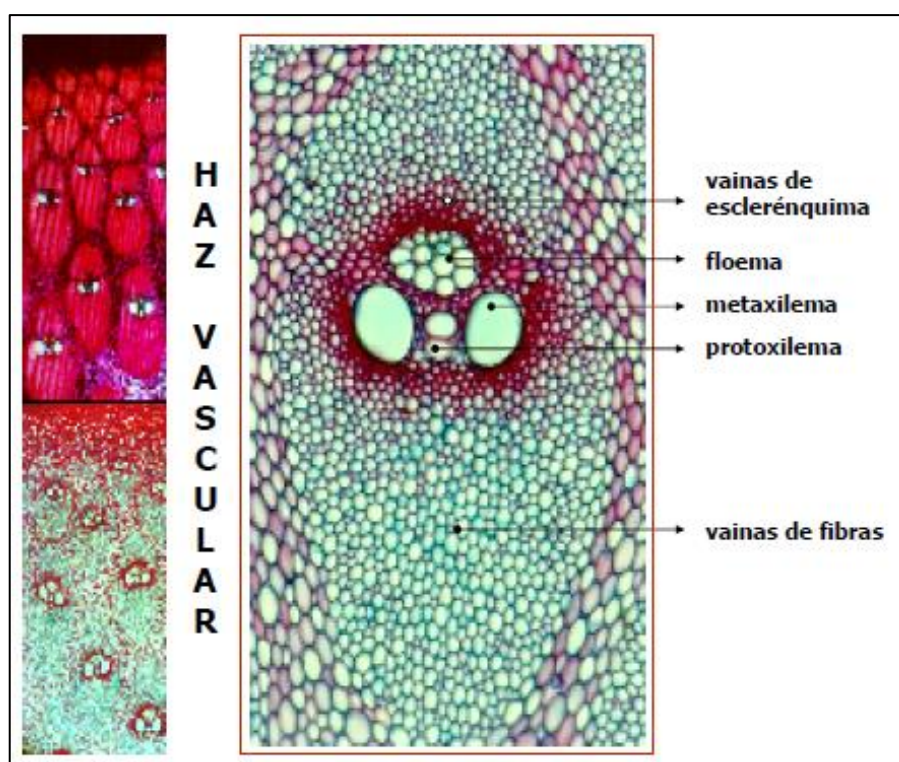


Figura 7: Haz vascular de *Guadua angustifolia*.

FUENTE: Londoño *et al.* 2002.

Los haces vasculares se caracterizan por su forma, tamaño y agrupamiento (figura 7), de esta manera se considera una clasificación anatómica de cuatro tipos (Grosser y Liese, 1971). Hay un incremento de la resistencia mecánica desde el tipo I hacia el tipo IV. (Pereira y Beraldo, 2007).

Las fibras constituyen el tejido que soporta todo el esfuerzo mecánico al que está sometido el tallo debido al viento y otros factores extremos, además de su propio peso. La fibra del bambú en general se caracteriza por su forma delgada, ahusada en ambos lados y en algunos casos bifurcada en sus extremos. Se encuentra en los internudos

rodeado a los haces vasculares y constituyen entre el 40 – 50 por ciento del tejido total y entre el 60 al 70 por ciento del peso total del culmo. (Moreno, Trujillo y Osorio, 2007)

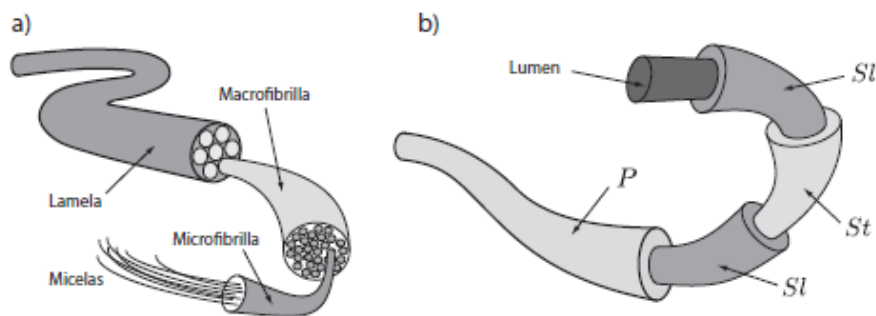
En la tabla 4, se presentan datos biométricos de la *Guadua angustifolia*, según Cáceres (1989), siendo que la fibra se clasifica como larga por oscilar entre 1,6 a 2,3 mm, el diámetro es clasificado como fino fluctuando entre 11 a 14 micras, en cuanto al índice de flexibilidad presenta alta flexibilidad por ser superior a 0,5.

Tabla 4: Datos biométricos de las fibras de *Guadua angustifolia* Kunth.

| | Densidad del culmo (g/cm ³) | Porcentaje de lignina (%) | Porcentaje de celulosa (%) | Longitud de fibra (mm) | Ancho de fibra (micras) | Ancho de lumen (micras) | Espesor de pared (micras) | Porcentaje de pared (%) | Índice de flexibilidad |
|-----------------|---|---------------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------|
| Promedio | 0,62 | 26,1 | 44,3 | 1,4 | 14 | 9 | 2,5 | 34 | 0,65 |
| Mínimo | - | - | - | 0,9 | 8 | 4 | - | - | - |
| Máximo | - | - | - | 4,0 | 24 | 20 | - | - | - |

FUENTE: Cáceres, 1989.

La comparación a nivel de microestructura de las fibras de madera con respecto a las fibras de bambú, es presentada en la figura 8 por Estrada (2010), quien menciona que en el caso de las fibras de bambú tienen capas concéntricas de celulosa y hemicelulosa, con una orientación del tejido diferente en cada una de ellas siendo longitudinales y transversales como se observa en la figura 8 (b).



Dónde: Sl: tejido longitudinal y St: tejido transversal.

Figura 8: Microestructura de las fibras. a) Fibra de madera b) Fibra de bambú.

FUENTE: Estrada, 2010.

Según Ghavami y Rodríguez (2000), citado por Lozano, Luna y Takeuchi (2010), la *G. angustifolia* es un material ortotrópico, debido a que las fibras de celulosa que conforman el entrenudo se encuentran alineadas longitudinalmente, dando como resultado dos planos generales de simetría del material, por lo que presenta diferentes propiedades en ambos planos.

En estudios anatómicos, realizados por Liese (1998) en diferentes bambúes y por Londoño *et al.* (2002), se han demostrado que la Guadua posee propiedades estructurales sobresalientes que la clasifican como clase B, de acuerdo al sistema de clasificación de maderas, y por tanto puede ser utilizada para la construcción de viviendas, puentes y estructuras de soportes entre otros.

Según Liese (1998), los haces están asociados a un mayor contenido de fibras en los culmos de bambú y estas contribuyen a una mayor resistencia mecánica de los mismos. En el estudio realizado por Maya, Camargo y Marino (2017), encontraron que de las dos zonas evaluadas, la que presenta mayor humedad y por ende mayores diámetros presentó menores valores de resistencia y densidad.

Con relación a la edad, *G. angustifolia* posee características anatómicas a nivel del haz vascular que son estables y no están influenciadas por la edad (Castaño y Moreno, 2004). Sin embargo, esto ha sido rebatido por estudios posteriores realizados por Sánchez, Espuna y Roux (2016) y Hernao y Rodríguez (2015), que demuestran la influencia de la edad.

1.6. Propiedades físico mecánicas

1.6.1. Propiedades físicas

Contenido de humedad

Corresponde al porcentaje del peso húmedo con respecto al peso seco al horno; según Jaramillo y San Clemente (2003), el contenido óptimo para uso estructural es menor del 25 por ciento, y un máximo permisible del 30 por ciento. Además Capera y Erazo (2012) mencionan que la cantidad de agua en una porción del material y su variación afecta inversamente la resistencia de los materiales fibrosos.

Densidad seca al aire

Se entiende como la relación natural entre el peso de una madera estacionada que se halla en equilibrio con la atmósfera, y el volumen correspondiente a esas condiciones (Núñez, 2007), el contenido de humedad al momento del ensayo influye en este valor. En la tabla 5, Cely, Hernández y Gutiérrez (2012), presentan valores promedios obtenidos en las probetas, que corresponden a la densidad seca de la *G. angustifolia* caracterizada en los ensayos mecánicos realizados.

Tabla 5: Densidad seca del culmo de la *Guadua angustifolia*.

| Datos estadísticos | Zona del tallo | | | |
|-------------------------------|----------------|----------|----------|----------|
| | Inferior | | Media | |
| | Con nudo | Sin nudo | Con nudo | Sin nudo |
| Promedio (kg/m ³) | 510 | 580 | 710 | 797 |
| Desv. Est. | 61 | 36 | 150 | 142 |
| Máximo (kg/m ³) | 580 | 610 | 840 | 950 |
| Mínimo (kg/m ³) | 470 | 540 | 520 | 670 |

FUENTE: Cely et al. 2012.

1.6.2. Propiedades mecánicas

González (2014) señala, que sus propiedades mecánicas, son comparables a la de los materiales convencionales, con muchas posibilidades para que la *Guadua* sea industrializada, a diferencia de otras especies de bambú. Es un material natural y a la vez, resistente, duradero, flexible, ecológico, renovable y sostenible. Asimismo, la *Guadua* ofrece una gran esbeltez gracias a su forma tubular y un óptimo rendimiento dado por esa sección.

La estructura del tallo es la que determina las propiedades, lo que se debe en gran medida a la forma del mismo y a la cantidad de celulosa presente. La forma tubular, hueca, espesor y sección transversal irregular permiten grandes variaciones de las propiedades. (Londoño *et al.*, 2002).

La *Guadua*, es idónea para esfuerzos de compresión que evitan el pandeo, lo cual lo hace un material muy apto para construcciones sismo-resistentes. Los estudios realizados sobre la caña de *Guadua* como material estructural, determinan que la rigidez y fuerza de este material sea mayor que la del hormigón y la madera y similar a la del acero. (González, 2014). El elevado porcentaje de fibra presente en su estructura y el alto contenido en sílice en su cara exterior hacen que esta especie presente las asombrosas características de resistencia y flexibilidad.

Módulo de elasticidad: Es la propiedad de cuerpos sólidos de deformarse bajo la acción de una fuerza y regresar a la forma original, cuando esta deja de aplicarse. Este comportamiento se mantiene hasta cierto límite, por encima del cual, se produce una deformación permanente en la muestra. Si continua aplicándose una carga creciente se llega a la falla de la muestra. (Seely, 1954).

— Compresión paralela a la fibra

Gran parte del bambú empleado en construcción está sometido a compresión paralela a la fibra, por ejemplo, en columnas, soportes, y otros, los cuales están sujetos a cargas que tienden a aplastar o a acortar los miembros longitudinalmente. (Martínez, 2015).

Según Takeuchi y González (2007), en la tabla 6 se presentan valores de resistencia máxima (RM) y módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela, donde se tiene que el valor promedio de la zona basal (cepa) es ligeramente menor en relación a la zona media (basa), tanto en resistencia máxima como en MOE, sin embargo, también se puede notar que la desviación estándar es mucho mayor en la zona basal para el módulo de elasticidad.

Tabla 6: Resistencia máxima (RM) y módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela de *G. angustifolia*.

| Parámetro | RM (MPa) | | | MOE (GPa) | | | |
|---------------------|----------------|-------|-------|-----------|--------|-------|--------|
| | Zona del culmo | Cepas | Basas | Total | Cepas | Basas | Total |
| N° de muestras | | 190 | 336 | 809 | 150 | 267 | 479 |
| Valor Máximo | | 92,60 | 82,27 | 118,79 | 146,34 | 33,48 | 146,34 |
| Valor Mínimo | | 29,45 | 31,68 | 29,45 | 4,24 | 6,57 | 4,24 |
| Valor Promedio | | 50,63 | 56,42 | 56,21 | 17,42 | 18,13 | 17,86 |
| Desviación estándar | | 9,03 | 9,35 | 10,16 | 11,93 | 4,19 | 7,53 |

FUENTE: Takeuchi y González, 2007.

Otros valores presentados por Capera y Erazo (2012) en la tabla 7, muestran valores promedios menores con respecto a Takeuchi y González (2007). Por otro lado, en la tabla 8 se observan los valores obtenidos por Ghavami y Marinho (2005), cuyos valores promedio se encuentran entre 25 a 32 MPa, los cuales se encuentran por debajo de los antes mencionados.

Tabla 7: Resistencia máxima (RM) en compresión paralela a la fibra de *G. angustifolia*.

| Datos estadísticos | Zona de la caña | | | Total |
|--------------------------------------|-----------------|-------|----------|-------|
| | Inferior | Media | Superior | |
| N° de datos (N) | 44 | 44 | 42 | 130 |
| Promedio (MPa) | 36,75 | 36,39 | 40,48 | 37,83 |
| Desviación estándar (s) | 4,77 | 4,60 | 5,03 | 5,11 |
| Coefficiente de variación (%) | 12,99 | 12,63 | 12,43 | 13,50 |
| Percentil 5 (MPa) | 28,90 | 28,83 | 32,20 | 29,43 |
| Valor característico (MPa) | 27,37 | 27,35 | 30,54 | 28,49 |

FUENTE: Capera y Erazo, 2012.

Tabla 8: Resistencia máxima (RM) y módulo de elasticidad (MOE) en compresión paralela a la fibra de *G. angustifolia*.

| Zona del tallo | MOR (MPa) | MOE (GPa) | Coefficiente de Poisson |
|-----------------------|-----------|-----------|-------------------------|
| Basal sin nudo | 28,36 | 14,65 | 0,27 |
| Basal con nudo | 25,27 | 9,00 | 0,56 |
| Media sin nudo | 31,77 | 12,25 | 0,36 |
| Media con nudo | 28,36 | 12,15 | 0,18 |

FUENTE: Ghavami y Marinho, 2005.

La figura 9, muestra los resultados obtenidos por Hernao y Rodríguez (2015), quienes evaluaron la resistencia máxima en compresión paralela de *G. angustifolia*, donde se aprecia que el mayor promedio fue para las cañas de cinco años de madurez, ya que a los seis años de edad presentaron una disminución de la resistencia máxima promedio.

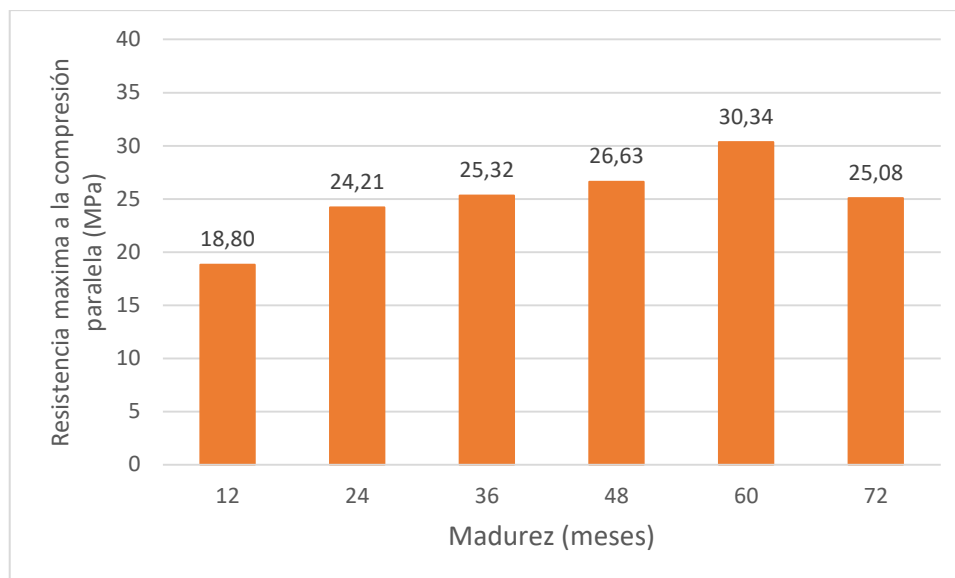


Figura 9: Comparación de resistencia máxima (RM) a la compresión paralela en culmos provenientes de tres sitios del Eje Cafetero de Colombia.

FUENTE: Hernao y Rodríguez, 2015.

La tabla 9 muestra valores promedio obtenidos por diferentes autores, el rango de valores es de 27,47 a 49,48 MPa, notando que los resultados obtenidos por Ghavami y Marinho (2005), son próximos a los presentados por Camacho y Páez (2002).

Tabla 9: Resistencia máxima (RM) en compresión paralela de *G. angustifolia* de diversos autores.

| Autores | RM (MPa) |
|--------------------------------|----------|
| <i>Camacho y Páez (2002)</i> | 27,47 |
| <i>Uribe y Duran (2002)</i> | 49,48 |
| <i>Prada y Zambrano (2003)</i> | 41,06 |
| <i>Gutiérrez (2010)</i> | 45,82 |
| <i>Estacio (2013)</i> | 30,97 |

FUENTE: Estacio, 2013.

— Flexión estática

Es el esfuerzo de fibra máximo (MOR) desarrollado en una probeta o muestra justo antes de que se agriete o se rompa, esta propiedad mecánica depende del tipo de esfuerzo aplicado, y del tipo de fibra (interna o externa de la sección solicitada). Al igual que en la madera tradicional, decrece de un cinco a 10 por ciento con el aumento de la carga. (Martínez, 2015). En la tabla 10, se presentan los resultados obtenidos por Huarcaya (2010).

Tabla 10: Módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) en flexión de *G. angustifolia*.

| | MOR (MPa) | ELP (MPa) | MOE (GPa) |
|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Media | 21,77 | 11,97 | 0,70 |
| Desv. Estándar | 6,34 | 4,18 | 0,31 |

FUENTE: Huarcaya, 2010.

Por otra parte, González, Osorio y Gracia (2002), presentan los valores obtenidos en ensayos de flexión estática a escala natural (Ver Tabla 11), donde se aprecian valores por encima de los obtenidos por Huarcaya (2010), sin embargo, esto es debido a la influencia de la luz de las probetas durante los ensayos, siendo mucho mayor en el caso del ensayo a escala natural. Por otra parte, Estacio (2013) indica un valor promedio de 36,76 MPa de resistencia máxima a flexión estática, el cual se encuentra en el rango de los valores presentados por Huarcaya (2010) y González *et al.* (2002).

Tabla 11: Valores de flexión estática a escala natural en *G. angustifolia*.

| | MOR (MPa) | ELP (MPa) | MOE (GPa) |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Media | 53,86 | 34,09 | 10,70 |
| Desviación estándar | 12,84 | 9,75 | 2,93 |
| Coefficiente varianza (%) | 23,83 | 28,61 | 27,41 |
| Valor máximo | 94,18 | 57,90 | 18,92 |
| Valor mínimo | 30,05 | 18,01 | 7,02 |

FUENTE: González *et al.* 2002.

— Tensión

Tracción o tensión es el esfuerzo más complicado de todos a los que se enfrentan las estructuras de bambú. Los métodos mediante los cuales se unen las diversas piezas hacen que al aparecer esfuerzos de tracción, estas se rajen debido al tipo de unión que presentan. Depende de la zona de la caña ensayada (base, medio o ápice), del porcentaje de humedad, del elemento a ensayar y de la presencia o no de nudos. (Martínez, 2015).

Ghavami y Marinho (2005) presentan valores de resistencia a tracción en probetas con y sin nudo de la especie *Guadua angustifolia*, de 69,88 y 93,80 MPa, respectivamente, mostrando mayores valores en aquellas probetas sin presencia de nudo. En la tabla 12 se observa un mayor valor de resistencia a la tensión para la zona media del tallo con respecto a la zona basal.

Tabla 12: Módulo de ruptura (MOR) y módulo de elasticidad (MOE) en tensión de *G. angustifolia*.

| Parte del bambú | MOR (MPa) | MOE (GPa) |
|-----------------------|-----------|-----------|
| Base sin nudo | 93,38 | 16,25 |
| Medio sin nudo | 95,80 | 18,10 |

FUENTE: Ghavami y Marinho, 2005.

Estacio (2013) presenta valores promedio obtenidos por otros autores (Ver Tabla 13), que se encuentran en un rango de 91,87 a 190,7 MPa. En relación a estos valores Huarcaya (2010) obtuvo una media de 108,99 MPa y una desviación estándar de 35,67 MPa, valor que se encuentra próximo al hallado por Castrillon y Malaver (2004).

Tabla 13: Módulo de ruptura (MOR) en tensión de *G. angustifolia*, según otros autores.

| Autores | MOR (MPa) |
|------------------------------------|-----------|
| Ciro, Osorio y Velez (2005) | 190,70 |
| Janssen (2002) | 148,40 |
| Castrillon y Malaver (2004) | 91,870 |

FUENTE: Estacio, 2013.

La resistencia máxima promedio en tensión presentado por *Ciro et al.* (2005), es de 190,70 MPa, con un coeficiente de variación de 34 por ciento lo que indica una alta variabilidad de la estructura del material, esta situación es típica para elementos de naturaleza biológica, esta variabilidad es explicada además por la heterogeneidad del material vegetal usado en los estudios como también a los parámetros de operación y medida con los cuales se realizaron los respectivos ensayos.

1.7. Principales usos

Los beneficios que ofrece la guadua le dan un lugar privilegiado en la sociedad moderna; por eso podemos encontrar puentes construidos con guadua, lo mismo que pequeños utensilios de cocina; casas de hasta siete pisos levantadas sobre una ladera y discretos objetos de mesa; iglesias provisionales en algún pueblo que comienza a establecerse, cercas, balsas, canales, quioscos, balcones, escaleras, barandas, desagües, muebles y complejas estructuras arquitectónicas. (Villegas, 2001).

El bambú presenta diferentes usos como se observa en la Figura 10, los cuales dependen de la distribución en la caña, siendo todas las partes utilizadas para diferentes fines como: pulpa, leña, alimentos, artesanías, pisos, materiales de construcción, pigmentos, etc. (Takahashi, 2012).

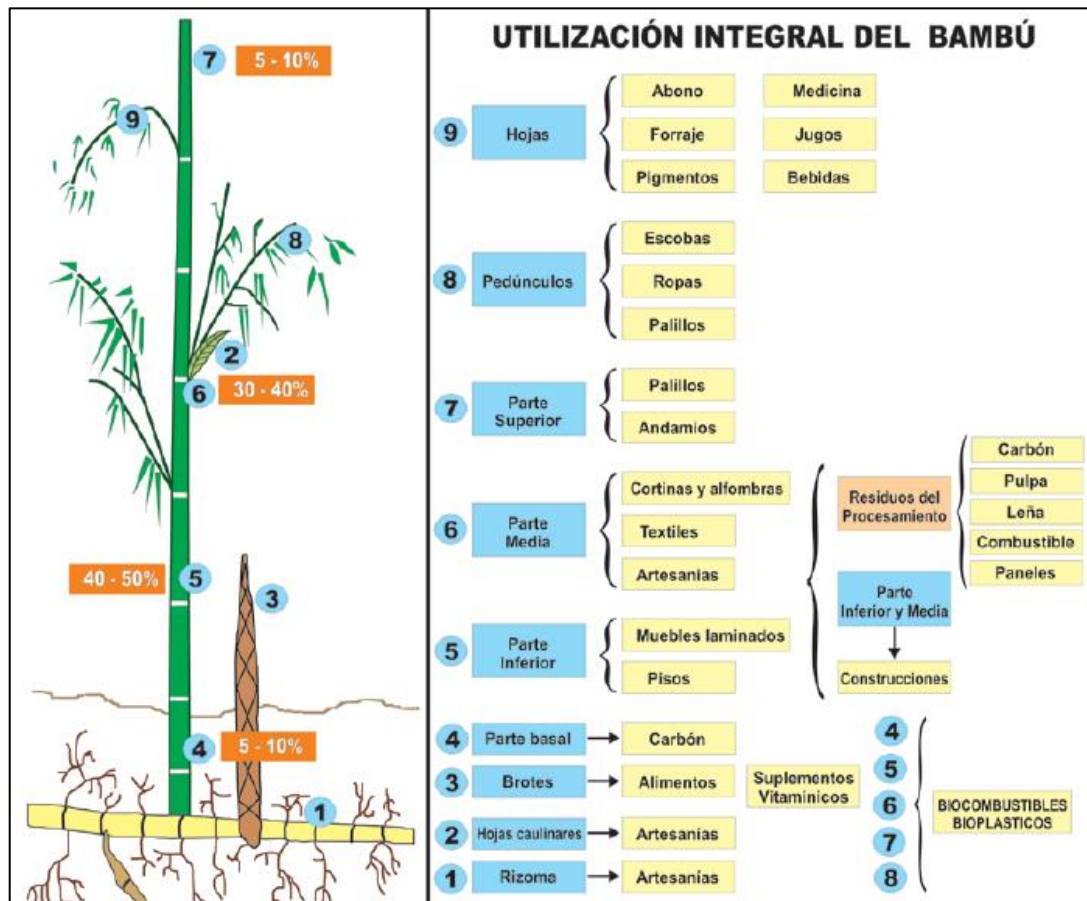


Figura 10: Uso integral del bambú.

FUENTE: MINAG. Plan Nacional de Promoción de Bambú 2008-2020.

La *Guadua angustifolia* Kunth; es un bambú leñoso, es considerada entre las 20 mejores especies de bambú en el planeta, distinción que obedece entre otros factores por ser una planta multiusos, se le atribuyen más de 1 000 usos, los mismos que se registran desde la época precolombina. La utilidad más frecuente y visible es en la construcción de viviendas de tipo social, ha sido el material mayormente utilizado en la región costera durante y después de eventos extremos como el Fenómeno del Niño. Al 2014, más de 500 000 viviendas entre Ecuador y Perú, sus paredes estaban elaboradas con material de caña guadua. (Añazco, 2014).

Al presentar una estructura hueca es apta, también, para la conducción de líquidos al abrirla en canoas que la hacen un recipiente natural, de uso horizontal o verticalmente; su fibra larga y recta la hace muy resistente a esfuerzos de tracción y compresión, pero permite que se raje fácilmente en sentido longitudinal. (Villegas, 2001).

Afortunadamente, la guadua tiene fibras naturales muy fuertes, que la hacen muy ventajosa frente a otros bambúes; lo que permite desarrollar productos industrializados como aglomerados, laminados, pisos, paneles, etc. Es decir, productos de alta calidad, que podrían llegar a competir a mediano plazo con el plástico, el acero o el hormigón. (González, 2014). De igual manera, en diversas industrias, entre ellas la fabricación de mobiliario, ya que su proceso de transformación no es demasiado complejo, por lo que podría convertirse en la materia prima que compita con la madera, al ser más barata y de buena resistencia. Gonzáles (2014),

1.7.1. Uso estructural

Por sus propiedades estructurales tales como la relación resistencia/peso y por su capacidad para absorber energía, hacen del bambú un material flexible y resistente, haciéndolo ideal para construcciones sismo-resistentes. Asimismo, la guadua tiene fibras naturales muy fuertes que permiten elaborar productos como aglomerados, laminados, pisos, paneles, esteras, pulpas y papel.

Entonces, las propiedades anti sísmicas han contribuido a valorizar este material desde el punto de vista estructural. Cada vez son más las personas que habitan en casas de bambú, alcanzado en algunas regiones del mundo una gran importancia, este es el caso de Bangladesh donde el 73 por ciento de sus habitantes habitan en este tipo de viviendas, otro ejemplo es la ciudad de Guayaquil donde el 50 por ciento habita en este tipo de casas, lo que corresponde a 1 millón de personas. (Rodríguez, 2006).

El uso de tallos o culmos de bambú en la fabricación de paneles sustituye actualmente la utilización de 1 millón de metros cúbicos de madera en pie en China y 400 mil metros cúbicos en la India. Las viviendas de bambú presentan cualidades de aislantes térmicos y sonoros por las cámaras de aire que forman los tallos de bambú. Los tallos de bambú también son utilizados para hacer paneles prefabricados que resultan más resistentes, flexibles y livianos que los convencionales. (Yang y Hui, 2010).

En suma, como material estructural se tienen algunas ventajas mencionadas por González (2006), tales como:

- Muy buenas cualidades físicas para un material de construcción.
- Es un material liviano que permite disminuir el peso a la construcción y que es un factor muy importante para las construcciones sismo-resistentes.
- Especialmente las fibras exteriores la hacen muy resistente a las fuerzas axiales.
- La relación entre peso-carga máxima y su forma tubular apta para fuerzas axiales lo convierten en un material perfecto para estructuras espaciales en donde trabajan solamente dichas fuerzas axiales.

Dentro de las cualidades que presenta el tallo de la guadua esta la forma recta, lo que facilita el uso en construcciones con diseños geométricas regulares, los elementos empatan unos con otros sin necesidad de forzarlos. Esta virtud se aprovecha principalmente en envigados y estructuras arquitectónicas en general. Otra característica es el grosor y la distribución de los canutos, siendo cortos y gruesos en la base los cuales se alargan y adelgazan conforme se incrementa la altura, lo cual permite elegir el tramo adecuado al uso que se le quiere dar. Sin embargo, como llegan a medir hasta 40 metros, no se alcanza a sentir su conicidad en las dimensiones en que usualmente se emplea. (Villegas, 2001).

Martínez (2015), manifiesta que las técnicas utilizadas para la construcción en bambú son muy diversas. Con este material se realizan desde las estructuras más simples (un grupo de varas atadas unas a otras para sortear un riachuelo o formar una cubierta), hasta las más complejas (puentes, grandes edificios o andamiajes, etc.). En el caso de las construcciones empleando la caña en hormigón armado se recomienda humedecer la caña para que al momento de pérdida del líquido la contracción sea lo menor posible. (Narváez, 2013).

En la Figura 11, se observa un andamio completamente realizado con bambú. Para darnos cuenta de la envergadura de esta estructura auxiliar, el edificio alrededor del cual se ha construido tiene más de 100 pisos. Esto no es una excepción o un caso aislado, en gran parte del continente asiático los andamiajes se elaboran con varas de

bambú debido a que es muy económico y sus prestaciones mecánicas permiten trabajar de una manera correcta y segura, de la misma forma que si fuera de metal, como estamos acostumbrados a ver en Europa. A parte, la manejabilidad de las piezas que lo componen es infinitamente mayor a la de los andamios convencionales ya que son ligeras y ocupan menor espacio. (Houston, 2016).



Figura 11: Andamiaje de bambú en la ciudad de Kowloon, Hong Kong.

FUENTE. Houston, 2016.

González (2014), señala que la guadua es un material muy apto para las estructuras livianas y espaciales, donde aparecen fuerzas axiales, al mismo tiempo que ostenta un aspecto estéticamente agradable a la vista y original. Sin embargo, también menciona que los resultados hasta ahora obtenidos son muy prometedores, pero aún queda mucho por investigar en este campo. La obtención de la guadua para ciertos tipos de trabajo ya sea arquitectura, diseño, líneas de productos, mediante la transformación de la misma en tablilla, puede llegar a ser una fuente importante de trabajo para el sector industrial.

Finalmente, se menciona que Colombia es conocida a nivel mundial en la generación de conocimientos del bambú *G. angustifolia* Kunth, especialmente pioneros en el uso

estructural y el desarrollo de tecnologías constructivas. (Londoño, 2010).

1.8.Principales agentes de deterioro

Martínez (2015), señala que el uso del bambú es apto para casi la totalidad de las partes de una estructura. Al tratarse de un material de origen biológico puede presentar problemas en lo referente a la durabilidad si no se adoptan ciertas medidas. Al igual que la madera, es deseable evitar el contacto directo con el agua, si es posible se debe aislar las partes de bambú del suelo para evitar humedades y el ataque tanto de insectos como de hongos. De igual manera, se recomienda evitar la exposición directa a la radiación solar, aunque sus repercusiones no son tan importantes como las del agua.

Londoño (2010), menciona que existen diversos factores que afectan las cañas de bambú, entre estas se encuentra el ataque biológico realizado por bacterias u hongos pudiendo ser estos; xilófagos, cromógenos (mancha azul, mancha roja, mancha negra) y mohos. Además, señala que aunque la guadua es atacada por diferentes agentes biológicos con el proceso de blanqueamiento, estos desaparecen.

Gómez, Méndez y Palominos (2005), mencionan que; otros agentes son los químicos provenientes de artículos de limpieza o similares, la manipulación o daño mecánico que pueda comprometer la estructura de la caña, entre otros. Todos estos pueden ser controlados si se tiene cuidado en cuanto al método de manipuleo, consideraciones de preservado y curado en las cañas para evitar ataques patógenos. Carreño (2017) hace énfasis en que las medidas de protección son esenciales ya que otras desventajas son la baja resistencia a los huracanes y el fuego.

En el bambú, los insectos son un problema importante, dependiendo de las condiciones climáticas puede presentar gran resistencia a las termitas. En estructuras de techos, la resistencia puede llegar a ser incluso de 60 años. Sin embargo, esta resistencia no es igual frente a otros agentes biológicos. Si los tallos luego del corte aún conservan humedad, son atacados por coleópteros comúnmente llamados gorgojos o barrenadores. Bajo estas condiciones el ataque se inicia en los primeros meses de instalado el bambú, y puede llegar a perder gradualmente sus propiedades hasta en 10 años. (Álvarez, 2012).

2. Intemperismo y efectos sobre el bambú

Se entiende el intemperismo, como la exposición directa del material a los factores del medio o entorno, los cuales provocan una degradación de la superficie del material. Estos factores perjudiciales son específicos de un lugar, por lo que se debe tener en cuenta que esta prueba es válida en condiciones similares. Los principales factores perjudiciales del entorno, para un material son la humedad, radiación UV, temperatura y viento (Gomes, Nóbrega Dos Santos, Miyazato y Navarro Peres De Freitas, 2005), los mismos que no pueden ser controlados con tanta facilidad ya que son inherentes al lugar donde prestara servicio el material.

Dichos factores varían según la época o estación del año, pudiendo presentarse valores de temperatura y radiación elevada en épocas secas o de verano y además elevada humedad y viento en épocas húmedas o de invierno, en especial en aquellos lugares que presentan un clima variable durante el año. (Gómez *et al.* 2005).

El envejecimiento es el resultado de los efectos del intemperismo, que por lo general implica un cambio químico que conlleva a un cambio físico; este concepto está relacionado con el tiempo de vida útil (Herrera *et al.* 2013). La durabilidad del bambú depende tanto de las condiciones climáticas como de la especie. El bambú tiene una resistencia natural baja comparada con la madera por la alta proporción de almidón y azúcares que contiene.

En condiciones naturales se observa que la parte inferior de los tallos o culmos se deteriora más rápidamente que el resto del tallo, y que la parte interior del culmo es menos resistente que la parte exterior (Ordóñez, Mejía y Bárcenas, 2002). En la tabla 14, se presenta la durabilidad puede ser hasta de 15 años según las condiciones a las cuales será expuesto el tallo de bambú.

Tabla 14: Durabilidad del bambú en diferentes condiciones.

| Condición | Años |
|-------------------------------------|-------------|
| A la intemperie | 1 -3 |
| Bajo cubierta | 4 - 7 |
| En circunstancias favorables | 10 - 15 |
| En el mar | Menos de 1 |

FUENTE: Ordóñez *et al.* 2002 – SEMARNAT.

En el caso de los compuestos plástico-bambú, Stark y Gardner (2008) mencionan que, la radiación ultravioleta produce decoloración, micro agrietamiento severo y desgaste acelerado que repercute en la disminución de sus propiedades.

2.1.Efecto de las condiciones climáticas del lugar de exposición

Gomes *et al.* (2005), indica que los factores ambientales que causan mayor efecto sobre la degradación de los materiales expuestos a la intemperie son la radiación ultravioleta, la humedad, el calor y el viento. Stark y Gardner (2008), mencionan otros factores secundarios deben ser considerados, como las variaciones estacionales y anuales, las diferencias geográficas, los gases atmosféricos y la contaminación ambiental.

En estudios realizados por Stark y Gardner (2008), en compuestos plástico-madera con intemperismo, presentan que: los rayos UV son los responsables de la degradación de la lignina, por lo que se forman compuestos hidrosolubles que posteriormente son lavados por efecto de la garua o lluvia, dejando la superficie rica en celulosa y con una apariencia fibrosa que absorbe la humedad, lo cual permite la formación de grietas y consecuentemente la pérdida de resistencia y módulo de elasticidad.

De igual manera, es importante considerar la variación de temperatura de la superficie del material, teniendo en cuenta que un cambio brusco de temperatura es una de las razones por las que también se suelen formar grietas. Por ejemplo, la superficie caliente mientras se encuentra funcionando en una atmósfera soleada, y repentinamente se enfría por la lluvia, generando tensiones transitorias en la superficie. Del mismo modo, los cambios repentinos en la humedad relativa del ambiente logran que la capa superficial del compuesto entre en tensión para liberar humedad. (Sınmazçelik 2006).

Duque (2017), menciona que la velocidad e intensidad de las reacciones químicas típicas del intermporismo químico, dependerá de la temperatura y del balance hídrico. Por otra parte Sınmazçelik (2006), manifiesta que la erosión por partículas sólidas también tiene una influencia en la formación de grietas superficiales, al producirse por el choque de partículas sólidas presentes en el aire ocasionando abrasión en el material, debido a que la tensión surge por la energía cinética de las partículas que fluyen en el aire a medida que encuentran una superficie polimérica, la erosión se produce como resultado de los impactos repetidos. Las gotas de lluvia pueden considerarse como otro factor de erosión, como impacto líquido, ya que las pequeñas gotas de lluvia van a incidir sobre la superficie de un material polimérico a altas velocidades y altas

presiones.

2.1.1. Condiciones climáticas del lugar de exposición

El clima del distrito de La Molina es generalmente templado; la atmósfera de abril a diciembre se caracteriza por presentar nubes y nieblas en las primeras horas de la mañana, que sólo eventualmente producen una débil llovizna o garúa, a diferencia del día la temperatura en las noches disminuye, causando una sensación de frío. (Escarcena, 2009).

Por otra parte, la atmósfera de diciembre a abril se caracteriza por alternar días y noches despejados con la esporádica aparición de nubes que llegan a producir algunas lluvias; esta situación genera la presencia de días nublados, pero que sin embargo, al igual que en los días despejados, el ambiente se mantiene templado e incluso caluroso; en las noches la temperatura desciende, causando frío, aunque la humedad media se mantiene. (Escarcena, 2009).

La presión atmosférica de la costa central peruana es casi constante, lo cual genera la presencia de grandes sectores con nieblas muy cerradas; las nubes tienen origen en las húmedas y calientes masas aéreas ecuatoriales que son desplazadas del mar hacia la costa peruana y son condensadas por la superficie fría de la “Corriente Peruana”, produciendo la niebla que cubre la mayor parte de la ciudad. Sin embargo, en el distrito de La Molina estas nubes y nieblas se disipan fácilmente durante el día dando paso a un ambiente templado y permite el paso de la luz solar. (Escarcena, 2009).

Durante el transcurso del año, la temperatura durante el día generalmente varía entre 15°C a 27°C y rara vez está por debajo de 13°C o es superior a los 29°C, en cambio las noches son frescas y frías (11° C. aproximadamente). La temporada templada dura tres meses, de enero a abril, y la temperatura máxima promedio diaria es más de 25°C. La temporada fresca dura 4,2 meses, de junio a octubre, y la temperatura máxima promedio diaria es menor a 21 °C. (Weather Spark, 2017).

2.2. Factores que influyen durante el Intemperismo

2.2.1. Humedad

La humedad en el ambiente es variable, este depende de las condiciones del tiempo meteorológico, cuando las fibras son expuestas a estos ciclos de humedad, el contenido de humedad se ve incrementado por el ingreso de agua a la pared celular, aumentando así la velocidad y extensión del hinchamiento. (Fuentes *et al.*, 2014).

Cuando las moléculas de agua penetran la región amorfa, la fuerza de unión entre las moléculas se reduce, por lo que el contenido de lignina disminuye. Esto permite a la fibra poder estirarse fácilmente lo que implica una deformación (Wenbin y Zhang, 2011). Por todo esto se puede inferir que entre mayor sea la absorción de agua de material mayor será la disminución de la resistencia a la tracción del mismo. (Assar, Scida y Mahi, 2011).

Sudiyani, Tssujiyama y Imamura (1999), realizaron ensayos de intemperismo en dos especies de madera albizzia (*Paranserianthes falcata*) y sugi (*Criptomeria japónica*), en el análisis de espectroscopia infrarroja (FT-IR), se pudo observar la reacción de oxidación de la lignina bajo todas las condiciones de intemperie ensayadas, y se remarcó la disminución del contenido de lignina y hemicelulosa, adicionalmente mostraron que el efecto del agua junto con la radiación UV acelera el proceso de degradación.

2.2.2. Radiación UV.

La radiación ultravioleta (UV) es la región del espectro solar que se extiende desde los rayos X hasta la luz visible, entre los 200 y 400 nm. Sólo una parte de esta radiación llega a la tierra (UV-A y UV-B), ya que los fotones de la banda UV-C son absorbidos por la capa de ozono (O₃) de la estratósfera. Las bandas UV-A y UV-B son las que tienen efectos biológicos y comprenden longitudes de onda desde los 315 - 400 nm y de 290 - 315 nm, respectivamente. En el caso del UV-A sus efectos llegan a compararse en algunos aspectos con los de la luz visible y por su parte la banda UV-B es la que tiene múltiples efectos en los sistemas biológicos, muchos de ellos destructivos debido a su alta energía. (Giordano, 2003)

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía recibida por unidad de área en forma instantánea como energía/área-tiempo y cuya unidad es el Watt por metro cuadrado (W/m²). Un Watt es igual a un Joule por segundo.

La radiación global está conformada por tres tipos de radiación solar, estas son:

- **Directa:** Es la que se recibe directamente desde el sol en línea recta, sin que se desvíe en su paso por la atmósfera. Es la mayor y las más importante en las aplicaciones fotovoltaicas.

- **Difusa:** Es la que se recibe del sol después de ser desviada por dispersión atmosférica. Es radiación difusa la que se recibe a través de las nubes, así como la que proviene del cielo azul. De no haber radiación difusa, el cielo se vería negro aún de día, como sucede por ejemplo en la luna.
- **Reflejada:** Es la radiación directa y difusa que se recibe por reflexión en el suelo u otras superficies próximas.

Garay (2009) indica que la radiación ultravioleta, es el principal causante de la degradación de las superficies de madera y recubrimientos. La luz ultravioleta inicia reacciones fotoquímicas en la superficie del bambú resultando deterioros visibles como un cambio de color por degradación de la lignina cambiando de un color verde oscuro a un color mostaza, además aumenta la rugosidad de la superficie.

La acción de esta degradación en el bambú al igual que en la madera, tiene como resultados visibles: pérdida de brillo, cambio de matiz, laminación (ampollas), craqueo o agrietamiento y amarillamiento (Parker, 1965). El cambio de color, es básicamente una reacción de superficie, no obstante, puede afectar de forma más profunda, por las reacciones derivadas de la degradación. (Acevedo, Bustos, Lasserre y Gacitua, 2013).

2.2.3. *Temperatura*

El envejecimiento por calor puede, por sí mismo, causar degradación de los materiales. Además, los efectos destructivos de la exposición al sol se aceleran cuando se aumenta la temperatura. Aunque la temperatura no afecta las reacciones fotoquímicas primarias, si afecta las reacciones secundarias que implican los subproductos de la colisión de fotones/electrones primarios. (Q-Lab Corporation, 2011)

Las altas temperaturas y contenido de agua a las que son expuestas las muestras acelera el proceso de degradación de los materiales (Santamaría, 2012). Los incrementos térmicos sobre el material reducen el contenido de humedad alterando el equilibrio por permanente degradación de la hemicelulosa, siendo este uno de los mayores componentes higroscópicos en la madera y del bambú, además ocasiona el rompimiento de otros polímeros de bajo peso molecular en la especie (Evans, Urban y Chowdhury, 2008)

2.2.4. Ángulo de exposición

El ángulo de la exposición, a veces llamado "ángulo de inclinación", tiene un impacto significativo en la respuesta de un material al ambiente. El ángulo de inclinación determina la dosis de la radiación solar y la tasa de acumulación de calor en la muestra (Q-Lab Corporation, 2011). Por lo tanto, es necesario tener en consideración el ángulo de inclinación y la dirección de la exposición de la muestra a la radiación (ASTM D1435, 2015).

El ángulo de inclinación también influye en la cantidad de tiempo que la muestra está húmeda debido a la formación de rocío, precipitación, o vientos de secado. (Q-Lab Corporation, 2011).

Se recomienda para la evaluación de material expuesto a la intemperie natural, colocarlos sobre bastidores en ángulos de 0, 45 y 90 grados (Gomes *et al.* 2005) según figura 12, esto dependiendo del uso final del producto pudiendo ser; techos, vigas o viguetas (0°), techos (45°), columnas o muros (90°).

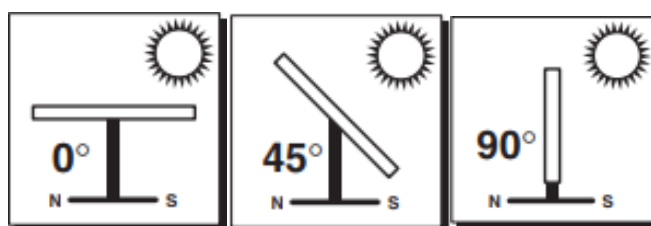


Figura 12: Ángulos de exposición durante el intemperismo.

(a) Ángulo de 0°. (b) Ángulo de 45°. (c) Ángulo de 90°.

FUENTE: Q-Lab Corporation. 2011.

0° (horizontal). Exposiciones horizontales rara vez se utilizan para muestras planas o paneles, porque se prefiere la ligera inclinación de 5 ° para permitir el escurrimiento del agua. Sin embargo, este ángulo es útil para muchas partes tridimensionales y especímenes. También se utiliza para aplicaciones, tales como techos, donde se requiere formación de charcos de agua.

45 ° sur. Este es considerado por muchos como el ángulo típico de la exposición al aire libre y es el ángulo de elección para muchas industrias. Es ampliamente utilizado para los materiales que no tienen un ángulo específico de uso final.

90° sur. Este ángulo vertical fijo es utilizado comúnmente para recubrimientos residenciales. El ángulo de inclinación vertical presenta valores de radiación solar menores con respecto a los otros ángulos, además de temperaturas más bajas, y menor humedad.

2.3. Efecto del Intemperismo sobre las propiedades del bambú

2.3.1. Sobre el Color

Lasso (2019), define el color como una interpretación de las longitudes de onda de la luz emitida o reflejada por un cuerpo y captada por el sistema visual. Esto quiere decir que el color es una sensación que se produce en el cerebro como reacción a la incidencia de los rayos de luz en los ojos. El estímulo físico proviene de cuerpos luminosos que emiten luz y cuerpos iluminados que reflejan parte de la luz que reciben, pero es el cerebro el que produce la percepción mental del color.

La colorimetría es la ciencia que estudia la medición del color desarrollando los métodos para su cuantificación (Santos Espi, 2009), estos métodos se basan específicamente en la geometría y distribuciones espectrales de tres elementos: la fuente de luz, la reflectividad de la muestra y la sensibilidad visual del observador (Otles, 2008). Esta ciencia transforma la percepción sensorial en números, logrando medir, comparar y reproducir los diferentes colores. (Santos Espi, 2009).

Los elementos importantes de la colorimetría se definieron desde 1931, por la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE) y ha sido mejorado a través del tiempo. Inicialmente dichas condiciones fueron: la simulación de la percepción humana del color en un campo de 2° y colores primarios de ajuste (rojo, verde y azul). (Otles, 2008).

Para lograr la representación de los colores, la CIE definió diferentes modelos de color, los cuales son fórmulas matemáticas abstractas que logran describir esa representación. Los modelos de color más conocidos son el RGB y el CMYK, sin embargo, al ser modelos abstractos no sirven para describir un color específico sin haber definido inicialmente la escala o referencia. (International Commission on Illumination, 2004). La CIE como entidad principal de la determinación del color, definió varios sistemas de descripción de colores y ha desarrollado varios conceptos que determinan los procedimientos utilizados actualmente. (Otles, 2008).

Los colorímetros son instrumentos que miden los valores de una forma más directa y funcionan usando tres filtros de color (Capilla Perea, Artigas, Pujol y Ramo, 2002; Lockuán Lavado, 2012), utiliza funciones de igualación del color correspondientes al observador colorimétrico de la CIE. (Capilla Perea *et al.* 2002).

Modelo de color CIELAB

Fue desarrollado por la CIE en el año 1976 para lograr una mejora en la representación del color, se considera el modelo de color más completo, se usa ampliamente para describir los colores que puede percibir el ojo humano (International Commission on Illumination, 2004). El modelo $L^*a^*b^*$ determina el color de acuerdo a la posición en el espacio en tres dimensiones (3D) (Noor, Mokhtar, Rafiqul y Pramod, 2012).

Como se aprecia en la figura 13, el componente L^* corresponde a la luminosidad del color ($L=0$ significa negro, $L=100$ significa blanco), a^* es el croma donde los valores positivos corresponden a rojo y los negativos al color verde, b^* es el tono para este componente los valores positivos corresponden a amarillo y aquellos valores negativos se refieren a azul, a^* y b^* son los dos componentes cromáticos cuyos valores van desde -120 a 120 (León *et al.* 2006), esta representación se puede observar en la figura 12 (Ford y Roberts, 1998; International Commission on Illumination, 2004; Noor *et al.* 2012).

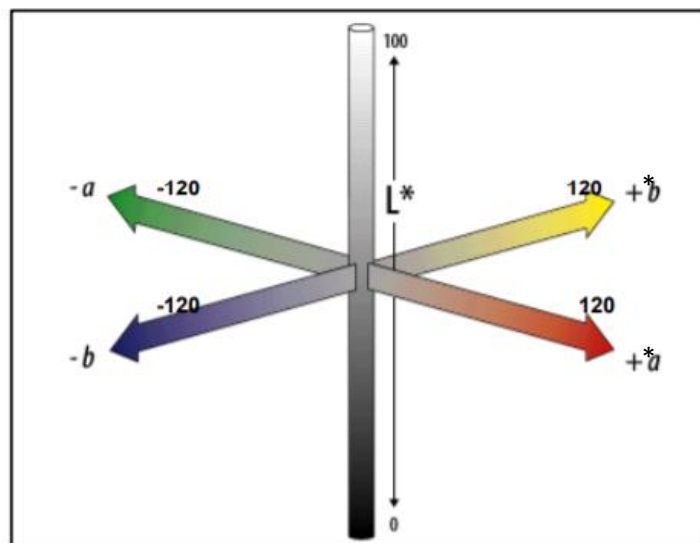


Figura 13: Representación del sistema CIE $L^*a^*b^*$ o CIELAB

FUENTE: Noor *et al.* 2012.

La figura 14, muestra las ecuaciones que representan el sistema CIE LAB, están basadas directamente en el sistema XYZ (Colantoni, 2004).

$$\begin{cases} L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_0} \right)^{\frac{1}{3}} - 16 & \text{si } \frac{Y}{Y_0} > 0,008856 \\ L^* = 903,3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) & \text{si } \frac{Y}{Y_0} \leq 0,008856 \\ a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_0}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) \right] \\ b^* = 500 \left[f\left(\frac{Y}{Y_0}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_0}\right) \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} f(U) = U^{\frac{1}{3}} & \text{si } U > 0,008856 \\ f(U) = 7,787U + \frac{16}{116} & \text{si } U < 0,008856 \end{cases}$$

Figura 14: Ecuaciones que representan el sistema CIE LAB.

FUENTE: Noor *et al.* 2012.

La degradación se evidencia en varios aspectos superficiales, no solo en cambios de color sino también en la pérdida de brillo en la superficie y cambios en la rugosidad del material. (Temiz, Terziev y Eikenes, 2007).

2.3.2. Sobre la Densidad y contenido de humedad

Las propiedades físicas y mecánicas del tallo de bambú están fuertemente correlacionadas con su estructura anatómica como se ha demostrado en muchas investigaciones. (Londoño *et al.*, 2002).

El grosor de la pared, sin embargo, se reduce hacia el ápice (Liese, 1998). Es así que, Rodríguez y Fuentes (2003), mencionan que conforme aumenta la densidad, la magnitud de la erosión o desgaste es menor, lo que se refleja en una mayor resistencia al intemperismo.

La radiación UV durante el intemperismo degrada la lignina, ya que la lignina contiene múltiples sitios que absorben la luz y producen estados excitados que facilitan la formación de radicales libres, los cuales al estar en contacto con el oxígeno producen degradación de la pared celular (Heilner, 2010). Además, algunos autores infieren que la eliminación parcial de lignina junto con la hemicelulosa conduce a la ruptura de enlaces de hidrógeno en la celulosa. (Ming-Fei, Yong-Ming y Feng, 2010).

La degradación de la superficie genera rugosidad, la cual permite mayor absorción de agua y por consiguiente genera mayor deterioro. Además, la lignina en la superficie no se encuentra bien compactada lo cual genera porosidad de esta manera el ingreso del agua se daría más fácilmente en condiciones de alta humedad. (Fuentes, Tran y Dupont-Gillian, 2011).

2.3.3. *Sobre las propiedades mecánicas*

La longitud de la fibra tiene una correlación positiva con el módulo de elasticidad (MOE) y resistencia máxima (RM) en compresión paralela. Se da una correlación positiva entre la longitud de la fibra, el grosor de la pared de la célula y las propiedades mecánicas. (Ghavami y Marinho, 2005).

Bhat, Khalil y Awang (2010), realizaron una evaluación de los efectos del intemperismo por un periodo de 12 semanas (tres meses) a dos especies de Acacia, los resultados mostraron cambio de color a partir de las tres semanas de exposición, disminución de la resistencia a flexión a partir de la primera semana, disminución de la resistencia a la tensión a partir de las tres semanas de exposición. Las imágenes del SEM mostraron la destrucción de la pared celular en particular de las traqueidas que forman este tipo de madera.

A nivel micro-estructural la lámina media es sorpresivamente una estructura débil, y se ha demostrado que a pesar que las fibras estén intactas, la lamela media se afecta de manera importante por procesos térmicos e higroscópicos. Sin embargo se desconoce si la lamela media al momento de la fractura, se ha debilitado por hidrólisis o por alguna reacción química, esto es probable pero no necesaria porque la estructura de la celulosa en la pared celular es más resistente que la lamela media. Cuando exponemos a ciclos de intemperie de humedad y calor a la madera, se observa que la madera tiende a fallar por la lamela media debido al incremento de esfuerzos de algunas partes. (Evans *et al.* 2008).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. Lugar de colección de muestras

Se colectaron tallos de bambú provenientes de una plantación de la especie *Guadua angustifolia* Kunth de cinco años de edad, que se encuentra ubicada en el caserío Limoncito distrito La Florida, provincia de San Miguel, región Cajamarca (Figura 15), cuyas coordenadas son: 6°52'07" latitud Sur; 79°07'24" longitud Oeste y a una altitud de 1 200 m.s.n.m. perteneciente a la cuenca media del Río Zaña, vertiente del pacífico (Llerena 2008); los tallos de bambú fueron dimensionados a 3,00 y 1,50 metros de largo para su fácil transporte. Posteriormente, los tallos fueron trasladados a la Universidad Nacional Agraria la Molina ubicada en el distrito de La Molina, región Lima.



Figura 15: Imagen aérea de lugar de colección y CP La Florida, Cajamarca.

La provincia de San Miguel está conformada por 13 distritos (Figura 16), entre los cuales se encuentra La Florida que cuenta con una superficie de 66,33 km². Limita por el sur con el distrito de Niepos, por el norte con Catache (provincia de Santa Cruz), por el este con el distrito de Calquis y por el oeste con Oyotun (provincia de Chiclayo, región Lambayeque), El suelo predominante presenta una pendiente empinada a muy empinada (rango 25 a 75 por ciento). (Alcántara, 2011).

El clima es húmedo y templado, las lluvias van desde enero a marzo. La temperatura promedio es de 10 a 25 °C (Sainz, 2012). Las cañas de bambú fueron colectadas en la zona de coordenadas 6°52'16" latitud Sur; 79°10'52" longitud Oeste, a 1260 m.s.n.m.

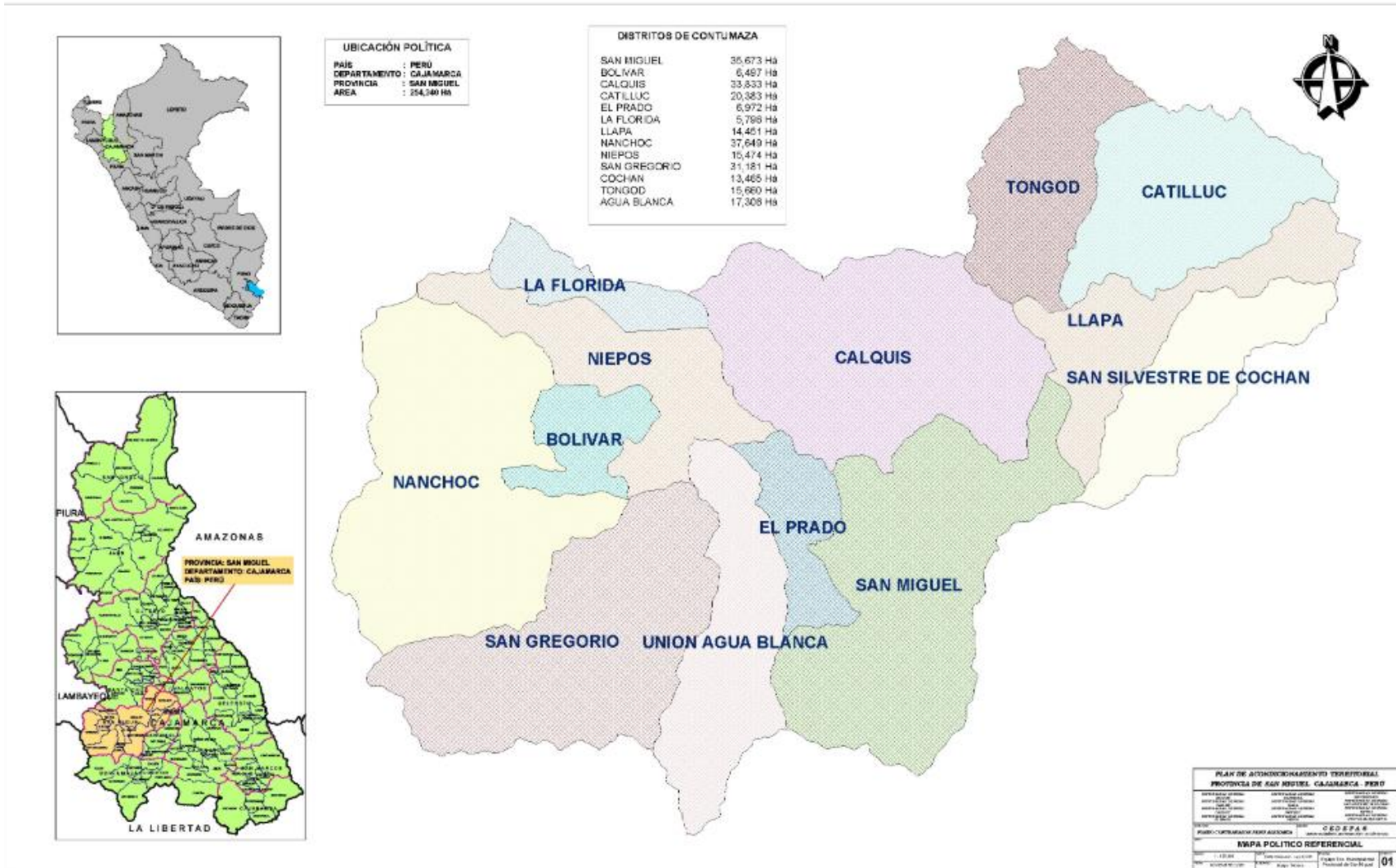


Figura 16: Mapa de ubicación de La Florida - San Miguel – Cajamarca.

FUENTE: Sistema de Información Ambiental Regional de Cajamarca (SIAR), 2013.

2. Lugar de ejecución

La prueba de intemperismo, fue realizada en los exteriores de las instalaciones del Laboratorio de Anatomía de la Madera, las mesas y bastidores empleados en la prueba fueron ubicados en el techo de este laboratorio. En cuanto a los ensayos mecánicos, fueron llevados a cabo en el Laboratorio de Tecnología de la madera, perteneciente a la Facultad de Ciencias Forestales de la UNALM – La Molina: 12°04'42.49" latitud Sur; 76°56'46,00" longitud Oeste; altitud 245 m.s.n.m.

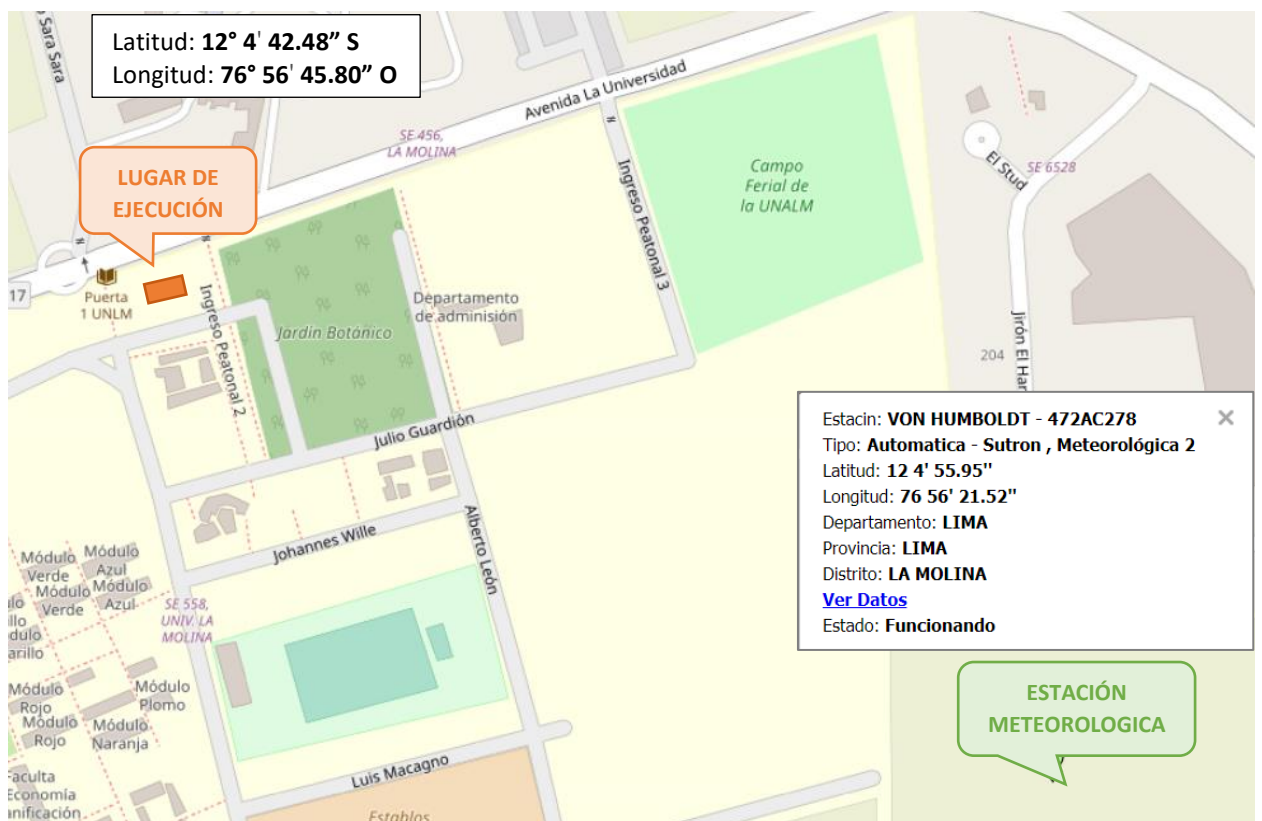


Figura 17: Ubicación de la estación meteorológica Von Humboldt – La Molina SENAMHI.

La figura 17, muestra la ubicación del área donde se realizó la prueba de intemperismo (Laboratorio de Anatomía de la madera) y la estación meteorológica Von Humboldt que registró las condiciones climáticas del distrito durante el periodo de exposición.

3. Materiales y equipos

3.1. Materia prima

Los tallos de bambú *Guadua angustifolia* Kunth de cinco años, provenientes de La Florida-Cajamarca, fueron transportados a la UNALM – La Molina, en secciones de 3,00 y 1,50 metros de largo, estos fueron recepcionados en la Facultad de Ciencias Forestales específicamente en el taller de laminado de bambú del Circulo de Investigación del Bambú (CIB). Para elaborar las probetas se dimensionaron y cortaron según los ensayos físicos y mecánicos correspondientes, teniendo un total de 228 probetas.

3.2. Equipos y herramientas

Para la colección de muestras:

- Libreta de campo, lápices, plumón indeleble y etiquetas.
- Wincha de 10 metros.
- Sierra de arco.
- Balanza romana electrónica CAMRY con 50 kg de capacidad y 50 g de precisión.

Para la elaboración de probetas:

- Wincha JB-79 (5m/16').
- Plumón indeleble, lápices 2B.
- Ingletadora telescópica DEWALT, modelo DWS780, diámetro de disco 12", potencia 2,5 HP.
- Machete.
- Sierra circular o de disco REXON modelo SM – 10L, diámetro de disco 10", potencia 2,5 HP.
- Sierra radial DEWALT modelo DW721K, diámetro de disco 12", potencia 2,5 HP.
- Sierra cinta.

Para el ensayo de intemperismo:

- Tres mesas de madera con dimensiones 0,7 x 0,7 x 1,2 m y superficie de malla metálica.
- Dos mesas de madera, dimensiones 0,8 x 1,2 x 1,2 m y superficie de malla metálica.

- Tres bastidores de madera, con un ángulo de 45 °C con respecto a la horizontal, con dimensiones 0,7 x 1,4 x 1,2 m y superficie de malla metálica.
- Malla metálica de acero galvanizado.
- Alambre de acero galvanizado N° 16.
- Escalera metálica y papel periódico.

Para los ensayos físico-mecánicos:

- Balanza electrónica BMR-53 con 3 kg de capacidad y 1 g de precisión.
- Colorímetro portátil Lovibond (Datacolor LC 100).
- Higrómetro Bentech GM 610.
- Vernier digital Mitutoyo con 0,02 mm de precisión.
- Desecador de sílicagel.
- Prensa Universal Tinius Olsen con 60000 lb de capacidad, accesorios y deflectómetro con 1” (2,54 cm) de carrera y 0,001” (0,00254 cm) de precisión.
- Horno eléctrico, P Selecta para secado 103 ± 2 °C.

4. Métodos y procedimientos

Se procedió de acuerdo al diagrama de flujo indicado en la figura 18.

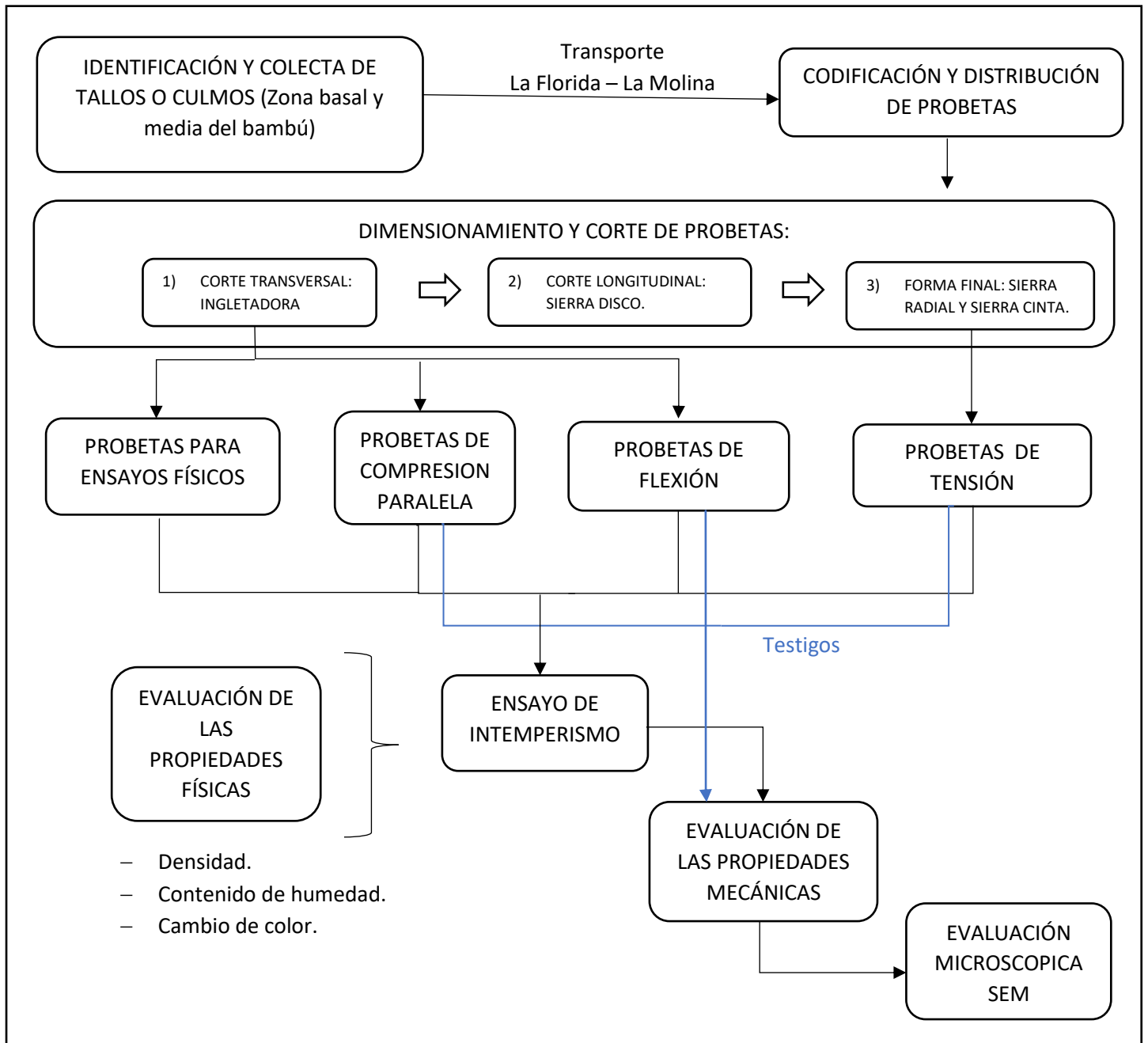


Figura 18: Diagrama de flujo de la metodología a seguir para el presente estudio.

4.1. Identificación y colecta de tallo o culmos

La recolección de muestras se realizó, durante el aprovechamiento de cañas de *Guadua angustifolia* Kunth, en la plantación de La Florida – Cajamarca (Ver figura 19). En primer lugar se hizo un recorrido por la plantación identificando las cañas maduras y procediendo a su marcado. Las muestras que se recolectaron corresponden a la zona basal y media del tallo de las guaduas de cinco años en la plantación, las cuales alcanzan la madurez entre los cuatro y seis años (Cruz, 2009); las cañas maduras son reconocidas debido a que en esta etapa el tallo cambia de coloración a una tonalidad amarillenta y generalmente aparecen manchas de color blanco o gris. (Proyecto CORPEI-CBI, 2003).



Figura 19: Cañas de *G. angustifolia* recolectadas en La Florida, Cajamarca.

Luego de recolectar las cañas se procedió a cortarlas, con una sierra de arco, en secciones de 3,00 y 1,50 metros de largo, se pesaron, fueron cargadas al camión y posteriormente transportadas a la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima.

4.2. Codificación y distribución de probetas

Se realizó la codificación, dimensionado y distribución de las probetas en las cañas obtenidas según Figura 20.

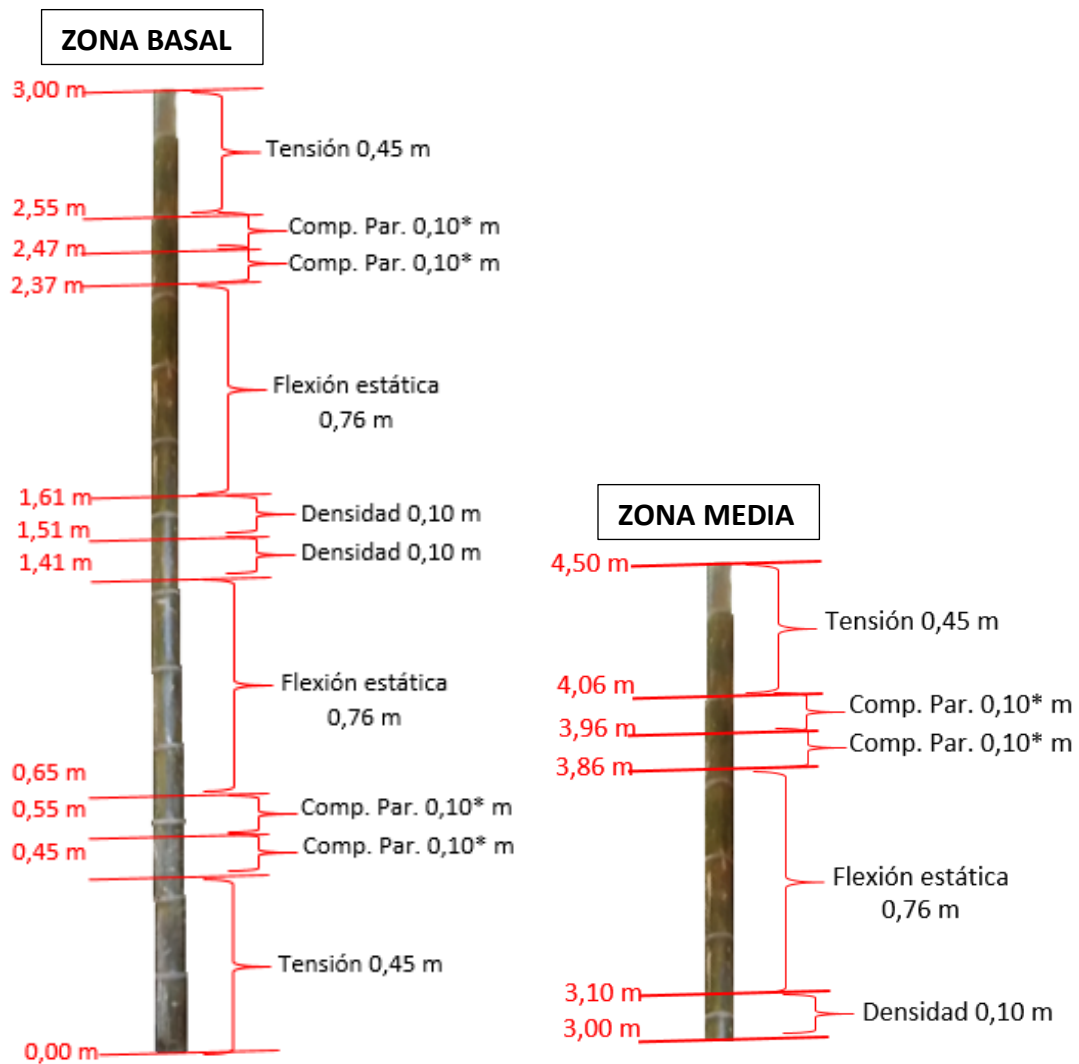


Figura 20: Esquema de ubicación de probetas en el tallo.

Las probetas para compresión paralela y propiedades físicas se tomaron considerando la presencia o ausencia de nudo (Tabla 15). Para los ensayos mecánicos (Tensión y Flexión estática) las probetas fueron libres de nudos en la zona de ensayo (Norma ISO/DIS- 22157).

Tabla 15: Tamaño de muestras y distribución de probetas para ensayos físico-mecánicos.

| Ensayos | Zona Basal | | Zona Media | | Total |
|----------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|
| | Con nudo | Sin nudo | Con nudo | Sin nudo | |
| Propiedades físicas | 12 | 12 | 12 | 12 | 48 |
| Compresión paralela | 15 | 15 | 15 | 15 | 60 |
| Flexión estática | ----- | 30 | ----- | 30 | 60 |
| Tensión | ----- | 30 | ----- | 30 | 60 |
| Total | 27 | 87 | 27 | 87 | 228 |

4.3. Dimensionamiento y corte de probetas

Luego de determinar las medidas de las probetas, se procedió a cortar transversalmente las cañas con la ingletadora para obtener las longitudes necesarias de las probetas (Figura 21).



Figura 21: Uso de ingletadora telescópica para elaboración de probetas.

En la figura 22, se aprecia el proceso de elaboración de las probetas para tensión, se hicieron cortes longitudinales con la sierra disco (1), obteniéndose seis secciones longitudinales del tallo (2), a las cuales se les retiró los nudos con un machete (3); posteriormente, estas secciones fueron cortadas con la sierra radial (4) y sierra cinta para darle la forma final a las probetas. (Figura 23 (3)).

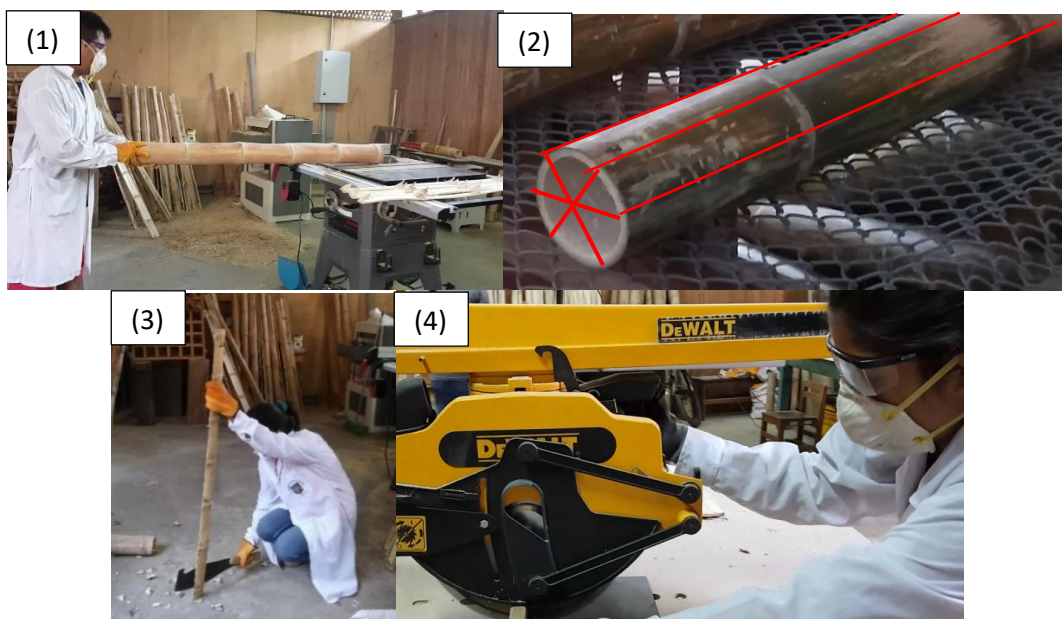


Figura 22: Elaboración de probetas para el ensayo de tensión.

Finalmente se obtuvieron las probetas para los ensayos físicos y mecánicos como se observa en la figura 23.



(1) Probetas para ensayos físicos y para el ensayo de compresión paralela, (2) Probetas para ensayo de flexión estática, (3) Probetas para ensayo de tensión.

Figura 23: Probetas para los ensayos físico-mecánicos.

4.4. Ensayo de intemperismo

El ensayo de intemperismo o tratamiento de envejecimiento natural, se ejecutó durante seis meses (05 junio – 04 diciembre del 2017), este ensayo fue realizado de acuerdo a la norma ASTM D1435 empleada para materiales plásticos, sin embargo, con modificaciones puede ser empleado para otros materiales (Nascimento, 2003). Los factores ambientales que tuvieron incidencia fueron: radiación UV, temperatura y humedad, y las variables de ensayo: zona del tallo (basal y media) y ángulo de inclinación (0° , 45° y 90°).

Se consideraron como probetas testigo, a las muestras que no fueron sometidas a la prueba de intemperismo, de modo que se pueda evaluar la influencia de la exposición a los factores climáticos en los ensayos mecánicos.

4.4.1. Tamaño de muestra y tiempo de exposición.

Se evaluaron en total 228 probetas de caña de bambú *Guadua angustifolia*, siendo 48 probetas para los ensayos físicos y 180 probetas para los mecánicos, distribuidas como se muestra en la tabla 16, teniendo en consideración realizar 12 pruebas por ensayo como mínimo según lo indicado en la norma, se adicionaron un 30 por ciento (cuatro probetas) por ángulo para la prueba de intemperismo por cada ángulo de inclinación; este adicional fue para evitar pérdidas por rajaduras por debajo del número mínimo de probetas a ensayar. Considerando el ensayo previo al intemperismo (testigo), resultando un total de 60 probetas por cada ensayo mecánico (compresión paralela, flexión estática, tensión).

Tabla 16: Distribución y número probetas para los ensayos físicos y mecánicos.

| Variables dependientes | Variables independientes | | | | | | | | Total | |
|------------------------|--------------------------|----|-------------------------------|----|-----|----|-----|----|-------|------------|
| | Sin intemperismo | | Inclinaciones en intemperismo | | | | | | | |
| | | | 0° | | 45° | | 90° | | | |
| Ensayos | B | M | B | M | B | M | B | M | | |
| Físicos | 0 | 0 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 48 |
| Mecánicos | 18 | 18 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 24 | 180 |
| | TOTAL | | | | | | | | | 228 |

B: zona basal, M: zona media del tallo.

4.4.2. Ángulo de exposición

Los ángulos de exposición a la intemperie de las probetas fueron de 0°, 45° y 90°, con respecto a la horizontal (Ver figura 24). El número de probetas fueron distribuidas según la tabla 16.



Dónde: (1) Probetas a 0° respecto a la horizontal, (2) Probetas a 45° respecto a la horizontal, (3) Probetas a 90° respecto a la horizontal.

Figura 24: Ángulos de exposición de las probetas, en el lugar de ejecución.

4.4.3. Procedimiento.

Se utilizaron cinco mesas y tres bastidores de madera, recubiertas con esmalte y laca con una superficie de malla metálica.

Las muestras se colocaron en un ambiente limpio y acondicionado para que el ensayo de intemperismo, este libre de interferencias. El lugar fue el área de un techo con la descripción antes mencionada, ubicada en la UNALM, La Molina. (Ver Figura 17).

Se colocaron las mesas y bastidores en dirección al Sur y se aseguraron firmemente para que no fueran afectadas por el viento. Las probetas fueron codificadas, marcadas, pesadas, medidas y analizadas con el colorímetro antes de la exposición para tener los datos base del ensayo y se trasladaron al lugar de exposición. (Ver Figura 25). Finalmente, las probetas fueron sujetadas sobre las mallas de las mesas y bastidores, con alambre de acero galvanizado, para evitar que el viento las mueva o caigan por efecto de su propio peso.



Figura 25: Acondicionamiento de mesas y caballetes para el ensayo de intemperismo.

Se evaluaron las propiedades físicas cada 14 días durante el periodo de intemperismo, también se empleó el colorímetro para obtener las coordenadas de color de las probetas.

4.4.4. Condiciones climatológicas.

Los datos de las condiciones climatológicas fueron proporcionados por las oficinas de atención al cliente del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). La estación utilizada fue Von Humboldt ubicada en La Molina (Figura 17), los valores obtenidos durante el periodo de exposición se presentan en la tabla 17.

Los factores climatológicos considerados en las evaluaciones fueron: temperatura máxima y mínima diaria, en (°C); humedad relativa diaria en (%) y precipitación diaria, en (mm). Los rangos de valores de irradiación según los periodos considerados para Lima se observan en la tabla 18.

Tabla 17: Valores climatológicos del 2017, para La Molina - Lima.

| Meses | Temperatura (C°) | | | Humedad relativa (%) | PP (mm) | |
|------------------|------------------|--------------|--------------|----------------------|---------------|-----------------|
| | Prom. | Max. | Min. | | | |
| Enero | 24,61 | 29,31 | 21,01 | 69,01 | 4,00 | |
| Febrero | 25,42 | 30,69 | 21,25 | 66,56 | 3,00 | |
| Marzo | 25,51 | 30,43 | 21,67 | 68,02 | 5,00 | |
| Abril | 22,47 | 27,64 | 18,76 | 74,07 | 0,90 | |
| Mayo | 20,07 | 30,06 | 17,54 | 78,11 | 2,10 | |
| Junio | 17,51 | 20,51 | 15,88 | 81,51 | 2,50 | |
| Julio | 16,76 | 20,28 | 14,80 | 78,53 | 1,10 | |
| Agosto | 15,71 | 19,44 | 17,82 | 81,61 | 3,90 | |
| Setiembre | 15,65 | 19,42 | 13,56 | 82,36 | 4,60 | |
| Octubre | 17,02 | 22,50 | 13,77 | 78,23 | 0,30 | |
| Noviembre | 17,82 | 22,74 | 14,50 | 76,17 | 0,30 | |
| Diciembre | 19,99 | 24,35 | 16,65 | 76,33 | 275,90 | |
| Promedio | 19,88 | 24,78 | 17,27 | 75,88 | 303,60 | PP total |

FUENTE: SENAMHI – Estación Von Humboldt, La Molina.

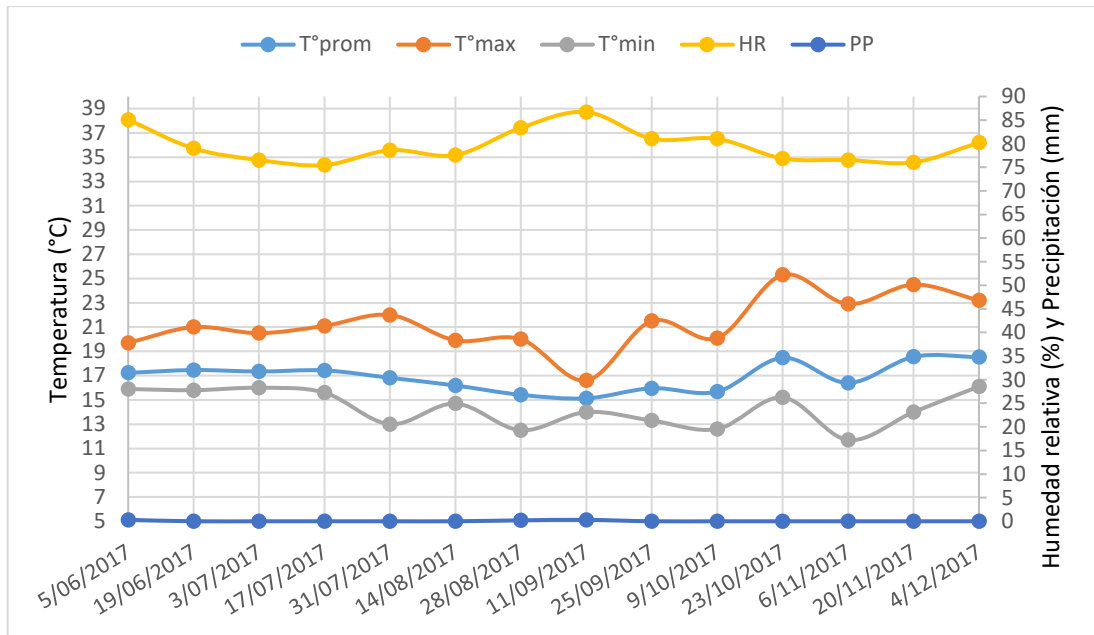
Tabla 18: Valores de irradiación UV para Lima (La Molina).

| Meses | Irradiancia (kWh/m ²) |
|--------------------------|-----------------------------------|
| Febrero – Julio | 5,0 – 5,5 |
| Agosto – Octubre | 4,5 – 5,0 |
| Noviembre – Enero | 6,0 – 6,5 |

FUENTE: SENAMHI/DGER-MEM, 2014.

En la figura 26, se presenta los parámetros ambientales de temperatura, humedad relativa y precipitación registrados durante el periodo de exposición en la prueba de intemperismo a las probetas de bambú en el distrito de La Molina.

El ensayo inició el 05 de junio del 2017 y culminó el 04 de diciembre del 2017.



Dónde: (T°prom) temperatura promedio, (T°máx) temperatura máxima, (T°mín) temperatura mínima y (HR%) Humedad relativa, (PP) precipitación.

Figura 26: Datos climáticos de La Molina del 05 de junio al 04 de diciembre del 2017.

FUENTE: Adaptado del Senamhi 2017.

En la figura 26, se puede observar que, la humedad relativa fluctúa entre 75 a 87 por ciento, siendo los meses de julio y noviembre los que presentaron menores valores para el periodo evaluado, mostrando valores por debajo del 80 por ciento, por otra parte, el mes de septiembre presento el mayor valor de humedad relativa durante los seis meses evaluados del 2017.

En cuanto a la temperatura, se registraron los mayores valores en los meses de octubre y noviembre, siendo el rango de temperatura promedio de 15,13 a 18,55 °C, para los seis meses evaluados. Por otra parte, la menor temperatura promedio fue registrada en el mes de setiembre.

4.5.Evaluación de las propiedades físico mecánicas.

Los ensayos correspondientes a cada una de las propiedades evaluadas, se realizaron según las siguientes normas ISO y ASTM.

- ISO/TC 165 N314 - ISO/DIS-22157-1. “Determination of physical and mechanical properties of bamboo”
- ISO/TC 165 N315- ISO/DIS-22157-2. “Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo”
- ASTM 143 -14. “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”

4.5.1. Codificación.

En la tabla 19 se presentan las codificaciones de las probetas expuestas a la prueba de intemperismo, que son empleadas en el análisis de las propiedades físico-mecánicas.

Tabla 19: Codificación de las probetas.

| Código | Zona del tallo | Ensayo | Presencia de nudo |
|-------------|----------------|------------------------|-------------------|
| BCN | Basal | Propiedades físicas | Nudo |
| BCS | | | Sin nudo |
| MCN | Media | | Nudo |
| MCS | | | Sin nudo |
| BC'N | Basal | Compresión paralela | Nudo |
| BC'S | | | Sin nudo |
| MC'N | Media | | Nudo |
| MC'S | | | Sin nudo |
| BF | Basal | Flexión estática | ----- |
| MF | Media | | ----- |
| BT | Basal | Tensión | ----- |
| MT | Media | | ----- |

4.5.2. Ensayos físicos

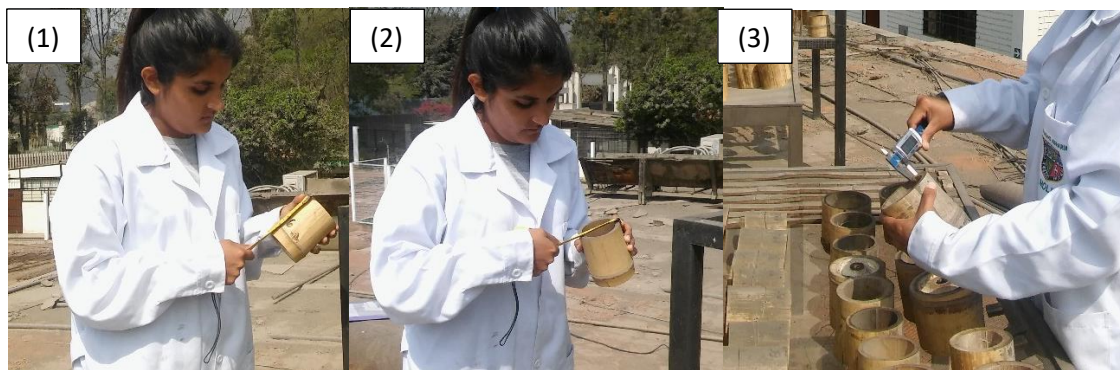
La evaluación de las propiedades físicas se realizó cada 14 días, según las fechas indicadas en la tabla 20.

Tabla 20: Fechas de evaluación de las propiedades físicas durante el ensayo de intemperismo.

| N° evaluación | Día | Mes | Año |
|---------------|-----|------------|------|
| 1 | 05 | Junio | 2017 |
| 2 | 19 | | |
| 3 | 03 | Julio | |
| 4 | 17 | | |
| 5 | 31 | | |
| 6 | 14 | Agosto | |
| 7 | 28 | | |
| 8 | 11 | Septiembre | |
| 9 | 25 | | |
| 10 | 09 | Octubre | |
| 11 | 23 | | |
| 12 | 06 | Noviembre | |
| 13 | 20 | | |
| 14 | 04 | Diciembre | |

– **Densidad**

Para la densidad se obtuvo tanto el peso como el volumen de las probetas; para lo cual se realizaron mediciones de las dimensiones de la longitud, diámetro superior e inferior con una wincha y el espesor de pared con un vernier digital (Ver figura 27); según lo establecido por la norma ISO/TC165N315 - ISO/DIS- 22157-2, fueron evaluadas probetas de 10 centímetros de longitud con diámetros variables de siete a 11 centímetros. En el caso de las probetas con nudos se debe considerar el volumen de los mismos. El peso de las probetas se obtuvo mediante el uso de la balanza electrónica BMR-53.



Dónde: (1) Medición de longitud, (2) Probetas a 45 grados de exposición, (3) Probetas a 90 grados de exposición.

Figura 27: Evaluación periódica de las probetas durante el periodo de intemperismo.

- **Densidad seca al aire (DSA):** Es la relación entre el peso seco al aire y el volumen seco al aire. Sirve para determinar el peso propio de los elementos de guadua:

$$DSA = \frac{Psa}{Vsa}$$

Donde:

Psa: Peso seco al aire

Vsa: Volumen seco al aire

– **Contenido de humedad:**

En cuanto al contenido de humedad, se empleó un higrómetro para su medición en probetas para ensayo físicos, realizándose tres medidas por probeta para el contenido de humedad promedio.

La fórmula para determinar el contenido de humedad en las probetas para ensayos mecánicos, es la siguiente:

$$CH = \frac{(P1 - P2) * 100}{P2}$$

Donde:

P1: Peso de la muestra en estado natural.

P2: Peso de la muestra seca al horno durante 24 horas a 110° aprox.

El contenido óptimo para su uso estructural es menor del 25 por ciento, y máxima permisible del 30 por ciento.

– **Colorimetría.**

Se hizo uso del colorímetro Lovibond LC 100, para evaluar periódicamente el cambio de color de las probetas evaluadas con referencia a un estándar establecido previo al intemperismo, de esta manera poder cuantificar la variación de color.

Las mediciones se realizaron en el mismo lugar marcado para cada muestra y en la cara expuesta a los rayos solares. El colorímetro registraba directamente los valores de a*, b* y L*. Según el sistema CIELAB, la variación del color durante el tiempo de exposición se calcula utilizando la siguiente fórmula:

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^2 + \Delta a^2 + \Delta b^2}$$

Evaluación defectos

Además, se realizó una revisión visual para identificar los siguientes defectos:

- Huecos de insectos.
- Rastros de moho.
- Puntos o líneas negras.
- Grietas y Rajaduras.

En la figura 28, se observa el estado de las probetas a los 168 días de intemperismo, correspondiente a la penúltima evaluación del 20 de noviembre del 2017.



Figura 28: Probetas durante prueba de intemperismo (168 días = 20 de Nov.)

4.5.3. Ensayos mecánicos.

- **Compresión paralela a las fibras.**

Según la norma ISO/TC165 N315 - ISO/DIS- 22157-2 “Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo”, las probetas para compresión paralela a las fibras fueron de forma cilíndrica donde la longitud fue de la misma dimensión que el diámetro; las cañas presentan diámetros de siete a 11 centímetros. La velocidad de ensayo fue de 0,6 mm/min.

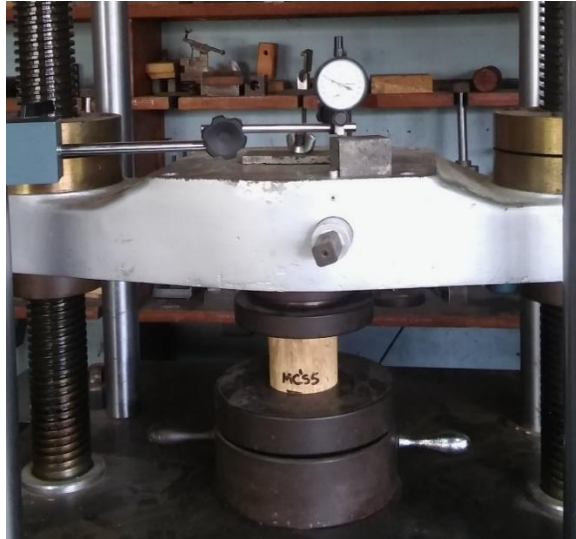


Figura 29: Ensayo de compresión paralela de *G. angustifolia*.

Se emplearon las siguientes fórmulas para el cálculo de los resultados:

$$RM = \frac{F_{\text{ult.}} \text{ (N)}}{A \text{ (mm}^2\text{)}} = \text{N/mm}^2 = \text{MPa}$$

$$MOE = \frac{F_{\text{lim.}} \text{ (N)} \times L \text{ (mm)}}{A \text{ (mm}^2\text{)} \times \delta \text{ (mm)}} = \frac{\text{N/mm}^2}{1\ 000} = \text{GPa}$$

Donde:

RM = Resistencia máxima.

MOE = Módulo de elasticidad.

F_{ult} = Carga máxima o de ruptura.

A = Área sección transversal.

F_{lim} = Carga al límite proporcional.

L = Largo de la probeta.

δ = Deflexión o deformación al límite proporcional.

– **Flexión estática.**

Para el caso de las probetas de flexión estática, la norma ISO/TC165 N315 - ISO/DIS-22157-2, indica que la longitud de las probetas debe ser 30 veces el diámetro, por lo que en promedio se requería tres metros de longitud para dichas probetas; al tener cañas dimensionadas de 1,50 metros, se modificó según la norma ASTM 143 -14/245-252 “Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber”, con una longitud de 76 centímetros para cada probeta con diámetros variables de siete a 11 centímetros.



Figura 30: Ensayo de flexión estática de *G. angustifolia*.

Para el cálculo de los resultados se utilizó las siguientes formulas:

$$\text{MOR} = \frac{F_{\text{ult.}} (\text{N}) \times L (\text{mm}) \times R (\text{mm})}{4 \times I_B^4 (\text{mm}^4)} = \text{N/mm}^2 = \text{MPa}$$

$$\text{MOE} = \frac{F_{\text{lim.}} (\text{N}) \times L (\text{mm})}{3. \pi \times (D^4 - d^4) \times \delta \times 1000} = \text{GPa}$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura.

MOE = Módulo de elasticidad.

F_{ult} = Carga máxima o de ruptura.

L = Luz de la probeta.

R = Radio promedio.

I_B = Momento de inercia.

δ = Deflexión o deformación al límite proporcional.

F_{lim} = Carga al límite proporcional.

D = Diámetro externo promedio.

d = Diámetro interno promedio.

– **Tensión.**

Las probetas de tensión según indica la norma ISO/TC165 N315 - ISO/DIS- 22157-2, pueden ser de tres tipos siendo dos de estos en forma de cuña y el tercero un listón de bambú unido con extremos de madera, se ha observado que la zona del internudo presenta mayor resistencia a la tensión que cuando presenta nudo; por lo cual se optó por realizar los ensayos únicamente en zonas que no presentan nudos para obtener valores máximos de resistencia a la tensión. Se realizaron modificaciones a la probeta N°1 tipo cuña de la norma ISO/DIS- 22157-2, en cuanto al tamaño de las probetas según la norma ASTM 143 -14 (Figura 31).

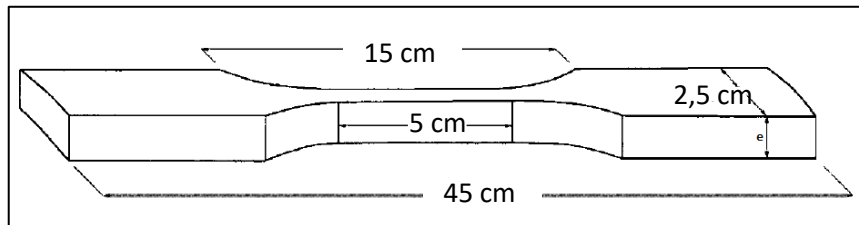


Figura 31: Pieza de ensayo de forma de cuña para ensayos de tensión.

FUENTE: Norma ISO/DIS- 22157-2 modificada según norma ASTM 143 -14.



Figura 32: Ensayo de tensión de *G. angustifolia*.

$$\text{MOR} = \frac{F_{\text{ult.}} (\text{N})}{A (\text{mm}^2)} = \text{N/mm}^2 = \text{MPa}$$

$$\text{MOE} = \frac{F_{\text{lim.}} (\text{N}) \times L (\text{mm})}{A (\text{mm}^2) \times \delta (\text{mm}) \times 1\,000} = \text{GPa}$$

Donde:

MOR = Módulo de ruptura.

MOE = Módulo de elasticidad.

F_{ult} = Carga máx.

A = Área sec. Transversal.

F_{lim} = Carga al límite proporcional.

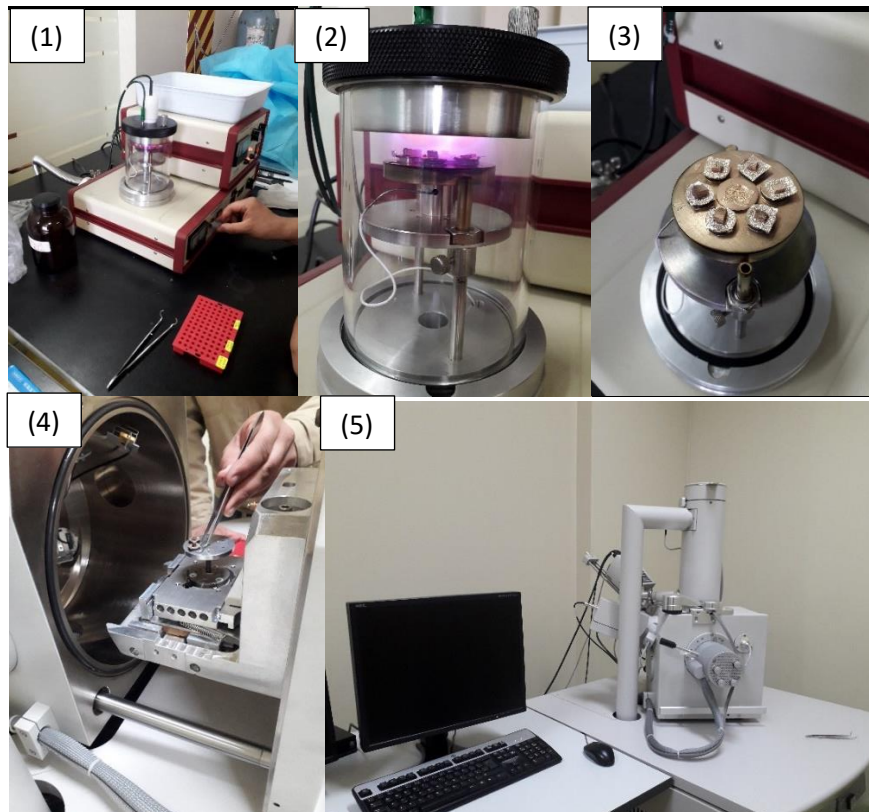
L = Luz de la probeta.

δ = Deflexión o deformación al límite proporcional.

4.5. Evaluación microscópica SEM: Scanner electronic microscopy.

Se realizó mediante el uso del microscopio electrónico de barrido del Laboratorio de equipamiento Especializado de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM, para obtener imágenes SEM de las probetas sometidas a la prueba de intemperismo. En la figura 33, se aprecia el procedimiento realizado, las muestras fueron obtenidas de las probetas de tensión considerando una muestra por formulación, por lo que se obtuvieron ocho muestras en total, cortes transversales de dimensiones 3x3x2 mm, ubicadas cerca a la falla del ensayo y próximas a la corteza.

Para el acondicionamiento previo de las muestras se colocaron en estufa a 35°C, de esta manera se evita humedad en las muestras ya que disminuye la calidad de imagen, adicionalmente se recubrió la muestra con una película fina de oro con un espesor de 10 a 25 nm. El mecanismo para realizar este recubrimiento consiste en una fuente de alimentación en corriente continua regulable de uno a tres kV, conectada a una tarjeta de oro y por otra parte al portamuestras. El conjunto va acoplado a una bomba al vacío que introduce argón haciendo que sus átomos impacten en la lámina y se desprendan átomos de oro que cubrirán las muestras (1), (2) y (3) figura 29. Finalmente las muestras metalizadas son colocadas en el microscopio electrónico de barrido (4) y (5) figura 29.



Dónde: (1) Equipo para realizar la metalización de las muestras, (2) Proceso de metalización o bañado en oro, (3) Muestras metalizadas recubiertas de oro, (4) Ubicación de muestras metalizadas en el microscopio electrónico de barrido, (5) Microscopio electrónico de barrido.

Figura 33: Proceso de metalización y microscopia electrónica de muestras de *G. angustifolia*.

5. Diseño experimental y análisis estadístico.

El análisis estadístico, se realizó mediante el Diseño Completo al Azar (DCA) con un arreglo factorial de 2x4: zona del tallo del bambú (Z) y ángulo de exposición (A). Se realizaron un total de seis ensayos incluyendo el de variación de color empleando el colorímetro, en el cual se realizaron cuatro repeticiones. Por otra parte se consideraron ocho repeticiones para los ensayos de contenido de humedad, densidad, flexión estática, compresión paralela y tensión. En la Tabla 21 se aprecia el diseño experimental de los tratamientos empleados.

Se utilizó el análisis de variancia (ANVA), para determinar la significancia de los efectos de los tratamientos, considerando el diseño estadístico planteado, un intervalo de confianza del 95 por ciento.

Además, se utilizó la prueba Tukey para la comparación múltiple de medias. Finalmente se procesaron los datos con ayuda del programa InfoStat. Los valores obtenidos en el análisis se muestran en los anexos.

Tabla 21: Diseño experimental de los tratamientos empleados en el análisis estadístico de las propiedades físico-mecánicas en el tallo de bambú.

| Variables | | | Propiedades Físico - Mecánicas | | | | | |
|-----------------|----------------------|-------------------|--------------------------------|----------|----------------------|---------------------|------------------|---------|
| Zona en la caña | Angulo de exposición | Tratamientos | Color | Densidad | Contenido de humedad | Compresión paralela | Flexión estática | Tensión |
| Basal | S.I. | B _{S.I.} | --- | --- | --- | 6 | 6 | 6 |
| Basal | 0° | B0 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Basal | 45° | B45 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Basal | 90 | B90 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Media | S.I. | M _{S.I.} | --- | --- | --- | 6 | 6 | 6 |
| Media | 0° | M0 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Media | 45° | M45 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Media | 90 | M90 | 4 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

Dónde: S.I. Sin intemperismo.

El modelo estadístico del DCA con arreglo factorial, fue el siguiente:

$$Y_{ijl} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijl}$$

Donde:

Y_{ijl} : Efecto en las propiedades físicas o mecánicas para el i-ésimo zona del tallo de bambú para el j-ésimo ángulo de exposición.

μ : La media general.

α_i : Efecto del i-ésimo zona del tallo de bambú.

β_j : Efecto de la j-ésimo ángulo de exposición.

$(\alpha\beta)_{ij}$: Efecto de la interacción doble de la zona del tallo de bambú y el ángulo de exposición.

l: Número de repeticiones.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Características físicas

1.1. Variación del color

El cambio de color ΔE , según el sistema CIELAB, involucra las coordenadas de color L^* , a^* y b^* (Ver Anexo 2). Siendo la luminosidad o aclaramiento (L^*) más perceptible por el ojo humano (X-rite, 2002). En la figura 34 se presentan la variación de los valores de L^* , se observa una ligera disminución lineal en el aclaramiento de las muestras tanto en las muestras de la zona basal como en las de la zona media, la mayor gradiente de disminución se dio en aquellas muestras expuestas a 0 grados de inclinación, esto pudo ser influenciado a las partículas contaminantes suspendidas en el aire (polución).

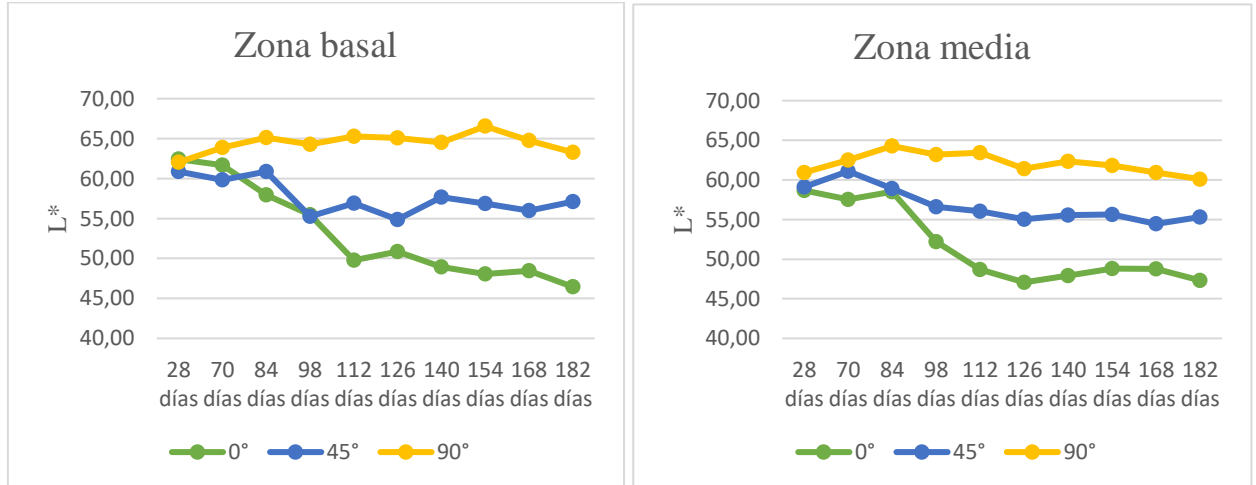


Figura 34: Valores de L^* de las probetas de bambú durante el intemperismo.

La disminución de L^* , indica un oscurecimiento parcial en las probetas, además se observa de igual manera una disminución en los componentes cromáticos a^* y b^* , siendo que tiende al color verde en el caso de a^* por presentar valores negativos, por otra parte, en el caso de b^* a pesar de haber disminuido siguen presentando valores positivos lo cual indicaría que se encuentran próximos al color amarillo. Este cambio producido en la luminosidad se debe a

la exposición de rayos UV, generando oscurecimiento en la superficie de la guadua. (Temiz *et al.* 2007).

Estos cambios en la superficie además reflejan cambios químicos producidos en los componentes de la guadua durante la foto degradación (Santamaría, 2012), este cambio de color podría ser atribuido al grupo carbonilo conjugado con cetonas, aldehídos y quininas, mediante la modificación de la lignina y otros componentes de la guadua. (Temiz *et al.* 2007).

La tabla 22, muestra los resultados promedio de las variaciones de color de las muestras del tallo de bambú, luego de seis meses de intemperismo. De igual manera, la tabla 23 presenta valores de análisis de variancia y en la tabla 24 se observan los valores de comparación múltiple de medias resultantes de la prueba de Tukey.

Tabla 22: Resultados promedio y desviaciones estándares de las variaciones de color de las probetas de *G. angustifolia*.

| Codificación | Zona | Ángulo | Variación de color (ΔE) |
|------------------|-------|--------|-----------------------------------|
| | | | X, [s] |
| BC ₀ | Basal | 0 | 26,5 [2,5] |
| MC ₀ | Media | 0 | 22,6 [4,0] |
| BC ₄₅ | Basal | 45 | 10,5 [2,9] |
| MC ₄₅ | Media | 45 | 10,5 [4,3] |
| BC ₉₀ | Basal | 90 | 7,9 [2,3] |
| MC ₉₀ | Media | 90 | 6,4 [3,0] |

Dónde: (X) promedio, [s] desviación estándar.

Tabla 23: Análisis de variancia de los resultados de color de las probetas de *G. angustifolia*.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Variación de color (AE) | |
|------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------|
| | | p-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,1918 | N.S. |
| A | 2 | <0,0001 | ** |
| Z*A | 2 | 0,4998 | N.S. |
| C.V. | | | 23,15 |

Dónde: (Z) efecto principal del factor de la zona del tallo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación durante la exposición, (Z*A) efecto de la doble interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo, (*) significativo, (**) muy significativo.

Tabla 24: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para variación de color en probetas de *G. angustifolia*.

| VARIABLES | Color (ΔE) | | |
|-----------------------|----------------------|------------|------------|
| | B | M | |
| Zona del tallo | | | |
| Media | 14,94 | 13,14 | |
| Tukey | A | A | |
| Angulo | 0° | 45° | 90° |
| Media | 24,51 | 10,48 | 7,14 |
| Tukey | A | B | B |

Dónde: (ΔE) Variación de color, (B) zona basal del tallo, (M) zona media del tallo, (A y B) indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

En la tabla 22, se observa que los valores promedio para cambio de color (ΔE), en probetas expuestas a 0 grados de inclinación que corresponden a la zona basal del tallo fue de 26,5; por otra parte, con el mismo ángulo de inclinación pero de la zona media del tallo se observa un valor promedio de 22,6. En cuanto a las probetas con ángulo de exposición de 45 grados, se muestran valores promedio iguales de 10,5, tanto para aquellas probetas de la zona basal como para la zona media. Por último se obtuvieron valores promedios inferiores para cambio de color en probetas que fueron expuestas a 90 grados de inclinación, obteniendo valores de 7,9 y 6,4 para aquellas que pertenecen a la zona basal y zona media, respectivamente.

De la tabla 23, se puede observar que la variable de mayor influencia para la variación de color fue el ángulo de inclinación, esto fue corroborado por la prueba de Tukey que se presenta en la tabla 24, donde la desigualdad de medias se presenta en las variables de ángulo de inclinación, mostrando así, que el ángulo de 0 grados presenta significancia en comparación a los ángulos de 45 y 90 grados.

En la figura 35, se presenta la variación del color (ΔE) de las probetas de *G. angustifolia*, durante los 182 días de intemperismo, teniendo las variables independientes como: zona del tallo, presencia de nudo y ángulo de exposición. Se observa que los primeros 28 días de intemperismo no se registran cambios de color significativos. Sin embargo, se debe mencionar que a los 112 días, se evidencia una diferencia en la influencia del ángulo con respecto a la variación de color, siendo el ángulo de 0 grados de inclinación el que presenta el mayor aumento. Se aprecia también que la variación de color aumentó a medida que el tiempo de intemperismo fue prolongado. (Ver anexo 2).

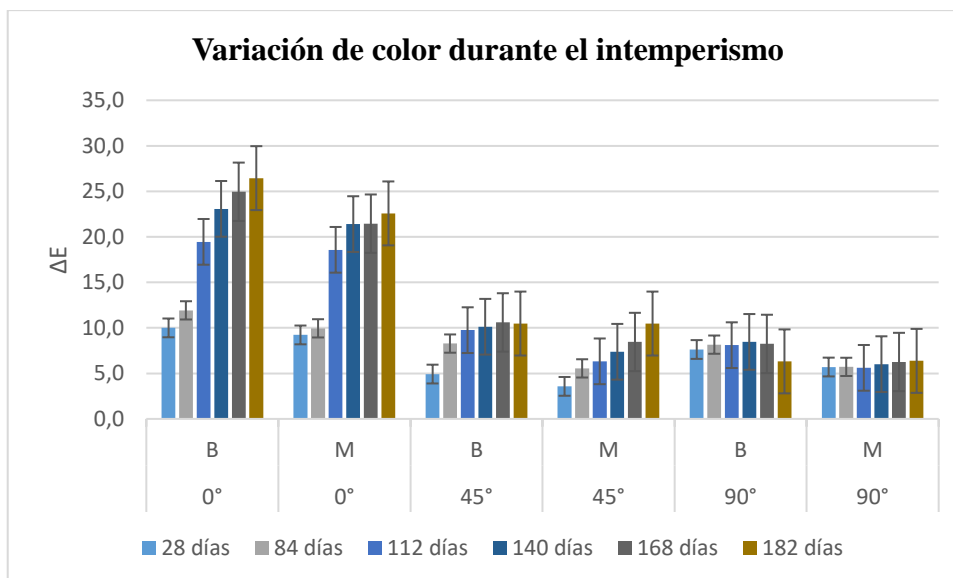
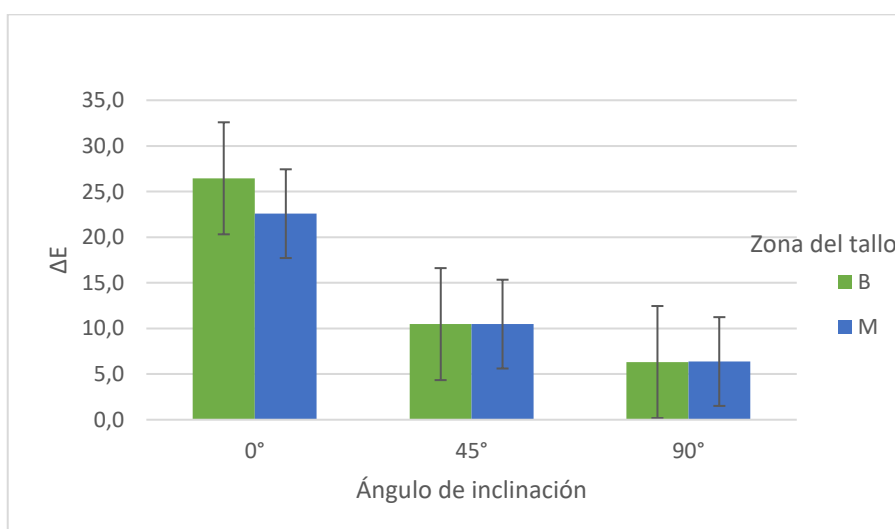


Figura 35: Variación de color de las probetas de bambú durante el periodo de intemperismo.

Además, en la figura 36, se representa la variación del color (ΔE) final de las muestras de bambú, luego de 182 días de exposición a la intemperie, teniendo en cuenta el ángulo de exposición y zona del tallo. Se observa una diferencia de variación de color presentando un mayor valor promedio final para las muestras de la zona basal con ángulo de exposición de 0 grados, al finalizar el tiempo de intemperismo.

Los mayores valores en el cambio de color, se presentaron en aquellas muestras con 0 grados de inclinación en la prueba de intemperismo. De otro lado se observa que en los ángulos de 45 y 90 grados la variación de color presento valores menores a 10, sin mostrar diferencias entre la zona basal y zona media del tallo.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 36: Variación del color de las probetas de bambú al final del intemperismo.

En el estudio realizado por Wang y Ren (2008), se evaluó la degradación a nivel de la superficie del bambú moso (*Phyllostachys edulis*) por medio de espectroscopia FT-IRn, indicando entre otros resultados, un alto contenido de xilano el cual conforma en un 90 por ciento la hemicelulosa del bambú. También se observa que en las superficies hay procesos de foto-oxidación.

Por otro lado, en estudios realizados en la superficie de madera, indican que la lignina es susceptible a la foto-degradación y de-polimerización debido a la foto-irradiación. (Upreti y Pandey, 2005).



Figura 37: Probetas expuestas a intemperismo que presentan ataque de hongos e insectos (1), grietas (2).

Por lo que defectos como: grietas, rajaduras, presencia de insectos, hongos y moho (Figura 37), están relacionados al manejo post cosecha que se realizó y los cuidados del culmo en el transporte, Álvarez (2012) considera que estos defectos reducen la vida útil del tallo progresivamente hasta en 10 años.

1.2.Contenido de humedad.

Al evaluar periódicamente el contenido de humedad en las probetas expuestas en la prueba de intemperismo, se obtuvieron las figuras 38 y 39, donde se aprecia el comportamiento de la pérdida y ganancia de humedad en las muestras. Para ambas figuras se observa una tendencia similar, siendo los meses de agosto y setiembre aquellos que presentaron mayor contenido de humedad, lo cual es corroborado por la figura 26, donde se tiene que el mes con mayor humedad relativa fue setiembre, ya que se encuentra durante el periodo de invierno en el hemisferio sur.

El contenido de humedad en las muestras estudiadas fluctuó entre los ocho a 18,2 por ciento, durante el periodo de intemperismo, al iniciar la prueba de intemperismo dichas muestras se

encontraban alrededor del 12 por ciento de contenido de humedad y finalizaron alrededor del 10 por ciento, mostrando así una pérdida de humedad hasta en un dos por ciento durante los seis meses que duró la prueba a pesar de la ganancia en los meses de mayor humedad relativa.

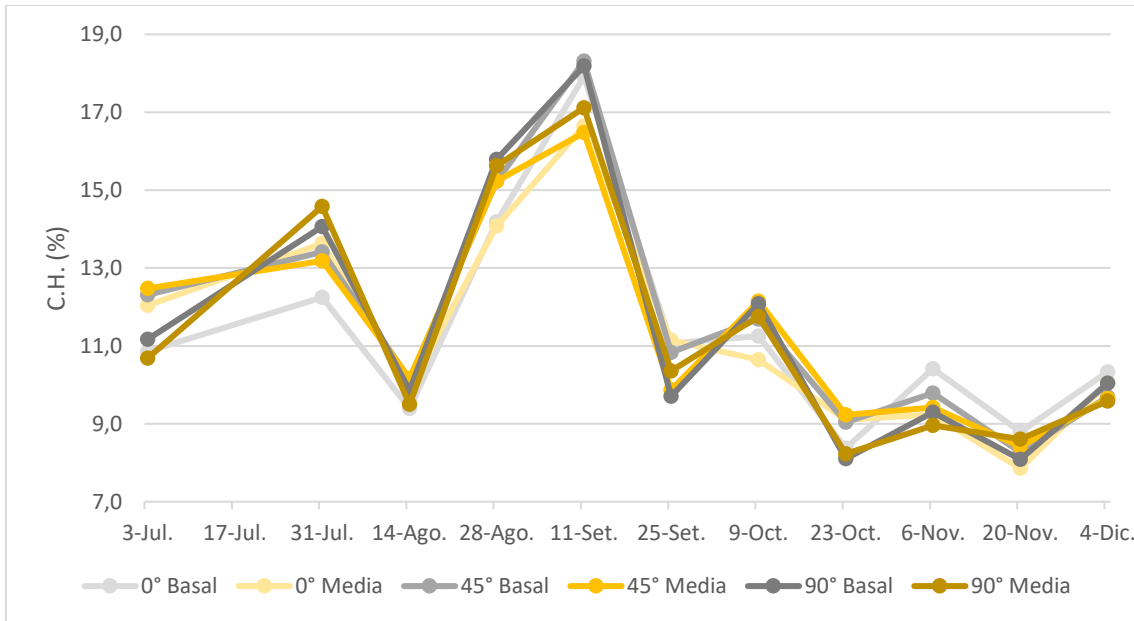


Figura 38: Variación del contenido de humedad durante el intemperismo según el ángulo de exposición y zona del tallo.

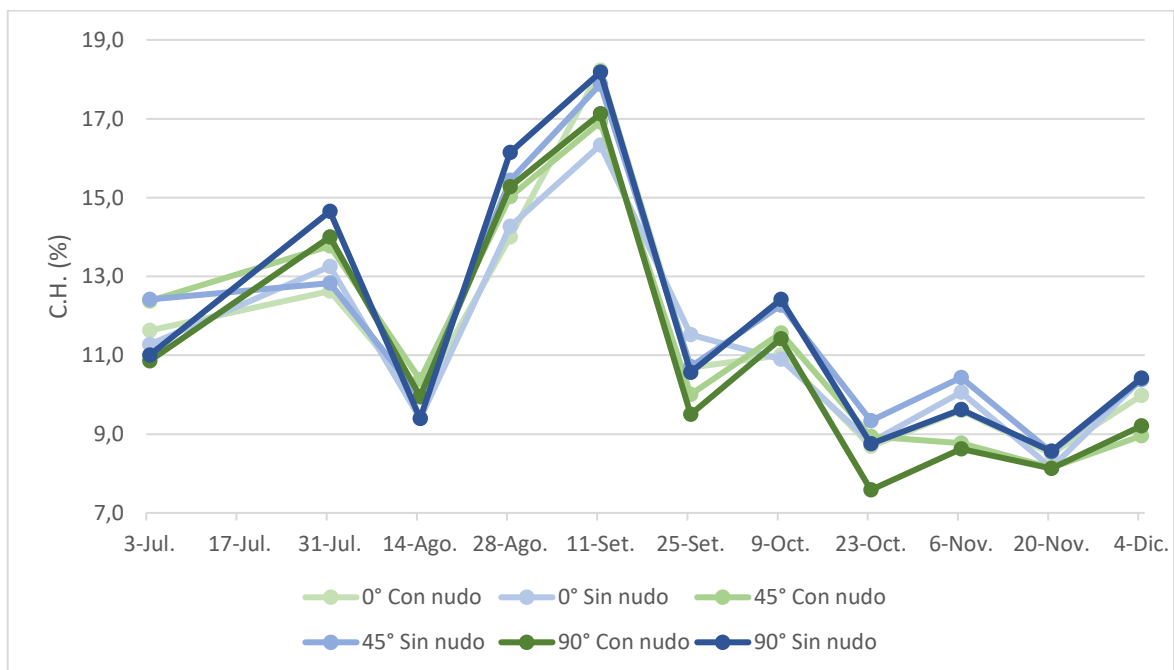


Figura 39: Variación del contenido de humedad durante el intemperismo según el ángulo de exposición y presencia del nudo.

La tabla 25, muestra los resultados promedios del contenido de humedad luego del periodo de intemperismo según las variables de estudio, donde se aprecia que los valores se encuentran entre el ocho al 11 por ciento. Asimismo, se aprecia una clara diferencia entre aquellas muestras con presencia y ausencia de nudo, presentando valores menores las que presentan nudo. En la tabla 26, se presenta información que corrobora lo antes mencionado, mostrando que la única variable que tiene una influencia muy significativa es la presencia o ausencia de nudo, lo cual fue contrastado con la prueba Tukey en la figura 27.

Tabla 25: Resultados promedio y desviaciones estándar del contenido de humedad.

| Codificación | Ángulo de inclinación (°) | Zona del tallo | Presencia de nudo | Contenido de humedad (%) |
|--------------------|---------------------------|----------------|-------------------|--------------------------|
| | | | | X, [s] |
| BC ₀ N | 0 | Basal | Con nudo | 10,63 [1,71] |
| BC ₀ S | 0 | Basal | Sin nudo | 10,04 [1,02] |
| MC ₀ N | 0 | Media | Con nudo | 9,33 [1,34] |
| MC ₀ S | 0 | Media | Sin nudo | 10,75 [1,48] |
| BC ₄₅ N | 45 | Basal | Con nudo | 8,79 [1,09] |
| BC ₄₅ S | 45 | Basal | Sin nudo | 10,58 [1,06] |
| MC ₄₅ N | 45 | Media | Con nudo | 9,13 [0,48] |
| MC ₄₅ S | 45 | Media | Sin nudo | 10,17 [0,73] |
| BC ₉₀ N | 90 | Basal | Con nudo | 9,79 [0,75] |
| BC ₉₀ S | 90 | Basal | Sin nudo | 10,29 [0,50] |
| MC ₉₀ N | 90 | Media | Con nudo | 8,63 [1,09] |
| MC ₉₀ S | 90 | Media | Sin nudo | 10,54 [1,04] |

Dónde: (X) promedio, [s] desviación estándar.

Tabla 26: Análisis de variancia de los resultados de contenido de humedad.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Contenido de humedad | |
|------------------------|---------------------------|----------------------|---------------|
| | | p-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,3985 | N.S. |
| N | 1 | 0,0025 | ** |
| A | 2 | 0,3937 | N.S. |
| Z*N | 1 | 0,1656 | N.S. |
| Z*A | 2 | 0,8789 | N.S. |
| N*A | 2 | 0,3899 | N.S. |
| Z*N*A | 2 | 0,1721 | N.S. |
| C.V. | | | 10,93 |

Dónde: (Z) efecto principal de la zona del tallo, (N) efecto principal de la presencia de nudo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación, (Z*N), (Z*A), (N*A) efecto de la doble interacción, (Z*N*A) efecto de la triple interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo, (**) muy significativo.

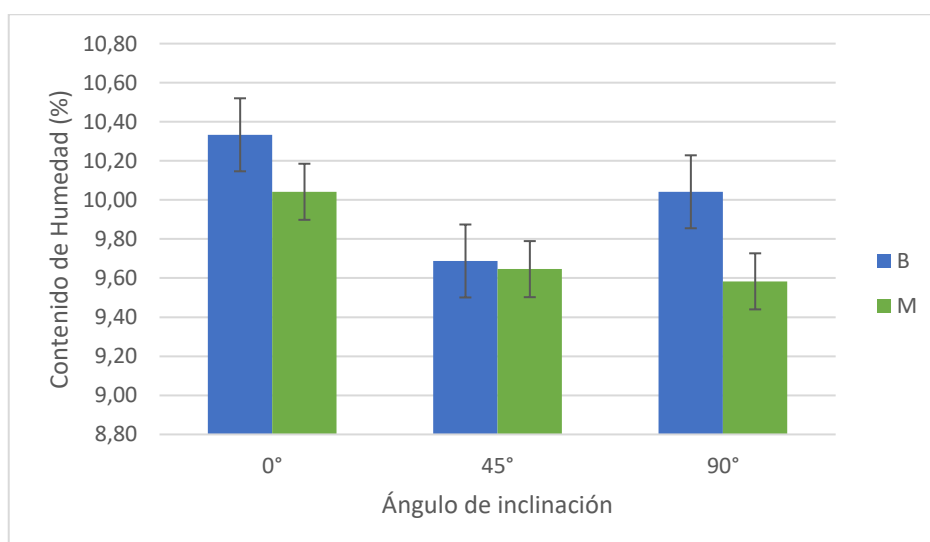
Tabla 27: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para el contenido de humedad.

| VARIABLES | Contenido de humedad (%) | | |
|--------------------------|--------------------------|------------|------------|
| Zona del tallo | B | M | |
| Media | 10,02 | 9,75 | |
| Tukey | A | A | |
| Presencia de nudo | Con | Sin | |
| Media | 9,38 | 10,4 | |
| Tukey | A | B | |
| Ángulo | 0° | 45° | 90° |
| Media | 10,18 | 9,67 | 9,81 |
| Tukey | A | A | A |

B: zona basal del tallo, M: zona media del tallo, S.I.: Sin intemperismo, A, B y C: indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

En la figura 40, se puede observar que la zona basal presentó mayor contenido de humedad luego del periodo de intemperismo, sin embargo, esta diferencia no fue significativa como se aprecia en la tabla 27, por otra parte el ángulo que presentó mayor contenido de humedad fue el de 0 grados de inclinación según la figura 40, siendo mínima la diferencia si consideramos que la escala de la figura 41, es menor a la de la figura 40.

De la figura 41, se aprecia la diferencia de contenido de humedad en relación a la presencia o ausencia de nudo que fue mencionada anteriormente, la otra variable independiente que es el ángulo de inclinación no presentó diferencias significativas por lo que no se considera de mayor influencia.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 40: Contenido de humedad de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según zona del tallo.

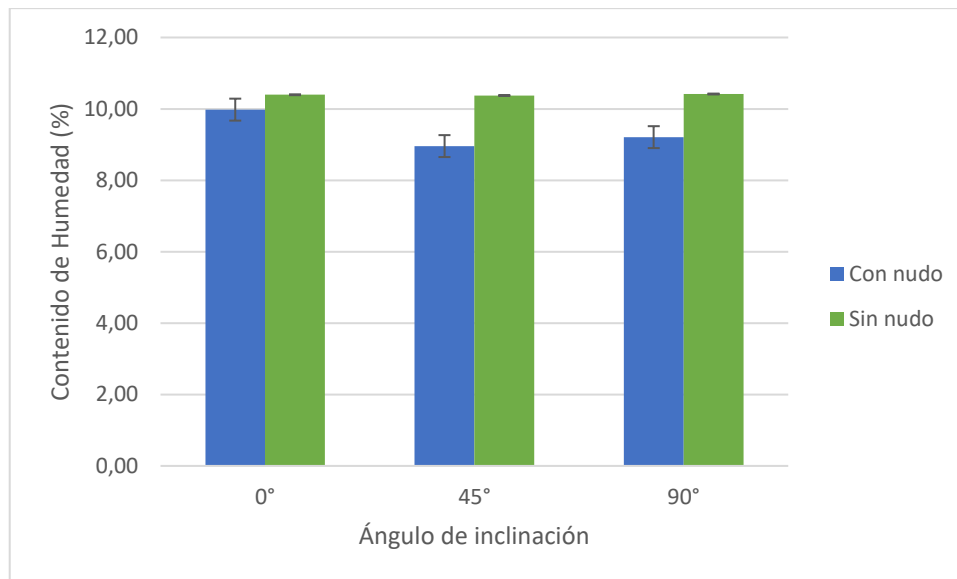


Figura 41: Contenido de humedad luego de las probetas de seis meses de intemperismo en La Molina, según presencia de nudo.

Los resultados presentados por Gutiérrez, Bonilla, Cruz y Quintero (2018), demuestran que el PSF de la *G. angustifolia* se encuentra alrededor del 34 por ciento de contenido de humedad, por lo que valores entre 10 a 34 por ciento, tienen influencia en la variación de las propiedades mecánicas. Esta relación que existe entre el contenido de humedad y sus propiedades mecánicas fue corroborada en varias investigaciones, mostrando que un alto valor de humedad disminuye la resistencia mecánica de la guadua, siendo el caso del estudio presentado por González, Montoya y Rubiel (2008) y Gutiérrez *et al.* (2018), para el ensayo de compresión paralela.

1.3.Densidad seca al aire.

Los valores considerados en la tabla 28, muestran los promedios de densidad de las muestras luego del periodo de intemperismo, estos valores se encuentran en el rango de 0,57 a 0,72 g/cm³. De la tabla 29, se puede observar que la única variable que fue significativa fue la zona del tallo, lo cual es corroborado por el análisis de la prueba de Tukey mostrado en la tabla 30, que los menores valores fueron aquellos de las muestras de la zona basal, por otra parte se puede apreciar que el valor promedio de aquellas muestras sin presencia de nudo poseen un valor ligeramente menor, sin embargo, este no es significativo.

Sin embargo, corresponde hacer el análisis cuando el valor promedio de densidad para probetas sin nudo llega a ser mayor en relación a aquellas con nudo, como en el caso de la zona basal a 0 grados de inclinación, la zona media a 45 grados y la zona basal a 90 grados,

en referencia a esto Cely *et al.* (2012), presentan valores de densidad seca de 0,58 y 0,51 g/cm³ para muestras de la zona basal sin nudo y con nudo, respectivamente; en el caso de las muestras para la zona media muestran valores de 0,79 y 0,71 g/cm³ para aquellas sin nudo y con nudo, respectivamente.

Tabla 28: Resultados promedio y desviaciones estándar de densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo.

| Codificación | Ángulo de inclinación (°) | Zona del tallo | Presencia de nudo | Densidad seca al aire (g/cm ³) | Contenido de Humedad (%) |
|--------------------|---------------------------|----------------|-------------------|--|--------------------------|
| | | | | X, [s] | |
| BC ₀ N | 0 | Basal | Con nudo | 0,60 [0,05] | 10,6 |
| BC ₀ S | 0 | Basal | Sin nudo | 0,62 [0,02] | 10,0 |
| MC ₀ N | 0 | Media | Con nudo | 0,65 [0,12] | 9,3 |
| MC ₀ S | 0 | Media | Sin nudo | 0,65 [0,02] | 10,8 |
| BC ₄₅ N | 45 | Basal | Con nudo | 0,66 [0,05] | 8,8 |
| BC ₄₅ S | 45 | Basal | Sin nudo | 0,59 [0,02] | 10,6 |
| MC ₄₅ N | 45 | Media | Con nudo | 0,66 [0,03] | 9,1 |
| MC ₄₅ S | 45 | Media | Sin nudo | 0,68 [0,08] | 10,2 |
| BC ₉₀ N | 90 | Basal | Con nudo | 0,57 [0,14] | 9,8 |
| BC ₉₀ S | 90 | Basal | Sin nudo | 0,61 [0,02] | 10,3 |
| MC ₉₀ N | 90 | Media | Con nudo | 0,72 [0,09] | 8,6 |
| MC ₉₀ S | 90 | Media | Sin nudo | 0,61 [0,05] | 10,5 |

Dónde: (X) promedio, [s] desviación estándar.

Tabla 29: Análisis de variancia de los resultados de densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Densidad seca al aire | |
|------------------------|---------------------------|-----------------------|---------------|
| | | p-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,0121 | * |
| N | 1 | 0,4065 | N.S. |
| A | 2 | 0,6913 | N.S. |
| Z*N | 1 | 0,5034 | N.S. |
| Z*A | 2 | 0,7239 | N.S. |
| N*A | 2 | 0,5722 | N.S. |
| Z*N*A | 2 | 0,0418 | * |
| C.V. | | | 11,09 |

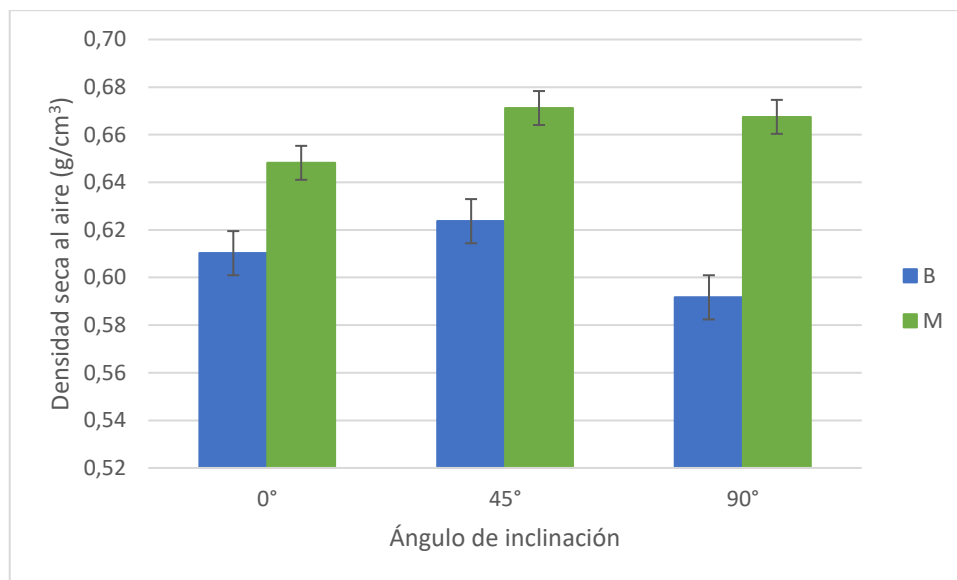
Dónde: (Z) efecto principal de la zona del tallo, (N) efecto principal de la presencia de nudo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación, (Z*N), (Z*A), (N*A) efecto de la doble interacción, (Z*N*A) efecto de la triple interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo, (*) significativo.

Tabla 30: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la densidad seca al aire, luego del periodo de intemperismo.

| VARIABLES | Densidad seca al aire (g/cm ³) | | |
|--------------------------|---|------------|------------|
| | B | M | |
| Zona del tallo | | | |
| Media | 0,61 | 0,66 | |
| Tukey | A | B | |
| Presencia de nudo | Con | Sin | |
| Media | 0,64 | 0,63 | |
| Tukey | A | A | |
| Ángulo | 0° | 45° | 90° |
| Media | 0,63 | 0,65 | 0,63 |
| Tukey | A | A | A |

B: zona basal del tallo, M: zona media del tallo, S.I.: Sin intemperismo, A, B y C: indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

La figura 42, muestra la diferencia significativa anteriormente mencionada para la variable de la zona del tallo, además se puede apreciar que el ángulo de exposición donde existe una mayor diferencia entre ambas zonas del tallo fue en el ángulo de inclinación de 90 grados. Por otro lado, en la figura 43 se observa que los mayores valores son aquellos de las probetas que presentaron nudos, siendo que el ángulo de exposición de 45 grados mostró el mayor valor promedio registrado.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 42: Densidad seca al aire de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según zona del tallo.

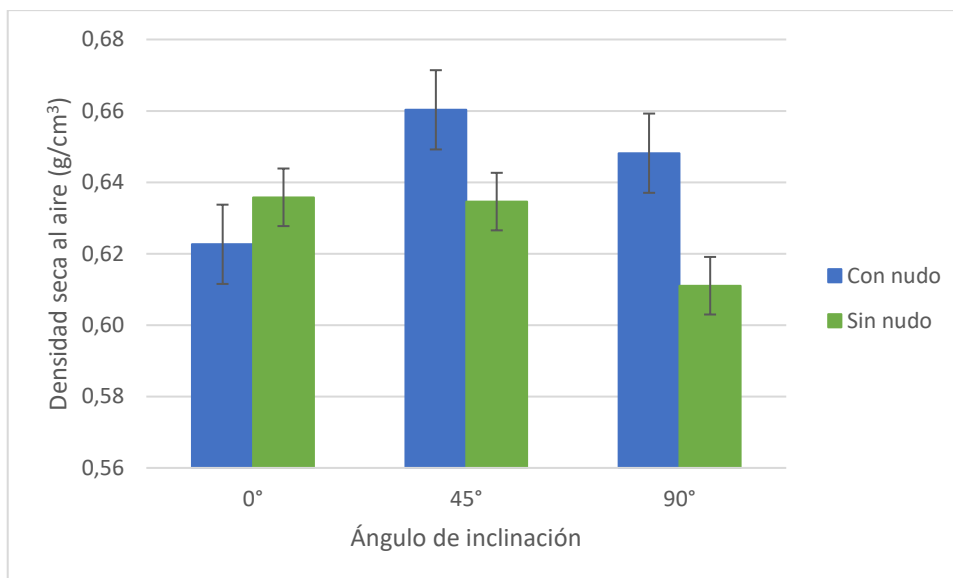


Figura 43: Densidad seca al aire de las probetas luego de seis meses de intemperismo en La Molina, según presencia de nudo.

Factores como la edad del tallo o lugar de procedencia tienen influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas, como en el caso de la densidad, Londoño *et al.* (2002), encontraron para culmos de guadua que en los entrenudos más bajos el espesor del culmo es mucho mayor, contrariamente el contenido de fibra y densidad son menores.

El tallo se puede considerar como un sistema modular. Variables como diámetro y espesor de pared disminuyen con la altura, mientras que la densidad básica y la longitud entre nudos aumentan. (Uribe y Durán, 2002).

Se tienen los valores de la composición lignocelulósica presentados por Cesare *et al.* (2018), de muestras de *G. angustifolia* provenientes de La Florida, donde se tiene 24,95 por ciento de lignina y 45,42 por ciento de holocelulosa. Siendo que la densidad, está asociada a la morfología de la fibra en función de los contenidos de lignina y celulosa según lo mencionado por Toshihiro, Sonoda, Ito y Shibata (1998).

Mayor espesor en el culmo representa por lo tanto mayor biomasa y seguramente mayor contenido de lignina, como es el caso de la zona basal. Por otra parte, Mosquera, Cortes y Niño (2008), encontraron los mayores valores de lignina para culmos de guadua entre cuatro y cinco años de edad, adicionalmente, la densidad de la fibra o paredes celulares más gruesas, podrían ser debidas principalmente a la procedencia y condiciones de sitio durante su crecimiento.

2. Propiedades mecánicas.

Los ensayos mecánicos realizados fueron: compresión paralela a las fibras, flexión estática y tensión o tracción. El contenido de humedad de las probetas durante los ensayos presentó valores de 11 a 12 por ciento en promedio.

2.1. Compresión paralela.

En la tabla 31, se presentan los resultados promedio obtenidos en los ensayos de compresión paralela del tallo del bambú, luego de seis meses de intemperismo. En la tabla 32, se presentan los valores del análisis de variancia y en la tabla 33 los valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey.

Tabla 31: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de compresión paralela.

| Codificación | Ángulo de inclinación (°) | Zona del tallo | Presencia de nudo | Compresión paralela | | Contenido de Humedad (%) |
|--------------------|---------------------------|----------------|-------------------|---------------------|--------------|--------------------------|
| | | | | RM (MPa) | MOE (GPa) | |
| | | | | X, [s] | X, [s] | |
| BCN | S.I. | Basal | Con nudo | 36,16 [4,73] | 10,02 [7,74] | 11,5 |
| BCS | S.I. | Basal | Sin nudo | 30,98 [4,51] | 13,08 [9,79] | 11,8 |
| MCN | S.I. | Media | Con nudo | 38,66 [5,23] | 7,66 [3,47] | 11,7 |
| MCS | S.I. | Media | Sin nudo | 34,63 [6,73] | 10,65 [5,34] | 12,0 |
| BC ₀ N | 0 | Basal | Con nudo | 37,30 [4,27] | 6,31 [3,12] | 11,7 |
| BC ₀ S | 0 | Basal | Sin nudo | 40,38 [1,88] | 9,32 [3,06] | 11,9 |
| MC ₀ N | 0 | Media | Con nudo | 36,34 [1,13] | 7,39 [1,26] | 12,8 |
| MC ₀ S | 0 | Media | Sin nudo | 39,76 [6,73] | 6,37 [3,28] | 11,9 |
| BC ₄₅ N | 45 | Basal | Con nudo | 35,04 [2,71] | 4,14 [2,97] | 12,3 |
| BC ₄₅ S | 45 | Basal | Sin nudo | 37,78 [10,51] | 6,06 [5,27] | 11,6 |
| MC ₄₅ N | 45 | Media | Con nudo | 31,51 [9,84] | 9,17 [3,78] | 11,9 |
| MC ₄₅ S | 45 | Media | Sin nudo | 38,24 [5,60] | 5,71 [2,31] | 11,9 |
| BC ₉₀ N | 90 | Basal | Con nudo | 37,84 [3,43] | 4,59 [1,65] | 12,3 |
| BC ₉₀ S | 90 | Basal | Sin nudo | 32,91 [3,29] | 3,28 [1,25] | 11,1 |
| MC ₉₀ N | 90 | Media | Con nudo | 36,86 [3,03] | 5,55 [3,00] | 11,0 |
| MC ₉₀ S | 90 | Media | Sin nudo | 38,56 [2,84] | 7,58 [2,97] | 12,0 |

Dónde: (X) promedio, [s] desviación estándar, (S.I.) Sin intemperismo.

Tabla 32: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de compresión paralela.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Compresión paralela | | | |
|------------------------|---------------------------|---------------------|---------------|-----------|---------------|
| | | RM (MPa) | | MOE (GPa) | |
| | | p-valor | Significancia | p-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,5869 | N.S. | 0,6995 | N.S. |
| N | 1 | 0,7590 | N.S. | 0,3974 | N.S. |
| A | 3 | 0,3660 | N.S. | 0,0143 | * |
| Z*N | 1 | 0,2894 | N.S. | 0,4696 | N.S. |
| Z*A | 3 | 0,5943 | N.S. | 0,2793 | N.S. |
| N*A | 3 | 0,0974 | N.S. | 0,6711 | N.S. |
| Z*N*A | 3 | 0,8473 | N.S. | 0,4292 | N.S. |
| C.V. | | 14,84 | | 57.05 | |

Dónde: (Z) efecto principal del factor de la zona del tallo, (N) efecto principal de la presencia de nudo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación, (Z*N), (Z*A), (N*A) efecto de la doble interacción, (Z*N*A) efecto de la triple interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo, (*) significativo.

Tabla 33: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de compresión paralela.

| VARIABLES | Compresión paralela a la fibra | | | | | | | |
|--------------------------|--------------------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|
| | RM (MPa) | | | | MOE (GPa) | | | |
| Zona del tallo | B | M | | | B | M | | |
| Media | 36,13 | 36,74 | | | 7,01 | 7,60 | | |
| Tukey | A | A | | | A | A | | |
| Presencia de nudo | Sin | Con | | | Sin | Con | | |
| Media | 36,82 | 36,05 | | | 7,69 | 6,93 | | |
| Tukey | A | A | | | A | A | | |
| Ángulo | S.I. | 0° | 45° | 90° | S.I. | 0° | 45° | 90° |
| Media | 35,11 | 38,45 | 35,64 | 36,54 | 10,35 | 7,35 | 6,27 | 5,25 |
| Tukey | A | A | A | A | B | A | A | A |

B: zona basal del tallo, M: zona media del tallo, S.I.: Sin intemperismo, A, B y C: indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

Al considerar los valores promedio de resistencia máxima a compresión paralela presentados en la tabla 31, se observa que las muestras que no fueron expuestas a intemperismo, presentaron valores promedio de 36,16 y 30,98 MPa para aquellas de la zona basal con presencia y ausencia de nudo, respectivamente. De igual manera aquellas muestras sin intemperismo, pero de la zona media del tallo presentan valores mayores a los anteriormente mencionados siendo 38,66 y 34,63 MPa con nudo y sin nudo. Para aquellas muestras que fueron expuestas a la prueba de intemperismo durante el periodo de seis meses observamos valores similares que fluctúan entre 31,51 a 40,38 MPa, mostrando que el menor valor fue

de las muestras de la zona media con presencia de nudo y con un ángulo de inclinación de 45 grados, por otra parte el mayor promedio fue de los ensayos realizados a muestras de la zona basal con ausencia de nudo y con un ángulo de inclinación de 0 grados.

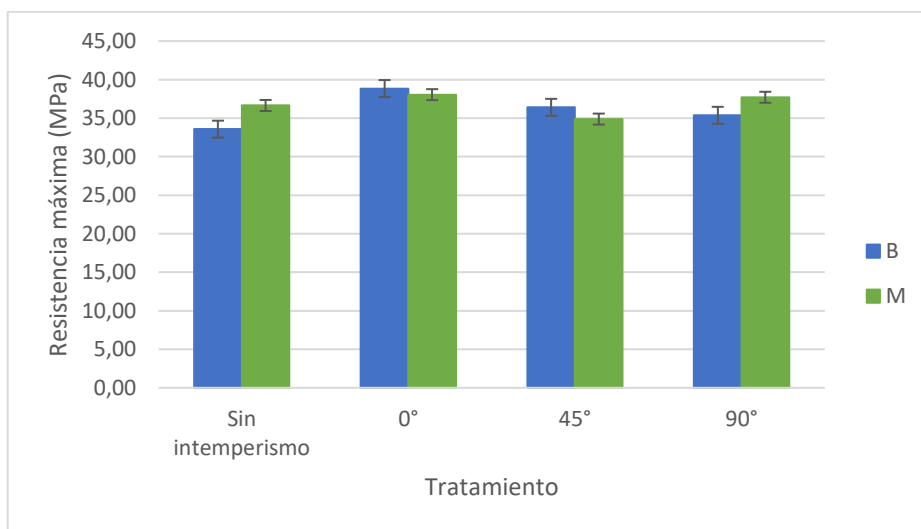
En cuanto al módulo de elasticidad de las muestras evaluadas, podemos observar que en el caso de las probetas sin exposición al intemperismo, las muestras de la zona basal del tallo con presencia y ausencia de nudo presentan valores promedio de 10,02 y 13,08 GPa, respectivamente. Aquellas muestras de la zona media con presencia y ausencia de nudo presentaron valores promedio de 7,66 y 10,65 GPa, respectivamente. El rango en el que se encuentran los valores promedio obtenidos de las muestras que fueron sometidas a la prueba de intemperismo es de 3,28 a 9,32 GPa, notando así que el menor y mayor valor observado se presentaron en muestras de la zona basal que no presentan nudo, sin embargo, en el caso del menor fueron aquellas muestras expuestas a 90 grados de exposición y el mayor promedio en aquellas con ángulo de inclinación de 0 grados.

La tabla 32, indica que no existe significancia estadística para ninguna de las variables evaluadas en cuanto a la resistencia máxima en compresión paralela, lo cual es corroborado en la tabla 33, ya que no existe desigualdad estadística de medias. Sin embargo, para el módulo de elasticidad podemos notar que la variable ángulo de exposición es significativa, de igual manera esto es contrastado con la prueba de Tukey en la tabla 33, para poder afirmar que existen diferencias entre las medias, siendo que el promedio presentado por las muestras sin exposición al intemperismo, fue mayor que aquellas muestras luego del periodo de seis meses de intemperismo.

Los valores promedio de resistencia máxima a la compresión paralela obtenidos, se encuentran ligeramente por encima de los valores presentados por Camargo (2006) y Silva y López (2000): los cuales están en el rango de 15 a 30 MPa., de igual manera, Hernao y Rodríguez (2015), muestran los valores promedio de tres zonas con distintas humedades relativas pertenecientes al eje cafetero colombiano, a diferentes edades (de uno a cinco años), mostrando así, que el incremento de la resistencia máxima en compresión paralela es mayor para aquellas muestras de cinco años de edad, cuyos valores promedio se encuentran entre 30 y 31,46 MPa, siendo estos valores ligeramente inferiores a los obtenidos en las muestras provenientes de La Florida (tabla 31).

Sin embargo, Takeuchi y González (2007), presentan valores promedio de resistencia máxima de 50,63 y 56,42 MPa correspondientes a las muestras que pertenecen a la zona basal y media, respectivamente. Además indican que las fisuras que se presentaron durante el secado de las guaduas no tuvieron influencia en la resistencia máxima obtenida en los ensayos de compresión paralela, igualmente determinaron que la presencia de nudos no presenta influencia significativa en los resultados obtenidos, lo cual es corroborado con los resultados observados en la figura 45.

González *et al.* (2008), mencionan que los promedios de esfuerzo o resistencia máxima a compresión presentan diferencias significativas de acuerdo a la zona del tallo, donde la zona basal presenta el promedio más bajo, mientras que la zona media y apical, presentan promedios similares y mayores en comparación a la zona basal.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 44: Resistencia máxima ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según zona del tallo.

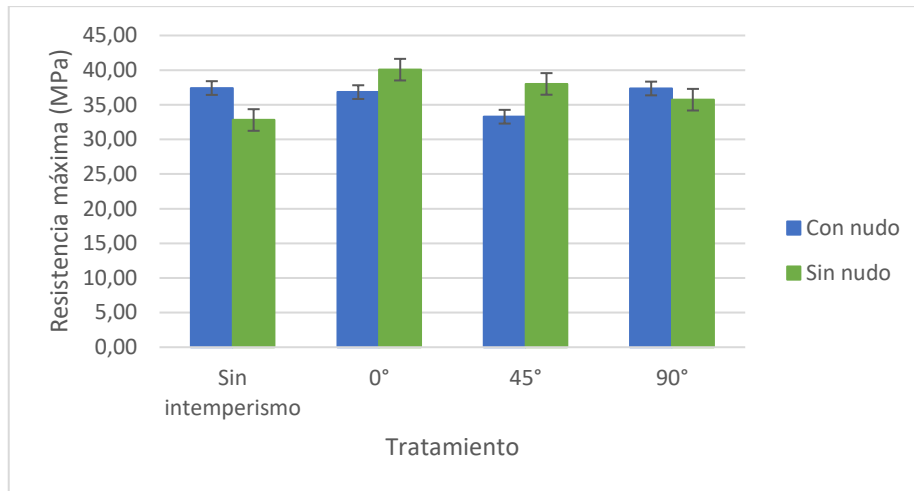
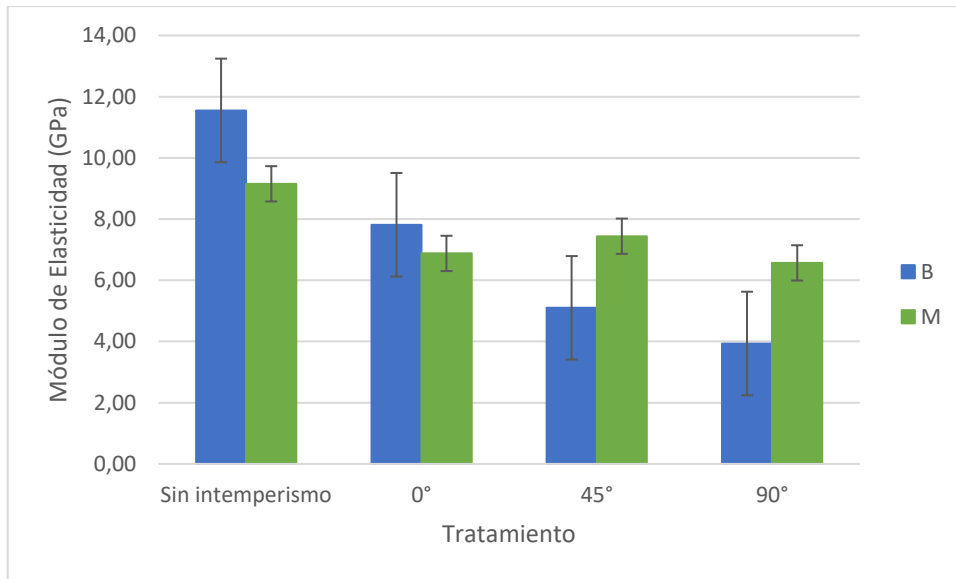


Figura 45: Resistencia máxima ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según presencia de nudo.

Las figuras 44 y 45, grafican los resultados obtenidos de la resistencia máxima en compresión paralela para las probetas evaluadas *G. angustifolia*, donde se puede apreciar que para los ángulos de exposición de 0 y 45 grados de inclinación, se tienen comportamientos similares, viendo que el promedio de las muestras de la zona basal es mayor que el de las de la zona media y de igual forma las probetas sin nudo obtuvieron promedios mayores que aquellas con presencia de nudo. Contrariamente a lo mostrado en los ángulos de exposición de 0 y 45 grados, las muestras que no fueron expuestas y aquellas con un ángulo de inclinación de 90 grados, evidenciaron un mayor promedio para las muestras de la zona media y con presencia de nudo en las figuras respectivas.

En ambas figuras (44 y 45), se puede apreciar que no existe una diferencia marcada entre los resultados obtenidos en las muestras testigo o sin intemperismo y aquellas que fueron sometidas a los seis meses de exposición en la prueba de intemperismo. Los valores ligeramente mayores se presentaron en las muestras expuestas a 0 grados de inclinación, sin embargo, estos no llegan a ser significativos.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 46: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según zona del tallo.

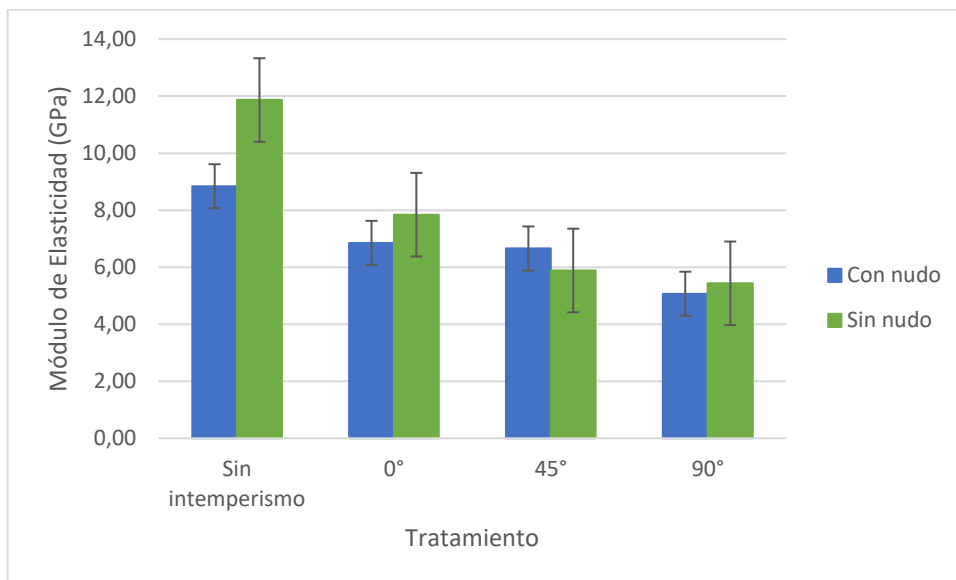


Figura 47: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de compresión paralela de bambú, luego del intemperismo, según presencia de nudo.

Por otra parte, las figuras 46 y 47 grafican los valores del Módulo de elasticidad en compresión paralela obtenidos de las probetas evaluadas, las cuales muestran claramente la significancia que se pudo apreciar en el análisis estadístico (tabla 32), para la variable del ángulo de exposición, se observa también que para las muestras sin intemperismo y ángulo de exposición de 0 grados fueron mayores los promedios obtenidos en las probetas de la zona basal a diferencia de las muestras con ángulos de inclinación de 45 y 90 grados, donde se tuvo promedios mayores para aquellas muestras de la zona media. En cuanto a la presencia o ausencia del nudo, se tiene que los valores promedio de las muestras sin nudo fueron mayores para las muestras testigo o sin intemperismo y para los ángulos de exposición de 0 y 90 grados, contrariamente en el ángulo de 45 grados de inclinación se observó un mayor valor para las muestras con nudo.

Takeuchi y González (2007), presentan los resultados de módulo de elasticidad obtenidos con deformímetros eléctricos, teniendo valores promedio de 17,4 y 18,1 GPa para aquellas muestras de la zona basal y media, respectivamente. Adicionalmente, en el estudio que realizaron indican que los valores obtenidos mediante el uso de deformímetros eléctricos fueron un 11 por ciento mayores que aquellos obtenidos con el uso de deformímetros mecánicos, sin embargo, los resultados obtenidos en el presente estudio aún se encontrarían por debajo de los valores antes mencionados.

Por otra parte, los valores obtenidos se encuentran más próximos al rango de valores promedio de MOE presentado por Ghavami y Marinho (2005), que van de nueve a 14,64 GPa, donde se puede observar que las muestras con nudo presentan valores menores con respecto a aquellas sin nudo, y en cuanto a la zona del tallo, se puede inferir que el MOE incrementa ligeramente desde la zona basal hacia la zona superior.

2.2. Flexión estática

En la tabla 34, se presentan los resultados promedio obtenidos en los ensayos de flexión del tallo del bambú, luego de seis meses de intemperismo. En la tabla 35 se presentan los valores del análisis de variancia y en la tabla 36 los valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey.

Tabla 34: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de flexión estática de bambú.

| Codificación | Ángulo de inclinación (°) | Zona del tallo | Flexión estática | | Contenido de Humedad (%) |
|------------------------|---------------------------|----------------|------------------|-------------|--------------------------|
| | | | MOR (MPa) | MOE (GPa) | |
| | | | X, [s] | X, [s] | |
| BF | S.I. | Basal | 26,35 [2,24] | 1,80 [0,56] | 11,06 |
| MF | S.I. | Media | 26,01 [3,11] | 1,53 [0,36] | 11,30 |
| BF₀ | 0 | Basal | 25,50 [4,46] | 1,58 [0,59] | 11,11 |
| MF₀ | 0 | Media | 24,16 [4,56] | 1,47 [0,61] | 11,31 |
| BF₄₅ | 45 | Basal | 23,66 [3,21] | 1,48 [0,50] | 11,61 |
| MF₄₅ | 45 | Media | 22,77 [3,54] | 1,30 [0,42] | 12,08 |
| BF₉₀ | 90 | Basal | 22,40 [3,57] | 1,27 [0,27] | 12,26 |
| MF₉₀ | 90 | Media | 23,86 [2,89] | 1,39 [0,25] | 12,11 |

Dónde: (X) promedio, (s) desviación estándar, (S.I.) Sin intemperismo.

Tabla 35: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de flexión estática.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Flexión estática | | | |
|------------------------|---------------------------|------------------|---------------|-----------|---------------|
| | | MOR (MPa) | | MOE (GPa) | |
| | | P-valor | Significancia | P-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,7639 | N.S. | 0,3501 | N.S. |
| A | 3 | 0,0907 | N.S. | 0,2202 | N.S. |
| Z*A | 3 | 0,7039 | N.S. | 0,7306 | N.S. |
| C.V. | | 14,84 | | 57,05 | |

Dónde: (Z) efecto principal del factor de la zona del tallo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación, (Z*A) efecto de la doble interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo.

Tabla 36: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de flexión estática.

| VARIABLES | Flexión estática | | | | | | | |
|-----------|------------------|-------|-------|-------|-----------|------|-------|-------|
| | MOR (MPa) | | | | MOE (GPa) | | | |
| | Zona del tallo | B | M | ----- | ----- | B | M | ----- |
| Media | 24,48 | 24,20 | ----- | ----- | 1,53 | 1,42 | ----- | ----- |
| Tukey | A | A | ----- | ----- | A | A | ----- | ----- |
| Ángulo | S.I. | 0° | 45° | 90° | S.I. | 0° | 45° | 90° |
| Media | 26,18 | 24,83 | 23,22 | 23,13 | 1,67 | 1,53 | 1,39 | 1,32 |
| Tukey | A | A | A | A | A | A | A | A |

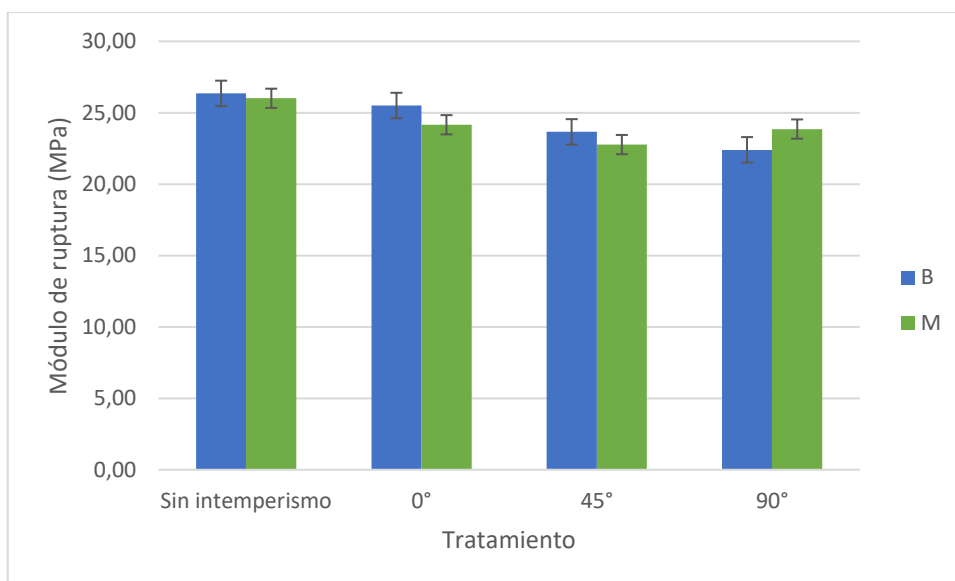
B: zona basal del tallo, M: zona media del tallo, S.I.: Sin intemperismo, A, B y C: indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

Los valores promedio obtenidos para el módulo de ruptura y módulo de elasticidad se muestran en la tabla 34, donde se aprecia que los valores de módulo de ruptura en aquellas muestras que no fueron sometidas a la prueba de intemperismo fueron de 26,35 y 26,01 MPa, para la zona basal y media, respectivamente. En cuanto a la prueba de intemperismo, los valores obtenidos para el ángulo de inclinación de 0 grados fueron 25,50 MPa para la zona basal y 24,16 MPa para la zona media, siendo estos mayores con respecto a los obtenidos en los ángulos de 45 y 90 grados de inclinación, los cuales presentan valores promedio similares para ambos ángulos: 23,66 y 22,77 MPa para el ángulo de 45 grados de inclinación (zona basal y media), y valores promedio de 22,40 y 23,86 MPa para los 90 grados de exposición correspondientes a la zona basal y media, respectivamente.

De igual manera, los valores promedio del módulo de elasticidad para las muestras sin ser expuestas al intemperismo fueron de 1,80 y 1,53 GPa, para aquellas de la zona basal y media, respectivamente. Mientras que para aquellas muestras expuestas a 0 grados de inclinación se obtuvieron valores de 1,58 y 1,47 GPa (zona basal y media), valores similares fueron obtenidos para el ángulo de exposición de 45 grados para la zona basal 1,48 GPa y zona media 1,30 GPa, con respecto a los valores obtenidos para aquellas muestras con ángulo de inclinación de 90 grados, estos fueron ligeramente menores siendo 1,27 y 1,39 GPa correspondientes a la zona basal y media, respectivamente.

A pesar de las diferencias de valores anteriormente mencionadas, se aprecia en la Tabla 35, que ninguna de las variables consideradas presentó una significancia estadística, lo cual es corroborado por la prueba de Tukey en la tabla 36, que no muestra igualdad de medias, siendo así que la prueba de intemperismo realizada durante los seis meses no tuvo mayor influencia en la resistencia máxima ni módulo de elasticidad en los ensayos de flexión.

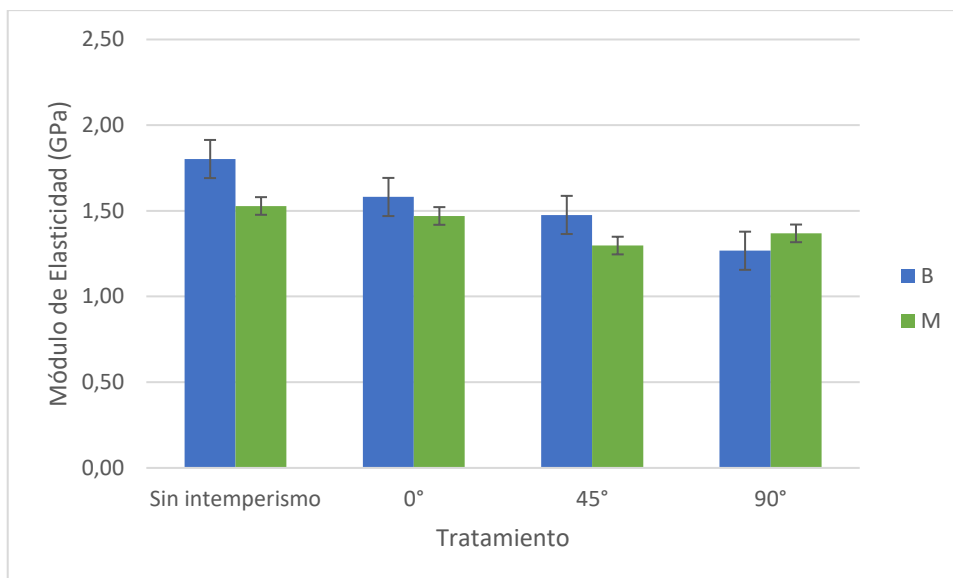
En el gráfico de barras de la figura 48, que considera la zona del tallo y ángulo de exposición, se aprecian valores promedio de resistencia máxima a la flexión ligeramente mayores en las muestras que no fueron expuestas a intemperismo, además se observa que los valores promedio de las muestras de la zona basal son mayores con respecto a aquellas de la zona media, para los ángulo de 0 y 45 grados de inclinación, incluyendo a las muestras sin intemperismo, solo en el caso del ángulo de 90 grados se presenta que el promedio de la zona media es mayor al de la zona basal.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 48: Módulo de ruptura ensayo de flexión de bambú, luego del intemperismo.

En cuanto al módulo de elasticidad en flexión, la figura 49 muestra un comportamiento similar para las muestras evaluadas, donde los mayores valores tanto para la zona basal como media se obtuvieron en las probetas que no fueron expuestas a la prueba de intemperismo, además se observa que los valores promedio disminuyen respecto al aumento del ángulo de exposición, esto es identificado de mejor manera en el caso de la zona basal, donde se tiene que el menor valor corresponde al ángulo de 90 grados de exposición en la prueba de intemperismo.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 49: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de flexión de bambú, luego del intemperismo.

A pesar de no tener significancia, se observa una ligera disminución de la resistencia máxima y MOE, lo cual está relacionado como las otras propiedades mecánicas a la degradación de la lignina, lo cual le resta resistencia y debilita la unión de fibras. Sin embargo, los valores obtenidos luego de la prueba de intemperismo se encuentran por encima de 21,77 MPa presentado por Huarcaya (2010).

2.3.Tensión

En la tabla 37, se presentan los resultados promedio obtenidos en los ensayos de tensión del tallo del bambú, luego de seis meses de intemperismo. En la tabla 38 se presentan los valores del análisis de variancia y en la tabla 39 los valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba Tukey.

Tabla 37: Resultados promedio y desviaciones estándar del ensayo de tensión.

| Codificación | Ángulo de inclinación (°) | Zona del tallo | Tensión | | Contenido de Humedad (%) |
|------------------|---------------------------|----------------|----------------|---------------|--------------------------|
| | | | MOR (MPa) | MOE (GPa) | |
| | | | X, [s] | X, [s] | |
| BT | S.I. | Basal | 102,82 [17,89] | 27,92 [9,28] | 11,6 |
| MT | S.I. | Media | 121,10 [24,17] | 50,65 [28,46] | 12,1 |
| BT ₀ | 0 | Basal | 82,54 [18,35] | 26,59 [7,07] | 10,6 |
| MT ₀ | 0 | Media | 96,37 [19,53] | 39,12 [14,68] | 12,1 |
| BT ₄₅ | 45 | Basal | 78,02 [21,19] | 25,74 [10,40] | 11,1 |
| MT ₄₅ | 45 | Media | 104,55 [15,75] | 24,03 [4,16] | 12,4 |
| BT ₉₀ | 90 | Basal | 94,62 [22,77] | 22,08 [18,21] | 12,2 |
| MT ₉₀ | 90 | Media | 104,57 [29,79] | 32,02 [8,56] | 12,7 |

Dónde: (X) promedio, (s) desviación estándar, (S.I.) Sin intemperismo.

Los resultados presentados por Arce (1993), muestran una influencia significativa de las zonas con nudo con respecto a las zonas del internudo, los valores obtenidos para la zona del nudo son apenas el 30 por ciento de obtenido en aquellas probetas cuya zona de ensayo fue el internudo. De igual manera con respecto al módulo de elasticidad (MOE), se observó que la zona del nudo presenta valores del 40 por ciento con respecto a la zona internodal. Por tal motivo los ensayos fueron realizados en probetas con zona de ensayo del internudo para obtener los valores máximos de tensión.

Tabla 38: Análisis de variancia de los resultados del ensayo de tensión.

| Fuente de variabilidad | Grados de libertad (G.L.) | Tensión | | | |
|------------------------|---------------------------|-----------|---------------|-----------|---------------|
| | | MOR (MPa) | | MOE (GPa) | |
| | | p-valor | Significancia | P-valor | Significancia |
| Z | 1 | 0,0044 | ** | 0,0057 | ** |
| A | 3 | 0,0458 | * | 0,0599 | N.S. |
| Z*A | 3 | 0,7123 | N.S. | 0,0999 | N.S. |
| C.V. | | 22,31 | | 41,52 | |

Dónde: (Z) efecto principal del factor de la zona del tallo, (A) efecto principal del ángulo de inclinación, (Z*A) efecto de la doble interacción, (C.V.) coeficiente de variabilidad, (N.S.) no significativo, (*) significativo, (**) muy significativo.

Tabla 39: Comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de tensión.

| VARIABLES | Tensión | | | | | | | |
|----------------|-----------|--------|-------|------|-----------|-------|-------|-------|
| | MOR (MPa) | | | | MOE (GPa) | | | |
| Zona del tallo | B | M | | | B | M | | |
| Media | 89,87 | 106,68 | | | 25,21 | 37,32 | | |
| Tukey | A | B | | | A | B | | |
| Angulo | S.I. | 0° | 45° | 90° | S.I. | 0° | 45° | 90° |
| Media | 111,96 | 90,24 | 91,29 | 99,6 | 39,28 | 33,86 | 24,88 | 27,05 |
| Tukey | B | A | A | A | A | A | A | A |

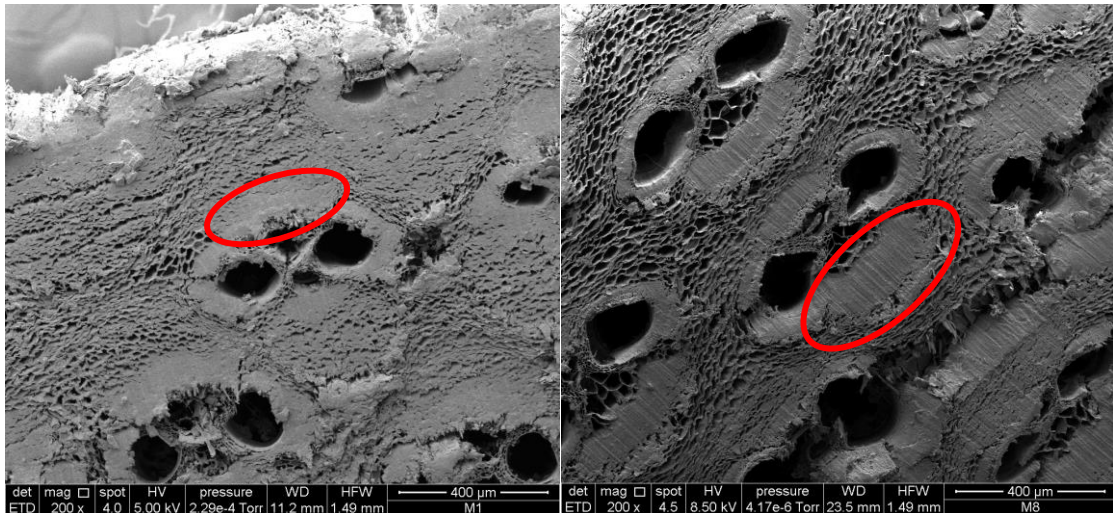
B: zona basal del tallo, M: zona media del tallo, S.I.: Sin intemperismo, A, B y C: indicadores de análisis, donde la desigualdad indica significancia y la igualdad lo contrario.

En la tabla 37, se aprecian los valores promedio de módulo de ruptura en tensión de las muestras de *G. angustifolia* ensayadas, donde se puede observar que los mayores valores se presentaron en aquellas muestras que no fueron sometidas al periodo de intemperismo, teniendo valores de 102,82 y 121,10 MPa, para aquellas muestras de la zona basal y media del tallo, respectivamente. Los valores promedio para las muestras con 0 grados de exposición en la prueba de intemperismo, fueron de 82,54 y 96,37 MPa para muestras de la zona basal y media, respectivamente. Valores similares fueron obtenidos para el ángulo de 45 grados, teniendo 78,02 MPa para las muestras de la zona basal y 104,55 MPa para la zona media, por último los valores de 94,62 y 104,57 MPa se obtuvieron para las muestras con 90 grados de inclinación en la prueba de intemperismo para la zona basal y media, respectivamente.

El módulo de elasticidad promedio de las muestras es de 27,92 y 50,65 GPa, para aquellas que no fueron expuestas a la prueba de intemperismo que pertenecen a la zona basal y media, respectivamente. Las muestras expuestas a los seis meses de intemperismo con un ángulo de inclinación de 0 grados presentaron los siguientes valores promedio: 26,59 GPa para la zona basal y 39,12 GPa para la zona media. Aquellas que fueron expuestas a 45 grados de inclinación presentaron valores promedio de 25,74 y 24,03 GPa, correspondientes a la zona basal y media. Por último, los valores obtenidos para las muestras con ángulo de inclinación de 90 grados fueron 22,08 GPa para la zona basal y 32,02 GPa para las muestras de la zona media.

Como se puede apreciar en la tabla 38, se determinó que la variable de la zona del tallo es muy significativa estadísticamente para ambos resultados, tanto para la resistencia máxima como para el módulo de elasticidad en tensión, adicionalmente se observa que existe

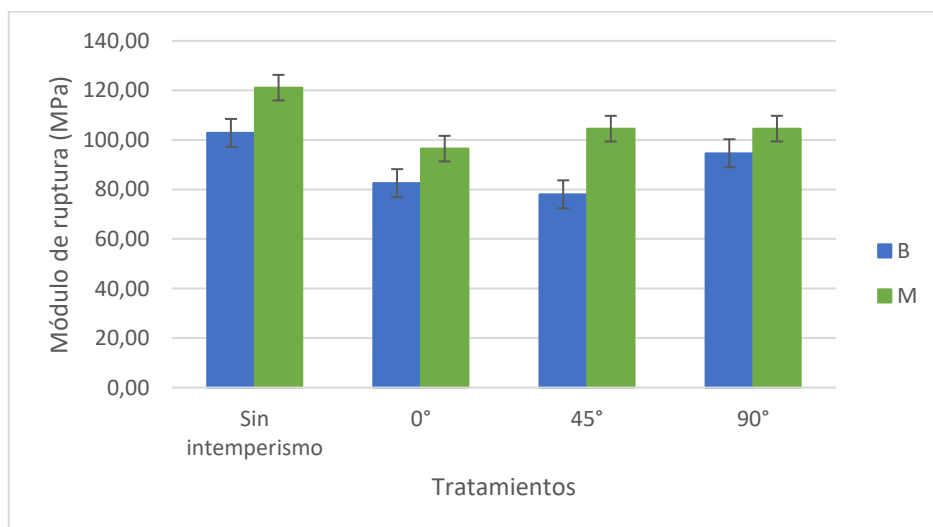
significancia en menor grado para el ángulo de exposición para los valores de módulo de ruptura. Al realizar la prueba de Tukey según tabla 39, se corrobora la desigualdad de medias para la variable de zona del tallo tanto para módulo de ruptura como para el módulo de elasticidad, de igual manera se aprecia la desigualdad de medias en resistencia máxima para la variable de ángulo de exposición.



Dónde: (a) M1: Muestra de zona basal (200X), (b) M8: Muestra de zona media (200X)

Figura 50: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona basal y media.

De acuerdo a lo observado, en la figura 50, la zona basal presenta menor cantidad de fibras, por tanto, mayor cantidad de parénquima, por lo que la influencia del contenido de humedad puede generar una mayor variación de la resistencia máxima según Gutiérrez y Takeuchi (2014), sin embargo, el contenido de humedad de equilibrio para la ciudad de Lima es de 15,17 por ciento según Rosales (2016), por lo que no presentaría una variación importante.

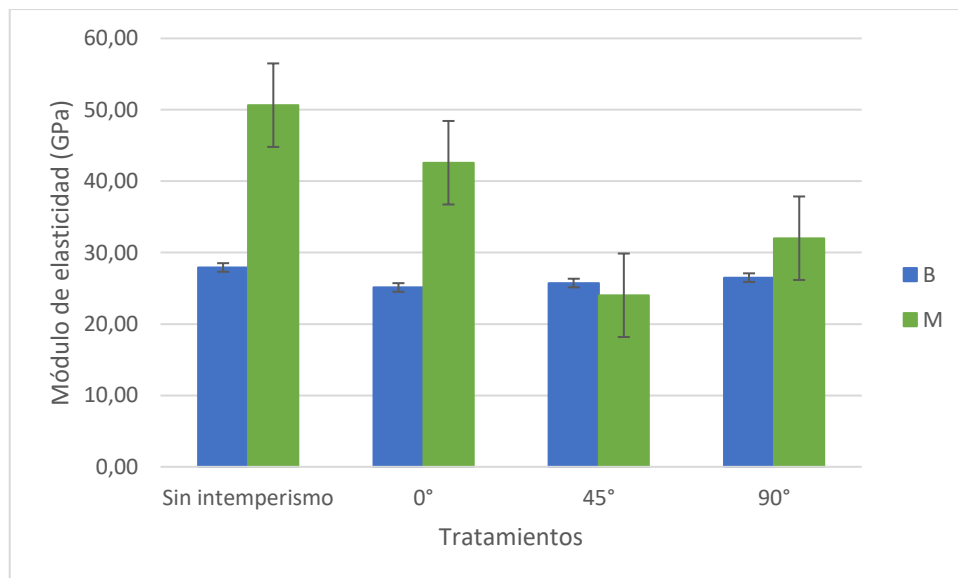


Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 51: Módulo de ruptura ensayo de tensión de bambú, luego del intemperismo.

En cuanto a las diferencias obtenidas para las dos zonas evaluadas, se considera como principal diferencia el porcentaje de lignina que presenta en cada una, siendo que este porcentaje varía a lo largo del tallo, Liese (1998) indica que el porcentaje de lignina aumenta hacia la zona superior del tallo, además también varía desde el exterior al interior del tallo (Fuentes *et al.*, 2011).

En la figura 51, se muestra la variación de los valores del módulo de ruptura en tensión de las muestras de *Guadua angustifolia* luego de 182 días de exposición a la intemperie, teniendo en cuenta la zona del tallo y el ángulo de exposición, se puede apreciar la diferencia significativa donde las muestras de la zona media presentan valores promedio mayores que aquellas de la zona basal, siendo que el mayor valor fue de las muestras que no fueron expuestas, además se puede observar la diferencia entre los resultados obtenidos para aquellas probetas que no fueron expuestas al intemperismo, en relación a las muestras que fueron sometidas a la prueba durante los seis meses de exposición.



Dónde: (B) Zona basal, (M) Zona media.

Figura 52: Variación del módulo de elasticidad en ensayo de tensión de bambú, luego del intemperismo.

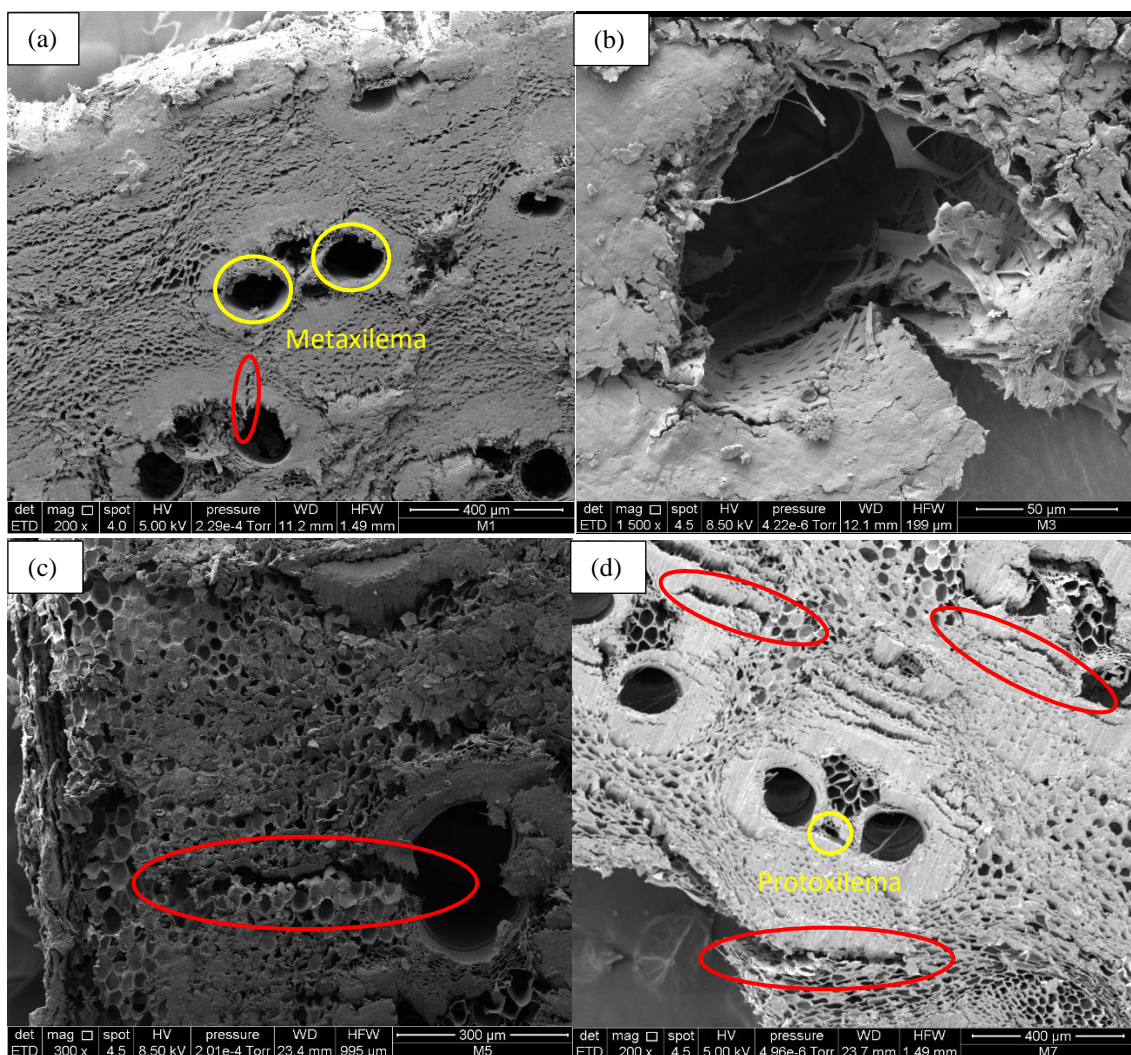
En el caso del módulo de elasticidad, en la figura 52, se aprecia de manera gráfica los valores promedios antes mencionados, se observa de igual manera que en la figura 51 de la resistencia máxima, que los promedios obtenidos de la zona media son mayores que los de la zona basal, teniendo una diferencia máxima de 22,73 MPa, entre las muestras de la zona media con respecto al promedio de las de la zona basal que no fueron expuestas a la prueba de intemperismo durante los seis meses.

Torres y Amado (2019), realizaron el estudio de intemperismo en la ciudad de Bogotá, obteniendo un aumento del contenido de humedad en las muestras y por ende una disminución de las resistencias máximas a tensión, sin embargo, este incremento de contenido de humedad ocasiono que el MOE inicial de 12,58 GPa para muestras de la zona media ascienda a 20,33 GPa, luego de los 10,6 meses de intemperismo. Estos valores se encontrarían por debajo de los obtenidos en el presente estudio.

Santamaría (2012), por su parte, realizo envejecimiento acelerado a condiciones simuladas a Bogotá, con tiempos de exposición de hasta 5 669 horas de exposición en cámara UV correspondiente a ocho años aproximadamente (Correal, Peña, Maldonado y González, 2011), donde presento resistencias máximas a tensión iniciales de 106,69 MPa y finales de 76,05 MPa al concluir la prueba de intemperismo, disminuyendo hasta en 29 por ciento dicha propiedad para la zona media del tallo. En el caso del MOE presento una disminución del 10 por ciento con respecto al valor inicial.

3. Microscopia electrónica

En la figura 53, se aprecian fotografías SEM de las muestras de la zona basal del tallo, que fueron ensayadas en tensión, la fotografía superior izquierda (a) es la muestra testigo es decir sin ser expuesta a la prueba de intemperismo, las fotografías (b), (c) y (d) son aquellas muestras con ángulos de exposición de 0, 45 y 90 grados, respectivamente. En las fotografías (a) y (c) se observan fisuras en el metaxilema, en la fotografía (b) a mayor aumento se puede apreciar mayor detalle.



Dónde: (a) M1: Muestra de zona basal sin intemperismo (200X), (b) M3: Muestra de zona basal con 0° de ángulo de exposición (1 500X), (c) M5: Muestra de zona basal con 45° de ángulo de exposición (300X), (d) M7: Muestra de zona basal con 90° de ángulo de exposición (200X).

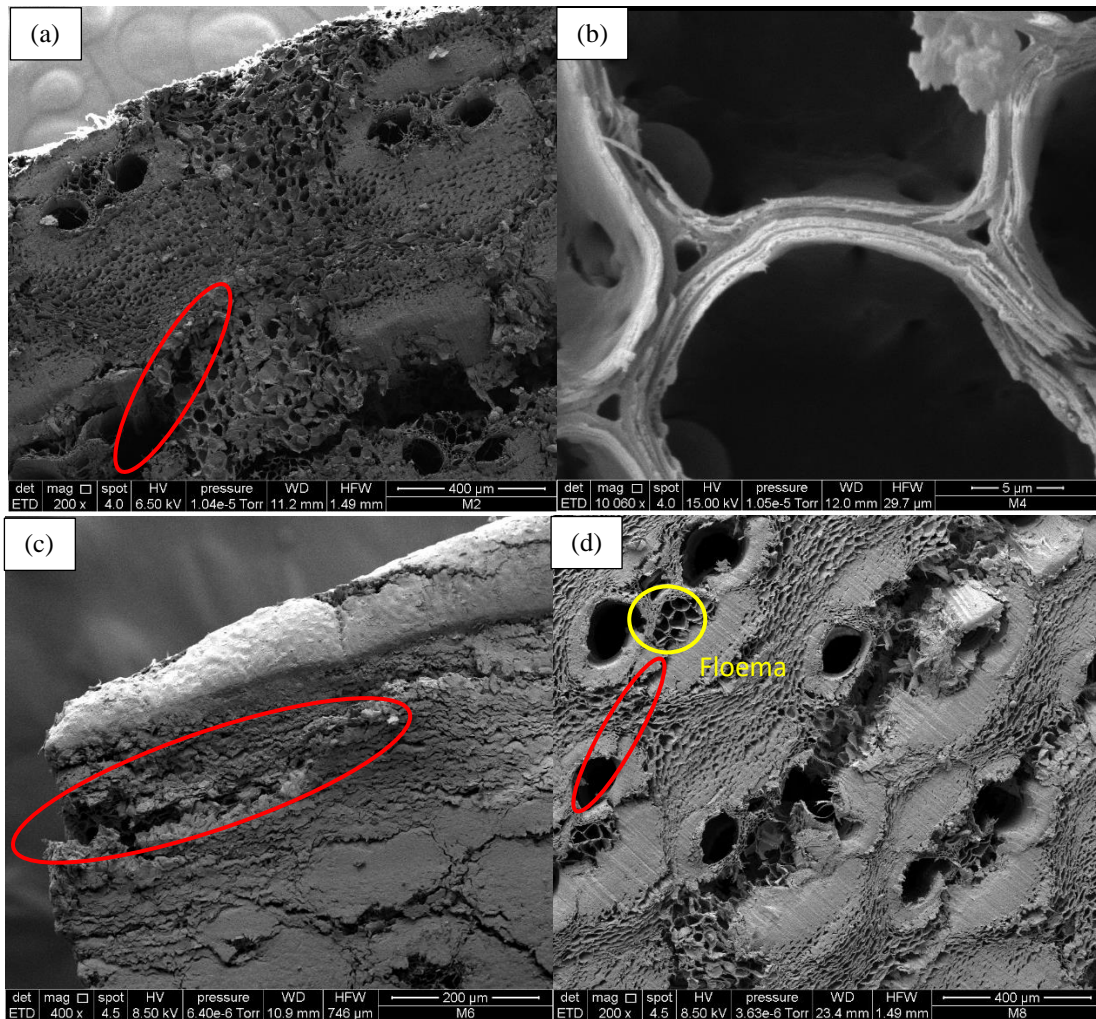
Figura 53: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona basal ensayadas a tensión.

Se puede observar mejor las bandas vasculares o estructuras conductivas en las figura 54 (a) y (d), las cuales están constituidas por tejido xilemático (transporte de agua) y tejido floemático o tubos cribosos (transporte de fotosintatos). Un haz vascular de *G. angustifolia* está constituido por dos vasos de metaxilema (a), uno o dos elementos de protoxilema (d), el floema (figura 54 (d), la vaina de esclerénquima y las fibras; según la clasificación de haces vasculares de Grosser (1971), Grosser y Liese (1971, 1973) y Sekar y Balasubramanian (1994) todos mencionados por Londoño *et al.* (2002), la *G. angustifolia* exhibe haces vasculares tipo II y IIa dependiendo de su localización a través de la pared del culmo.

En el tipo IIa, se observa el haz vascular central rodeado por cuatro vainas de esclerénquima: dos ubicadas a cada lado de los vasos del metaxilema, otra alrededor del protoxilema (espacio intercelular) y la última alrededor del floema. Las vainas de esclerénquima del floema son más prominentes en los haces de las zonas media e interna que son los que se utilizan para la clasificación anatómica; en los haces vasculares de las zonas periferia y transición, la vaina de esclerénquima es más prominente hacia el protoxilema. (Londoño *et al.*, 2002).

El metaxilema (figura 53 (a)), está formado por dos vasos separados por tejido parenquimático con un espacio intercelular entre ellos. Células con parénquima lignificado rodean los vasos del metaxilema, sin embargo, el parénquima que rodea el espacio intercelular siempre permanece no lignificado. Los vasos periféricos del metaxilema, son pequeños e incrementan su tamaño en el medio y en las secciones internas; es un comportamiento constante durante la maduración del culmo. (Pérez, 2014)

La figura 54, presenta las muestras de la zona media del tallo que fueron ensayadas a tensión, se distinguen fisuras próximas a la corteza externa, estas fisuras se dan a través de los haces vasculares como se visualizan en la fotografías (a) y (d), por otra parte en la fotografía (b) se puede observar la pared celular del tejido parenquimático, en la fotografía (c) se observa una fisura paralela a la superficie (corteza externa).



Dónde: (a) M2: Muestra de zona media sin intemperismo (200X), (b) M4: Muestra de zona media con 0° de ángulo de exposición (10 000X), (c) M6: Muestra de zona media con 45° de ángulo de exposición (400X), (d) M8: Muestra de zona media con 90° de ángulo de exposición (200X).

Figura 54: Fotografías SEM de cortes transversales a probetas de zona media ensayadas a tensión.

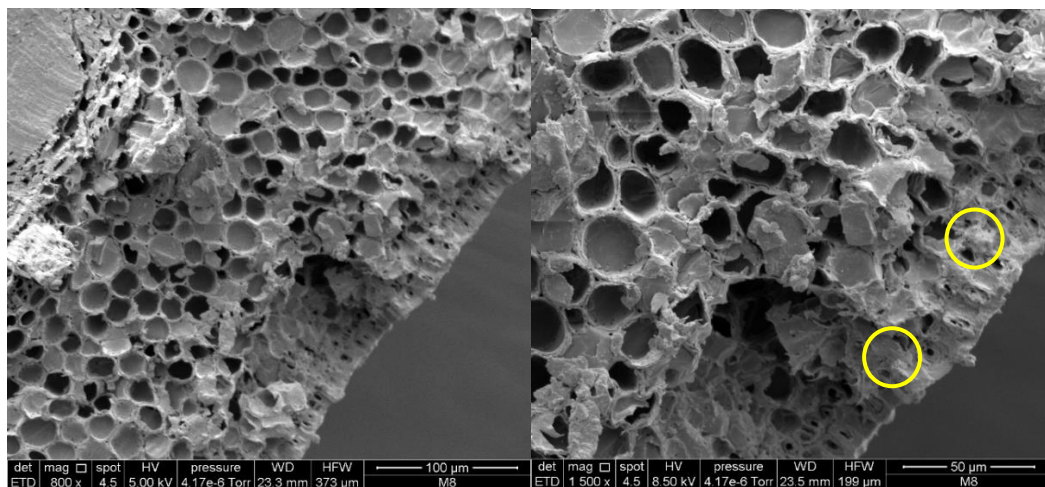


Figura 55: Fotografías SEM de la corteza en corte transversal de *Guadua angustifolia* a 800 y 1 500X.

En la figura 55, se puede apreciar la corteza, que es la parte externa del culmo, sus funciones son prevenir la pérdida de agua y proteger el tejido. La corteza está compuesta por epidermis e hipodermis (Liese, 1998). En la epidermis se identifican los cuerpos silicios los cuales contribuyen a la dureza y resistencia al corte que presenta la guadua. Por otra parte, la hipodermis de la *G. angustifolia* consiste de dos a tres capas de células esclerenquimatosas de pared gruesa. El parénquima cortical es homogéneo y está formado por ocho a 10 capas de células de paredes delgadas y gruesas. El tamaño de estas células se incrementa desde la periferia hacia la parte interna. (Londoño *et al.*, 2002).

Según Grosser y Liese (1971), se puede diferenciar en el tejido de parénquima dos tipos de células: células largas y células cortas. Las células largas generalmente tienen paredes más gruesas mientras que las células cortas son pequeñas, de forma cúbica y se caracterizan por tener citoplasmas más densos, paredes delgadas y no se lignifican con la edad. Las células del parénquima están conectadas unas con otras por simples orificios localizados en las paredes longitudinales. (Ver anexo 3).

V. CONCLUSIONES

- El intemperismo, en las condiciones de estudio, influye sobre las propiedades de color, módulo de elasticidad en compresión paralela y módulo de ruptura en tensión del tallo de bambú *Guadua angustifolia* Kunth, en un periodo de seis meses de exposición.
- El ángulo de inclinación solo tuvo influencia sobre la variación de color, siendo el ángulo de 0 grados el que presentó un mayor cambio de color.
- La zona del tallo influencia sobre las propiedades de densidad seca al aire, módulo de ruptura y módulo de elasticidad en tensión, siendo la zona media la que presentó los mayores valores.
- La presencia de nudos tuvo influencia únicamente en el contenido de humedad durante el periodo de intemperismo, presentando mayores valores en aquellas probetas sin presencia de nudos.

VI. RECOMENDACIONES

- Al ser el Perú un país con condiciones climáticas muy variables, se recomienda realizar pruebas de intemperismo, priorizando aquellas zonas donde es utilizado el bambú como material de construcción, y presentan diferentes valores climatológicos, abarcando todas las estaciones del año.
- Evaluar el efecto del intemperismo en tallos de bambú con diferentes recubrimientos, analizando costo/beneficio.
- Realizar ensayos de envejecimiento acelerado en tallos de bambú, bajo condiciones controladas y determinar el grado de influencia de cada factor en las propiedades.
- De acuerdo a los resultados obtenidos, se recomienda el uso de la *G. angustifolia*, con fines estructurales, en áreas bajo techo.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdul Khalil, H.; Bhat, I.; Jawaid, M.; Zaidon, A.; Hermawan, D.; Hadi, Y. (2012). Bamboo fibre reinforced biocomposites: A review. *Materials and Design* (42): 353–368.
- Acevedo, A; Bustos, C; Lasserre, J.P; Gacitua, W. (2013). Efecto de un envejecimiento acelerado mediante rayos UV en la propagación superficial de grietas de debobinado en tableros contrachapados de *Eucalyptus nitens*. *Maderas. Ciencia y tecnología* 15(1): 45-56.
- Álvarez, E. (2012). Comportamiento mecánico de las conexiones en los elementos de bambú para estructuras ligeras. El caso de las especies del trópico de Veracruz. Tesis Ph. D. Madrid, España, Universidad Politécnica de Madrid.
- Añazco, M. (2014). Estudio de vulnerabilidad del bambú (*Guadua angustifolia*) al cambio climático en la costa de Ecuador y norte Perú. Unión Europea: Red Internacional del Bambú y Ratán 2012-2013.
- Arbeláez, A. (1998). La estructura morfológica del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunt. Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, Facultad de Ciencias Agrícolas, p. 3-18.
- Assar, M.; Scida, D.; Mahi, A. (2011). Influence of water ageing on mechanical properties and damage events of two reinforced composites materials: flax-fibres and glass-fibres, *materials and design*. 32:788-795.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) D1435. (2015). Standard Practice for Outdoor Weathering of Plastics. ASTM International. West Conshohocken, PA. 5 p.
- American Society for Testing and Materials (ASTM) 143-14. (2014). Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken, PA.

- Bhat, I.; Khalil, A.; Awang, B. (2010). Effect of Weathering on physical, mechanical and morphological properties of chemically modified wood materials. School of Industrial Technology. University Sains Malaysia.
- Cáceres, H. (1989). Bambusoideas de Colombia. Características químicas y biométricas de algunas especies de bambúes como fuente de pulpa para papel. Santander, Colombia. Universidad Industrial de Santander. 31-32.
- Camacho, V. & Páez, H. (2002). Estudio de conexiones de guadua solicitadas a momento flector. Tesis Ing. Agrícola. Medellín, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. 59 p.
- Camargo, J.C. (2006). Growth and productivity of the bamboo species *Guadua angustifolia* Kunth in the Coffee Region of Colombia. Ph.D. Tesis. Göttingen, Deutschland, Göttingen Universität. 205 p.
- Capera, A. & Erazo, W. (2012). Resistencia a la compresión paralela a la fibra y determinación del módulo de elasticidad de la *Guadua angustifolia* del Municipio de Pitalito-Huila. Tesis Ingeniero Agrícola. Neiva, Colombia, Universidad Sur Colombiana. 145 p.
- Capilla Perea, P.; Artigas, J.; Pujol, I.; Ramo, J. (2002). Fundamentos de Colorimetría. Universidad de Valencia, Ed. Ilustrada. Valencia, España. 232 p.
- Carreño, M. (2017). Conjunto habitacional utilizando el bambú: un recurso natural en viviendas ubicado en Veracruz. Tesis de grado. Ciudad de México, México, Instituto Politécnico Nacional.
- Castaño, F. & Moreno, R. (2004). Guadua para todos. Cultivo y aprovechamiento. Proyecto Manejo Sostenible de Bosques de Colombia. 34-38.
- Cely, L; Hernandez, W; Gutierrez, O. (2012). Caracterización de la *Guadua angustifolia* Kunth cultivada en Miraflores (Boyacá) de acuerdo con la NSR-1. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC. 21(33): 53-71.
- Cesare, M.; Cruz, L.; Zamora, P.; Hilario, F.; Callupe, N.; Calle, J.; Gonzales, H. (2018). Caracterización química y física del bambú (*Guadua angustifolia* Kunth).

- Ciro, H; Osorio, J; Velez, J. (2005). determinación de la resistencia mecánica a tensión y cizalladura de la *Guadua angustifolia* Kunth. Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín. 58(1): 2709-2715.
- Clark, L.G. (1995). Diversity and distribution of the Andean woody bamboos (Poaceae: Bambusae). In: Churchill, S.P., H. Balslev, E. Forero & J.L. Luteyn (eds.) biodiversity and conservation of montane forests. Proceedings, pp. 501-512. The New York Botanical Garden, New York.
- Clark, L.G. (2001). Diversification and endemism in Andean woody bamboos (Poaceae: Bambusoideae). J. amer. bamboo Soc. 15(1): 14-19.
- Correal, J.; Peña, F.; Maldonado, A; González, M. (2011). Deterioro mecánico, físico-químico de la guadua rolliza sometida a factores abióticos de intemperie simulados en laboratorio. (Tesis de Maestría).
- Houston, M. (04 de mayo de 2016). Los andamios de bambú que transforman a Hong Kong. CNN en español. p. 10.
- Colantoni, P. (2004). Color space transformations.
- Cortés, L. (2015). El cultivo de la guadua alternativa económica para el desarrollo sostenible. Colombia: Corporación Autónoma Regional del Valle CVC.
- Cruz, H. (2009). Bambú - Guadua: *Guadua angustifolia* Kunth. Bosques Naturales en Colombia y Plantaciones Comerciales en México. 1 ed. Pereira, Risaralda, CO. 710 p.
- Díaz, Y.; Mendoza, E.; Inga, C. (2017). Manual Técnico del Bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) para Productores. Primera edición. Amazonas: Universidad de Sassari – Fundación AVSI.
- Duque, G. (2017). Manual de Geología para Ingenieros. Cap. 8: Intemperismo o Meteorización. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- El Bassam, N.; Meier, D.; Gerdes, C.; Korte, A. (2002). Potential of producing biofuels from bamboo. Bamboo for sustainable development. Proceedings of the Vth International Bamboo Congress and the VIth International Bamboo Workshop, San José, Costa Rica. 797-806.

- Estacio, D. (2013). Evaluación de las propiedades físico mecánicas del bambú – Bagua, Amazonas. (Tesis de grado para optar el título de Ingeniero Civil). Cajamarca, Perú, Universidad Nacional de Cajamarca. 172 p.
- Estrada, M. (2010). Extracción y caracterización mecánica de las fibras de bambú (*Guadua angustifolia*) para su uso potencial como refuerzo de materiales compuestos. (Tesis de grado para optar por el título de Magister e Ingeniería). Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. 146 p.
- Evans, P.; Urban, K.; Chowdhury, A. (2008). Surface Checking of wood is increased by photodegradation caused by ultraviolet and visible light. 42: 251-265.
- Ford, A. & Roberts, A. (1998). Colorur space conversions. Londres. 31 p.
- Fuentes, C.A.; Tran, L.; Dupont-Gillian, C. (2011). Weeting behaviour and Surface properties of technical bamboo fibres, colloids and surfaceA: physicochem 380: 89-99.
- Fuentes, F; Silva, J; Quintana, F; Turrado, J; Cárdenas, A; Rodríguez, R; Robledo, J. (2014). Comportamiento al intemperismo natural de composites polipropileno-madera. Revista Mexicana de Ciencias Forestales. 6(27): 102-113.
- Garay, R. (2009). Efectos de dos Protectores Superficiales en las Propiedades de Tableros de Madera después de un Año de Exposición a la Intemperie. Información Tecnológica 20(4): 123-130.
- Ghavami, K. & Rodríguez, C.S. (2000). Engineering materials and components with plants. In: CIB–Symposium, Construction & Environment, 2000, São Paulo. Proceedings. São Paulo: Global Seven Editor.
- Ghavami, K. & Marinho, A. B. (2005). Propriedades físicas e mecânicas do colmo inteiro do bambu da espécie *Guadua angustifolia*. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande. 9(1): 107-114.

- Giordano, C.V. (2003). Efectos de la radiación ultravioleta-B solar sobre *Gunnera magellanica*, una planta nativa de Tierra del Fuego. (Tesis), Argentina: Universidad de Buenos Aires – Facultad de Ciencias Exactas y naturales.
- Giraldo, E. & Sabogal, A. (1999). Una alternativa sostenible: la *Guadua* técnicas de cultivo y manejo. CRQ, 192 p.
- Gomes, R; Nóbrega Dos Santos, M; Miyazato, T; Navarro Peres de Freitas, P. (2005). Análise de intemperismo natural em chapas de partículas compostas de resíduos agroindustriais. *Madeira Arquitetura e Engenharia*, Issue 17, p. 1-11.
- Gómez, E; Méndez, J; Palominos, M. (2005). Curado y preservación de caña *Guadua* seleccionando agentes y preservantes químicos. (Tesis de grado para optar al título de ingeniero químico). Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil.
- Gonzáles, Ó. (2014). Caracterización del bambú *Guadua (Guadua angustifolia)* para el diseño e industrialización en España. 1ed. España: Editorial Universidad de Almería.
- González, C. (2006). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. Universidad Nacional de Colombia - Facultad de Ingeniería Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola Unidad de Estructuras Bogotá D.C.
- González, E.; Osorio, J.; Gracia, E. (2002). Resistencia a la flexión de la *Guadua angustifolia* Kunth a escala natural. *Revista Facultad Nacional Agronomía Medellín*. 55(2): 1555-1572.
- González, H.A.; Montoya, J.A.; Rubiel, J. (2008). Comportamiento de muestras de *Guadua angustifolia* Kunth con diafragma y sin diafragma sometidas a esfuerzo de compresión. *Scientia et Technica*. Universidad Tecnológica de Pereira. 14(38): 449-454.
- Grosser, D. (1971). Beitrag zur histologie undklassifikation asiatischer Bambusarten. *Mitt. BFH, Reinbek*, 85: 1-321.

- Grosser, D. & Liese, W. (1971). On the anatomy of Asian bamboo with especial reference to their vascular bundles. *Wood Science and Technology*, 5: 290-312.
- Grosser D. & Liese W. (1973). Present status and problems of bamboo classification. *J. Arnold Arboret*, 54: 293-308.
- Gutiérrez, M. & Takeuchi, C. (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*. Universidad Tecnológica de Pereira. 19(3): 245-250.
- Gutiérrez, M.; Bonilla, J.I.; Cruz, M.F.; Quintero, J.G. (2018). Expansión lineal y punto de saturación de las fibras de la *Guadua angustifolia* Kunth. *Colombia Forestal*. 21(1):69-80.
- Gutiérrez, S. (2010). Uniones Estructurales con Bambú (*Guadua angustifolia*). Tesis de grado para optar el título de ingeniero civil. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Henao, E. & Rodriguez, J. (2015). Cambios en las propiedades físico-mecánicas de culmos de *Guadua angustifolia* como indicadores del estado de madurez. *Recursos Naturales y Ambiente*. 1(61): 26-31.
- Hidalgo, O. (1974). Bambú, su cultivo y aplicaciones en fabricación de papel, construcción, arquitectura, ingeniería, artesanía. *Estudios técnicos colombianos*. 56-77.
- Hidalgo, O. (2003). *Bamboo. The gift of the gods*. Primera edición. Bogotá, 553 p.
- Huarcaya, J. (2010). Determinación de resistencia de uniones estructurales en bambú (*Guadua angustifolia*), Bosque: Flor del Valle, Distrito/Provincia: Rioja, Departamento: San Martín. Tesis de grado para optar el título de ingeniero civil. Lima, Perú. Universidad Nacional de Ingeniería. 226 p.
- International Commission On Illumination. (2004). Libro blanco de la gestión del color. Espacios de color y conversión de colores. Francia.

- ISO/TC165N314 “Determination of physical and mechanical properties of bamboo” traducida al español en la Norma ISO 22157-1: 2004.
- ISO/TC165N315 “Laboratory Manual on Testing Methods for Determination of physical and mechanical properties of bamboo” traducida al español en la Norma ISO 22157-2: 2004.
- Jaramillo, D. & Sanclemente, A. (2003). Estudio de uniones en Guadua con ángulo de inclinación entre elementos. Tesis de grado para optar el título de ingeniero civil. Bogotá, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. 95 p.
- Judziewicz, E.J.; Clark, L.G.; Londoño X.; Stern. M.J. (1999). american bamboos. Smithsonian Institution Press, Washington, D.C.
- Lasso, S. (2019). Color (Luz y pigmento). (en línea). Recuperado de <https://www.aboutespanol.com/color-luz-y-pigmento-que-es-y-como-se-percibe-180130>
- Liese, W. (1998). The anatomy of bamboo culms. INBAR Technical report N° 18. Internacional Network for Bamboo and Rattan, Beijing, China. 204 p.
- Llerena, L. (2008). Experiencia de implementación de un Plan de Gestión Integral de la caña Guayaquil (*Guadua angustifolia*) en La Florida-Cajamarca. Lima, Perú. (Tesis Ing. Forestal). Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Lockuán Lavado, E. (2012). La industria textil y su control de calidad. Tintorería. 161 p.
- Londoño, X. (1991). Estudio botánico, ecológico, silvicultural y económico-industrial de las Bambusoides de Colombia. 16-17(59):51-78.
- Londoño, X; Riaño, N.M; Camayo, G.C. (2002). Estudio anatómico de los diferentes órganos de la guadua (*Guadua angustifolia* Kunth), con énfasis en el culmo. Corporación regional autónoma del Quindío – Sociedad colombiana del bambú – Federación Nacional de Cafeteros de Colombia – CENICAFE. Chinchiná, Colombia. 38 p.

- Londoño, X; Camayo, G.C.; Riaño, N.M; Lopez, Y. (2002). Caracterización anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth (Poaceae: Bambusoideae). *Bamboo, Science & Culture*. 16(1):1-12.
- Londoño, X. (2010). Identificación taxonómica de los bambúes de la región noroccidental del Perú. Lima: Ministerio de Agricultura, PD/428/6 Rev. 2(F).
- Lozada, C. (2012). Determinación experimental de la durabilidad de tableros derivados de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth), mediante pruebas de envejecimiento aceleradas. Tesis de grado para optar al título de ingeniero químico. Guayaquil, Ecuador. Universidad de Guayaquil. 130 p.
- Lozano, J; Luna, P; Takeuchi, C. (2010). Validación de la *Guadua angustifolia* como material estructural para diseño, por el método de esfuerzos admisibles. Proyecto. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. 190 p.
- Malleux, J. (2009). Promoción de la rehabilitación, manejo y uso sostenible de los bosques tropicales de Bambú en la región Noroccidental del Perú: Inventario de bosques de bambú en el ámbito del proyecto PD4287 (en línea). Recuperado de http://www.itto.int/files/user/pdf/PROJECT_REPORTS/INVENTARIO%20DE%20BOSQUES%20DE%20BAMBU%20PD428-1.pdf
- Martínez, S. (2015). Bambú como material estructural: generalidades, aplicaciones y modelización de una estructura tipo. Escola Tècnica Superior D'Enginyeria Agronòmica I del Medi Natural.
- Maya, J.M.; Camargo, J.C.; Marino, O. (2017). Características de los culmos de guadua de acuerdo al sitio y su estado de madurez. *Colombia Forestal*. 20(2):171-180.
- Ministerio de Agricultura (MINAGRI). (2010). Bambú: biología, cultivo, manejo y usos en el Perú. Dirección General de Competitividad Agraria. Lima, Perú. 62 p.
- Ming-Fei, L.; Yong-Ming, F.; Feng, X. (2010). Cold sodium hydroxide/urea based pretreatment of bamboo for bioethanol production: characterization of the cellulose rich fraction, *science direct*. 32:551-559.

- Moreno, L.; Trujillo, E.; Osorio, L. (2007). Estudio de las características físicas de haces de fibra de *Guadua angustifolia*. Scientia et Technica, Universidad Tecnológica de Pereira. UTP. ISSN 0112 – 1701. (N°34)
- Mosquera, O.; Cortes, J.; Niño, J. (2008). *Guadua angustifolia* en la Ecorregión cafetera colombiana. Extracción y cuantificación de Lignina insoluble. Recursos Naturales y Ambiente. 61:11-17.
- Narváez, L.S. (2013). Desarrollo de losas con caña de *Guadua angustifolia* y análisis comparativo estructural y económico con los sistemas de losas tradicionales utilizado en nuestro medio. Sangolqui: Escuela Politécnica del Ejército.
- Nascimento, M. (2003). CHP – Chapas de Partículas Homogêneas: Madeiras do Nordeste do Brasil. Tesis PhD. Sao Paulo, Brasil. Escola de Engenharia de São Carlos Universidade de São Paulo. 117 p.
- Nieto, F. (2008). Estudio anatomico de culmos de “Bambú macho” (*Guadua angustifolia* Kunth) y “Bambú hembra” (*Bambusa vulgaris* Schard. Ex j.c. Wendel) del distrito de Santa Cruz de Flores, Cañete, Lima. Tesis Ingenieria Forestal. Lima, Perú. Universidad Nacional Agraria la Molina. 68 p.
- Noor, A.; Mokhtar, M.; Rafiqul, Z.; Pramod, K. (2012). Understanding Color Models : A Review. ARPN Journal of Science and Technology, 2(3), 265–275.
- Núñez, C.E. (2007). Relaciones de conversión entre densidad básica y densidad seca de madera. Revista Ciencia y Tecnología, 9(9): 44-50. Recuperado de <http://www.cenunez.com.ar/archivos/126-ConversdensRECYT.pdf>
- Ordóñez, V; Mejía, T; Bárcenas, G. (2002). Manual para la construcción sustentable con bambú. CONAFOR. México.
- Osorio, J; Vélez, J; Ciro, H. (2007). Estructura interna de la Guadua y su incidencia en las propiedades mecánicas.
- Otles, S. (2008). Handbook of food analysis instruments. CRC Press, Ed. Ilustrada. 544 p.

- Parker, H. (1965). Tecnología de recubrimiento de superficies. Wayne Detroit University, Michigan.
- Pereira, M. & Beraldo, A. (2007). Bambú de corpo e alma. Rio de Janeiro, Brasil. 240 p.
- Pérez, C. (2014). Caracterización genética de relictos de *Guadua angustifolia*, un ecosistema estratégico de la ecorregión Valle del Cauca mediante STR's. Tesis para optar el grado de doctor en Biotecnología, Ingeniería y Tecnología Química. Sevilla, España. Universidad Pablo de Olavide de Sevilla. 25-36.
- PERUBAMBU. (2010). Proyecto PD 428/06 Rev.2: Promoción de la rehabilitación, manejo y uso sostenible de los bosques tropicales de bambú en la región noroccidental del Perú. (En línea). Recuperado de http://www.perubambu.org.pe/Proyectos_Actividades.php?id=50
- Proyecto CORPEI-CBI. (2003). Expansión de la oferta exportable del perfil del producto bambú caña *Guadua angustifolia* - caña brava. 33 p.
- Q-Lab Corporation. (2011). Outdoor weathering: Basic exposure procedures (en línea). Technical bulletin LL-9025. Consultado 15 dic. 2018. Disponible en: <http://www.q-lab-corporation.ru/doc/Q-Lab-LL9025-Outdoor.pdf>
- Rodríguez, J. (2006). El Bambú como material de construcción. Aguas Calientes – México: Revista Conciencia Tecnológica. 31: 67-69.
- Rodríguez, R. & Fuentes, F. (2003). Factores que intervienen en el proceso de envejecimiento de la madera. Revista Chapingo: Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 9(1): 95-100.
- Rosales, E. (2016). Variabilidad del contenido de humedad-equilibrio de la madera d diez especies comerciales para tres regiones del Perú. Revista Forestal Mesoamericana Kurú. 13(30):13-21.
- Sabogal, S. (2013). Nuevos materiales: La *Guadua angustifolia* “El bambú colombiano” (diapositiva), Colombia. Diapositiva 17 de 106, color.

- Sainz, R. (2012). Inventario de bosques nativos, plantaciones y cadena de valor del bambú. Informe final de consultoría. Programa Sierra Exportadora: Producto Bambú. 16 p.
- Sánchez, M.T.; Espuna, J.A.; Roux, R.S. (2016). El bambú como elemento estructural: la especie *Guadua amplexifolia*. *Nova scientia*, 8(17), 657-677. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000200657&lng=es&tlng=es.
- Santos Espi, P. (2009). Medición del color (p. 4). Zaragoza, España. (En línea) Recuperado de http://www.centro-zaragoza.com:8080/web/sala_prensa/revista_tecnica/hemeroteca/articulos/R42_A3.pdf
- Seely, F.B. (1954). Resistencia de materiales. Editorial Hispanoamericana. México.
- Sekar, T. & Balasubramanian, A. (1994). Occurrence of a new vascular bundle type in bamboo. *Bamboo Information Centre- India Bulletin*, 4: 41 -42.
- SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). (2017). Datos históricos: estación Von Humbolt Información del clima y agua. (En línea). Recuperado de <http://www.senamhi.gob.pe/>
- SENAMHI: DGER-MEM. (2014). Atlas de Energía Solar del Perú. Proyecto Per/98/G31: Electrificación Rural a base de Energía Fotovoltaica en el Perú. (En línea). Recuperado de http://cedecap.org.pe/uploads/biblioteca/80bib_arch.pdf
- Sistema de Información Ambiental Regional de Cajamarca (SIAR Cajamarca). (2013). Ubicación de la provincia de San Miguel.
- Sierra Exportadora, (2012). Programa nacional de innovación e industrialización de defenza ribereña. Informe de Consultorias. (En línea). Recuperado de <http://www.sierraexportadora.gob.pe/programas/bambu/>
- Silva, M.F. & López, L.F. (2000). Comportamiento sismorresistente de estructuras en bahareque. Manizales, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 139 p.

- Stark, N. & Gardner, D. (2008). Outdoor durability of wood-polymer composites. Wood-Polymer Composites: A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. 142-165.
- Sudiyani, Y.; Tssujiyama, S.; Imamura, Y. (1999). Chemical Characteristics of surfaces of hardwood and softwood deteriorated by weathering. J. Wood Sci. 45:348-353.
- Takahashi, J. (2012). El Bambú y su Potencial para el Desarrollo Sostenible en el Perú. PERUBAMBU. Universidad Científica del Sur. (En línea). Recuperado de http://www.agrobanco.com.pe/pdf_cpc/Bambu_JosefinaTakahashi.pdf
- Takahashi, J. (2012). Perú tiene un millón y medio de hectáreas de bambú (Entrevista).
- Takeuchi, C. & González, C. (2007). Resistencia a la compresión paralela a la fibra de la *Guadua angustifolia* y determinación del módulo de elasticidad. (Tesis de grado para optar por el título de la especialización en estructuras). Bogotá, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 11(1):89-103.
- Temiz, A.; Terziev, N.; Eikenes, M. (2007). Effect of accelerated weathering on surface chemistry of modified wood, applied surface science. 253:5355-5362.
- Torres, C. & Amado, D. (2019). Deterioro mecánico de la *Guadua rolliza angustifolia* Kunth sometida a factores abióticos de intemperie en la ciudad de Bogotá, en condición natural, respecto a cuándo se aplican recubrimientos. (Trabajo de grado para optar al título de Magister en Infraestructura Vial). Bogotá, Colombia. Universidad Santo Tomas. 103 p.
- Toshihiro, O.; Sonoda, T.; Ito, K.; Shibata, M. (1998). Relations between various extracted basic densities and wood chemical components in *Eucalyptus globulus*. Journal of Wood Science. 44:165-168.
- Upreti, N. & Pandey, K. (2005). Role of Pretreatments in the Protection of Wood Surface and Finishes in the Weathering of *Pterocarpus Marsupium* wood, Journal of Tropical Forest Science. 17(1):141-150.
- Villegas, M. (2001). *Bambusa Guadua*. (3° ed.). Bogotá, Colombia: Villegas Editores.

- Wang, X. & Ren, H. (2008). Comparative study of the photo-discoloration of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens* Mazel) and two Wood species, *Applied Surface Science*. 254:7029-7034.
- Weather Spark. (2017). El clima promedio en La Molina Perú. (En línea). Recuperado de <https://es.weatherspark.com/y/21290/Clima-promedio-en-La-Molina-Per%C3%BA-durante-todo-el-a%C3%B1o#Sections-Clouds>
- Wenbin, Y. & Zhang, W. (2011). Research on manufacturing Technology and Application of Natural Bamboo Fibre, Fourth international conference on intelligent computation technology and automation.
- X-Rite. (2002). Guía para entender la comunicación del color (en línea). Recuperado de http://www.mcolorcontrol.com/archivos/L10-001_Understand_Color_es.pdf
- Yang, Y. & Hui, C. (2010). China's Bamboo: Culture, resources, cultivation and utilization. INBAR Technical Report 33. International English Edition.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

DATOS DE LOS PARÁMETROS CLIMÁTICOS EN LA MOLINA DURANTE EL ENSAYO DE INTEMPERISMO

| Fecha | T Prom. | T Max. | T Min. | H.R. (%) | PP (mm) |
|------------|---------|--------|--------|-------------|------------|
| 19/06/2017 | 17,46 | 21,0 | 15,8 | 79,00 | 0,0 |
| 03/07/2017 | 17,34 | 20,5 | 16,0 | 76,54 | 0,0 |
| 17/07/2017 | 17,43 | 21,1 | 15,6 | 75,46 | 0,0 |
| 31/07/2017 | 16,82 | 22,0 | 13,0 | 78,63 | 0,0 |
| 14/08/2017 | 16,19 | 19,9 | 14,7 | 77,58 | 0,0 |
| 28/08/2017 | 15,42 | 20,0 | 12,5 | 83,38 | 0,2 |
| 11/09/2017 | 15,13 | 16,6 | 14,0 | 86,71 | 0,3 |
| 25/09/2017 | 15,96 | 21,5 | 13,3 | 81,05 | 0,0 |
| 09/10/2017 | 15,68 | 20,1 | 12,6 | 81,04 | 0,0 |
| 23/10/2017 | 18,47 | 25,3 | 15,2 | 76,88 | 0,0 |
| 06/11/2017 | 16,40 | 22,9 | 11,7 | 76,54 | 0,0 |
| 20/11/2017 | 18,55 | 24,5 | 14,0 | 76,04 | 0,0 |
| 04/12/2017 | 18,53 | 23,2 | 16,1 | 80,21 | 0,0 |

T°: Temperatura en °C, HR: humedad relativa, PP: precipitación.

FUENTE: SENAMHI (2017).

ANEXO 2

DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA VARIACIÓN DE COLOR DURANTE EL INTEMPERISMO

| L* | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
| 0 | BCN15 | 62,7 | 66,4 | 61,3 | 63,9 | 59,5 | 61,4 | 57,7 | 54,8 | 55,0 | 54,0 |
| | BCS5 | 56,0 | 57,8 | 59,6 | 54,8 | 49,8 | 50,2 | 46,6 | 49,6 | 48,6 | 46,3 |
| | BCS6 | 64,6 | 60,0 | 51,7 | 52,0 | 43,2 | 43,2 | 46,1 | 46,7 | 46,1 | 44,1 |
| | BCS10 | 66,4 | 62,6 | 59,2 | 51,1 | 46,6 | 48,7 | 45,4 | 41,2 | 44,1 | 41,4 |
| | Prom | 62,4 | 61,7 | 58,0 | 55,5 | 49,8 | 50,9 | 49,0 | 48,1 | 48,5 | 46,5 |
| | MCS11 | 50,3 | 49,6 | 64,0 | 46,7 | 42,8 | 34,8 | 35,7 | 37,2 | 42,1 | 39,7 |
| | MCS14 | 63,6 | 60,0 | 53,3 | 51,7 | 42,7 | 45,7 | 43,9 | 46,0 | 46,4 | 45,5 |
| | MCN4 | 57,4 | 55,0 | 53,5 | 46,9 | 47,5 | 47,6 | 49,6 | 51,1 | 46,9 | 48,0 |
| | MCN15 | 63,4 | 65,6 | 63,2 | 63,5 | 61,7 | 60,2 | 62,5 | 61,0 | 59,7 | 56,0 |
| | Prom | 58,7 | 57,6 | 58,5 | 52,2 | 48,7 | 47,1 | 47,9 | 48,8 | 48,8 | 47,3 |
| 45 | MCN7 | 64,0 | 63,6 | 63,4 | 61,9 | 59,8 | 59,4 | 59,8 | 60,3 | 58,6 | 60,7 |
| | MCN3 | 61,3 | 59,4 | 59,3 | 54,1 | 56,5 | 51,0 | 53,6 | 55,1 | 50,7 | 54,6 |
| | MCN14 | 57,5 | 64,3 | 66,5 | 58,4 | 62,5 | 62,8 | 64,8 | 64,2 | 63,6 | 62,5 |
| | MCS1 | 60,7 | 52,1 | 54,3 | 46,7 | 48,9 | 46,3 | 52,5 | 47,9 | 51,1 | 50,6 |
| | Prom | 60,9 | 59,9 | 60,9 | 55,3 | 56,9 | 54,9 | 57,7 | 56,9 | 56,0 | 57,1 |
| | BCN8 | 54,9 | 51,7 | 51,1 | 50,4 | 51,1 | 50,9 | 53,0 | 54,6 | 48,8 | 52,5 |
| | BCN12 | 61,2 | 59,0 | 61,0 | 55,0 | 51,5 | 51,7 | 49,7 | 49,2 | 50,6 | 51,5 |
| | BCN1 | 62,3 | 67,2 | 63,7 | 60,3 | 59,8 | 57,7 | 58,1 | 57,6 | 59,1 | 56,8 |
| | BCS13 | 58,1 | 66,5 | 59,8 | 60,7 | 61,7 | 59,9 | 61,5 | 61,2 | 59,3 | 60,5 |
| | Prom | 59,1 | 61,1 | 58,9 | 56,6 | 56,0 | 55,1 | 55,6 | 55,7 | 54,5 | 55,3 |

| L* | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
| 90 | BCN10 | 65,6 | 65,9 | 67,6 | 67,4 | 67,4 | 69,4 | 68,0 | 68,1 | 68,9 | 67,9 |
| | BCN7 | 60,4 | 61,7 | 63,8 | 62,5 | 62,4 | 62,6 | 62,4 | 65,0 | 63,3 | 61,8 |
| | BCS14 | 59,0 | 62,2 | 64,1 | 63,9 | 65,2 | 65,3 | 66,3 | 69,3 | 69,4 | 66,3 |
| | BCS9 | 63,2 | 65,7 | 65,0 | 63,4 | 66,2 | 63,0 | 61,4 | 63,8 | 57,5 | 57,1 |
| | Prom | 62,1 | 63,9 | 65,1 | 64,3 | 65,3 | 65,1 | 64,5 | 66,6 | 64,8 | 63,3 |
| | MCN9 | 58,5 | 60,5 | 66,8 | 63,1 | 62,6 | 61,0 | 59,6 | 59,7 | 58,6 | 59,4 |
| | MCN6 | 66,8 | 69,0 | 70,5 | 71,2 | 71,2 | 69,9 | 71,4 | 71,7 | 70,3 | 68,8 |
| | MCS15 | 61,1 | 62,0 | 63,6 | 63,6 | 62,6 | 62,8 | 63,8 | 62,7 | 59,8 | 59,5 |
| | MCS5 | 57,3 | 58,5 | 56,2 | 54,9 | 57,4 | 51,9 | 54,6 | 53,2 | 55,0 | 52,7 |
| | Prom | 60,9 | 62,5 | 64,3 | 63,2 | 63,5 | 61,4 | 62,4 | 61,8 | 60,9 | 60,1 |

| a* | | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
| 0 | BCN15 | 11,7 | 15,4 | 10,3 | 12,9 | 8,5 | 10,4 | 6,7 | 3,8 | 4,0 | 3,0 |
| | BCS5 | 5,0 | 6,8 | 8,6 | 3,8 | -1,2 | -0,8 | -4,4 | -1,4 | -2,4 | -4,7 |
| | BCS10 | 15,4 | 11,6 | 8,2 | 0,1 | -4,4 | -2,3 | -5,6 | -9,8 | -6,9 | -9,6 |
| | BCS6 | 13,6 | 9,0 | 0,7 | 1,0 | -7,8 | -7,8 | -4,9 | -4,3 | -4,9 | -6,9 |
| | Prom | 11,4 | 10,7 | 7,0 | 4,5 | -1,2 | -0,1 | -2,1 | -2,9 | -2,6 | -4,6 |
| | MCS14 | 17,5 | 13,9 | 7,2 | 5,6 | -3,4 | -0,4 | -2,2 | -0,1 | 0,3 | -0,6 |
| | MCS11 | 4,2 | 3,5 | 17,9 | 0,6 | -3,3 | -11,3 | -10,4 | -8,9 | -4,0 | -6,4 |
| | MCN15 | 17,3 | 19,5 | 17,1 | 17,4 | 15,6 | 14,1 | 16,4 | 14,9 | 13,6 | 9,9 |
| | MCN4 | 11,3 | 8,9 | 7,4 | 0,8 | 1,4 | 1,5 | 3,5 | 5,0 | 0,8 | 1,9 |
| | Prom | 12,6 | 11,5 | 12,4 | 6,1 | 2,6 | 1,0 | 1,8 | 2,7 | 2,7 | 1,2 |

a*

| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
|-------------|-------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|------------|------------|
| 45 | MCN7 | 12,8 | 12,4 | 12,2 | 10,7 | 8,6 | 8,2 | 8,6 | 9,1 | 7,4 | 9,5 |
| | MCN3 | 10,1 | 8,2 | 8,1 | 2,9 | 5,3 | -0,2 | 2,4 | 3,9 | -0,5 | 3,4 |
| | MCN14 | 6,3 | 13,1 | 15,3 | 7,2 | 11,3 | 11,6 | 13,6 | 13,0 | 12,4 | 11,3 |
| | MCS1 | 9,5 | 0,9 | 3,1 | -4,5 | -2,3 | -4,9 | 1,3 | -3,3 | -0,1 | -0,6 |
| | Prom | 9,7 | 8,7 | 9,7 | 4,1 | 5,7 | 3,7 | 6,5 | 5,7 | 4,8 | 5,9 |
| | BCN8 | 1,2 | -2,0 | -2,6 | -3,3 | -2,6 | -2,8 | -0,7 | 0,9 | -4,9 | -1,2 |
| | BCN12 | 7,5 | 5,3 | 7,3 | 1,3 | -2,2 | -2,0 | -4,0 | -4,5 | -3,1 | -2,2 |
| | BCN1 | 8,6 | 13,5 | 10,0 | 6,6 | 6,1 | 4,0 | 4,4 | 3,9 | 5,4 | 3,1 |
| | BCS13 | 4,4 | 12,8 | 6,1 | 7,0 | 8,0 | 6,2 | 7,8 | 7,5 | 5,6 | 6,8 |
| | Prom | 5,4 | 7,4 | 5,2 | 2,9 | 2,3 | 1,4 | 1,9 | 2,0 | 0,8 | 1,6 |
| 90 | BCN10 | 9,5 | 9,8 | 11,5 | 11,3 | 11,3 | 13,3 | 11,9 | 12,0 | 12,8 | 11,8 |
| | BCN7 | 4,3 | 5,6 | 7,7 | 6,4 | 6,3 | 6,5 | 6,3 | 8,9 | 7,2 | 5,7 |
| | BCS14 | 2,9 | 6,1 | 8,0 | 7,8 | 9,1 | 9,2 | 10,2 | 13,2 | 13,3 | 10,2 |
| | BCS9 | 7,1 | 9,6 | 8,9 | 7,3 | 10,1 | 6,9 | 5,3 | 7,7 | 1,4 | 1,0 |
| | Prom | 6,0 | 7,8 | 9,0 | 8,2 | 9,2 | 9,0 | 8,4 | 10,5 | 8,7 | 7,2 |
| | MCN9 | 1,1 | 3,1 | 9,4 | 5,7 | 5,2 | 3,6 | 2,2 | 2,3 | 1,2 | 2,0 |
| | MCN6 | 9,4 | 11,6 | 13,1 | 13,8 | 13,8 | 12,5 | 14,0 | 14,3 | 12,9 | 11,4 |
| | MCS15 | 3,7 | 4,6 | 6,2 | 6,2 | 5,2 | 5,4 | 6,4 | 5,3 | 2,4 | 2,1 |
| | MCS5 | -0,1 | 1,1 | -1,2 | -2,5 | 0,0 | -5,5 | -2,8 | -4,2 | -2,4 | -4,7 |
| | Prom | 3,5 | 5,1 | 6,9 | 5,8 | 6,1 | 4,0 | 5,0 | 4,4 | 3,5 | 2,7 |

b*

| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
|-------------|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
|-------------|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|

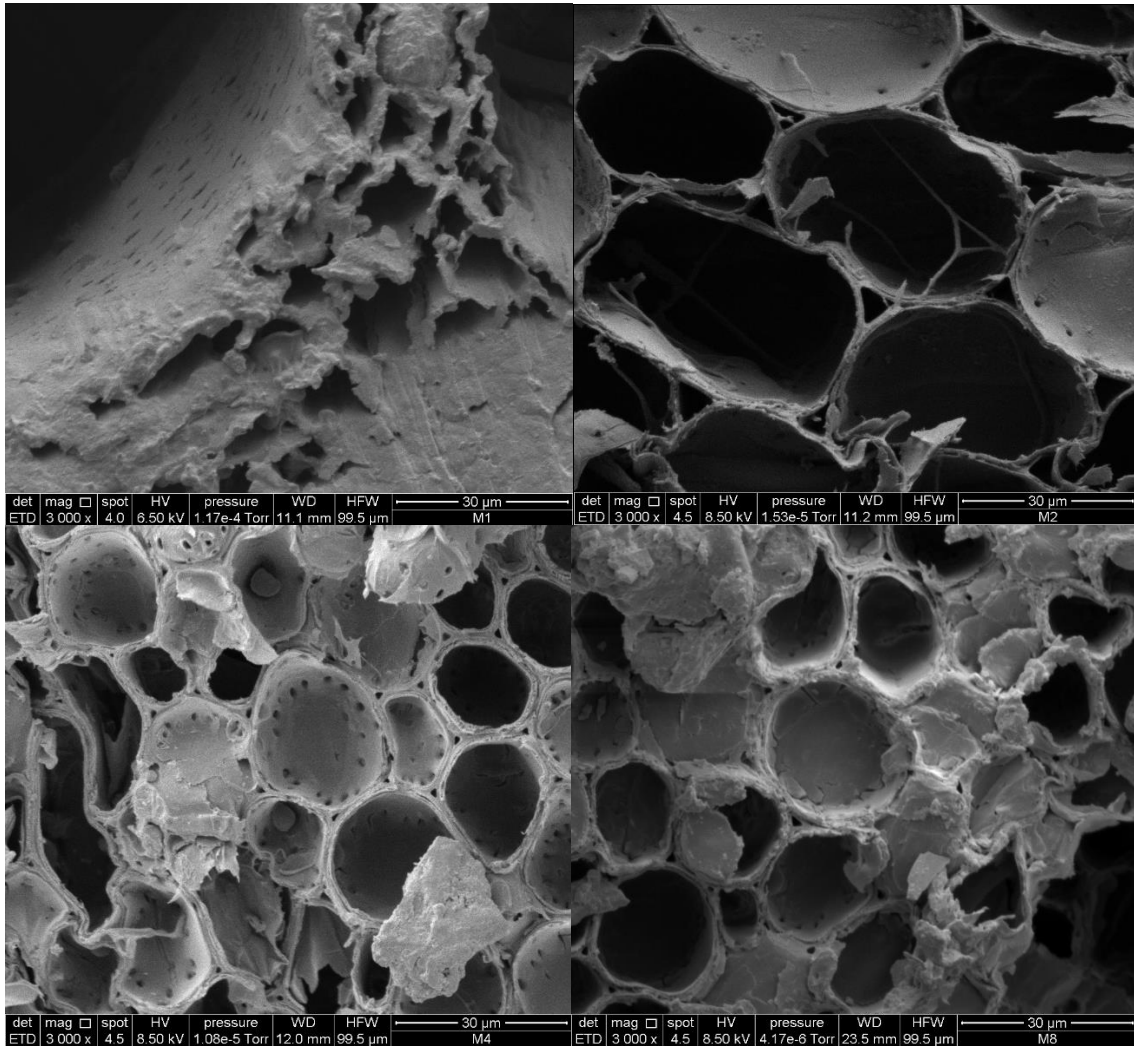
| | | | | | | | | | | | |
|----|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0 | BCN15 | 37,5 | 41,2 | 36,1 | 38,7 | 34,3 | 36,2 | 32,5 | 29,6 | 29,8 | 28,8 |
| | BCS5 | 30,8 | 32,6 | 34,4 | 29,6 | 24,6 | 25,0 | 21,4 | 24,4 | 23,4 | 21,1 |
| | BCS10 | 41,2 | 37,4 | 34,0 | 25,9 | 21,4 | 23,5 | 20,2 | 16,0 | 18,9 | 16,2 |
| | BCS6 | 39,4 | 34,8 | 26,5 | 26,8 | 18,0 | 18,0 | 20,9 | 21,5 | 20,9 | 18,9 |
| | Prom | 37,2 | 36,5 | 32,8 | 30,3 | 24,6 | 25,7 | 23,8 | 22,9 | 23,3 | 21,3 |
| | MCS14 | 34,2 | 30,6 | 23,9 | 22,3 | 13,3 | 16,3 | 14,5 | 16,6 | 17,0 | 16,1 |
| | MCS11 | 20,9 | 20,2 | 34,6 | 17,3 | 13,4 | 5,4 | 6,3 | 7,8 | 12,7 | 10,3 |
| | MCN15 | 34,0 | 36,2 | 33,8 | 34,1 | 32,3 | 30,8 | 33,1 | 31,6 | 30,3 | 26,6 |
| | MCN4 | 28,0 | 25,6 | 24,1 | 17,5 | 18,1 | 18,2 | 20,2 | 21,7 | 17,5 | 18,6 |
| | Prom | 29,3 | 28,2 | 29,1 | 22,8 | 19,3 | 17,7 | 18,5 | 19,4 | 19,4 | 17,9 |
| 45 | MCN7 | 30,2 | 29,8 | 29,6 | 28,1 | 26,0 | 25,6 | 26,0 | 26,5 | 24,8 | 26,9 |
| | MCN3 | 27,5 | 25,6 | 25,5 | 20,3 | 22,7 | 17,2 | 19,8 | 21,3 | 16,9 | 20,8 |
| | MCN14 | 23,7 | 30,5 | 32,7 | 24,6 | 28,7 | 29,0 | 31,0 | 30,4 | 29,8 | 28,7 |
| | MCS1 | 26,9 | 18,3 | 20,5 | 12,9 | 15,1 | 12,5 | 18,7 | 14,1 | 17,3 | 16,8 |
| | Prom | 27,1 | 26,1 | 27,1 | 21,5 | 23,1 | 21,1 | 23,9 | 23,1 | 22,2 | 23,3 |
| | BCN8 | 20,4 | 17,2 | 16,6 | 15,9 | 16,6 | 16,4 | 18,5 | 20,1 | 14,3 | 18,0 |
| | BCN12 | 26,7 | 24,5 | 26,5 | 20,5 | 17,0 | 17,2 | 15,2 | 14,7 | 16,1 | 17,0 |
| | BCN1 | 27,8 | 32,7 | 29,2 | 25,8 | 25,3 | 23,2 | 23,6 | 23,1 | 24,6 | 22,3 |
| | BCS13 | 23,6 | 32,0 | 25,3 | 26,2 | 27,2 | 25,4 | 27,0 | 26,7 | 24,8 | 26,0 |
| | Prom | 24,6 | 26,6 | 24,4 | 22,1 | 21,5 | 20,6 | 21,1 | 21,2 | 20,0 | 20,8 |

| | | b* | | | | | | | | | |
|-------------|--------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Ángulo (°C) | Código | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
| 90 | BCN10 | 29,6 | 29,9 | 31,6 | 31,4 | 31,4 | 33,4 | 32,0 | 32,1 | 32,9 | 31,9 |
| | BCN7 | 24,4 | 25,7 | 27,8 | 26,5 | 26,4 | 26,6 | 26,4 | 29,0 | 27,3 | 25,8 |
| | BCS14 | 23,0 | 26,2 | 28,1 | 27,9 | 29,2 | 29,3 | 30,3 | 33,3 | 33,4 | 30,3 |

| | | | | | | | | | | |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| BCS9 | 27,2 | 29,7 | 29,0 | 27,4 | 30,2 | 27,0 | 25,4 | 27,8 | 21,5 | 21,1 |
| Prom | 26,1 | 27,9 | 29,1 | 28,3 | 29,3 | 29,1 | 28,5 | 30,6 | 28,8 | 27,3 |
| MCN9 | 22,8 | 24,8 | 31,1 | 27,4 | 26,9 | 25,3 | 23,9 | 24,0 | 22,9 | 23,7 |
| MCN6 | 31,1 | 33,3 | 34,8 | 35,5 | 35,5 | 34,2 | 35,7 | 36,0 | 34,6 | 33,1 |
| MCS15 | 25,4 | 26,3 | 27,9 | 27,9 | 26,9 | 27,1 | 28,1 | 27,0 | 24,1 | 23,8 |
| MCS5 | 21,6 | 22,8 | 20,5 | 19,2 | 21,7 | 16,2 | 18,9 | 17,5 | 19,3 | 17,0 |
| Prom | 25,2 | 26,8 | 28,6 | 27,5 | 27,8 | 25,7 | 26,7 | 26,1 | 25,2 | 24,4 |

| ΔE | | | | | | | | | | | |
|-------------|------|-----------|------------|------------|------------|------------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|
| Ángulo (°C) | | 3/07/2017 | 14/08/2017 | 28/08/2017 | 11/09/2017 | 25/09/2017 | 9/10/2017 | 23/10/2017 | 6/11/2017 | 20/11/2017 | 4/12/2017 |
| 0 | Prom | 10,0 | 8,7 | 11,9 | 14,0 | 19,5 | 20,9 | 23,1 | 24,3 | 25,0 | 26,5 |
| | D.E. | 0,4 | 1,3 | 3,0 | 2,8 | 4,3 | 4,0 | 1,8 | 2,7 | 1,0 | 2,5 |
| | Prom | 9,2 | 10,7 | 10,0 | 15,5 | 18,6 | 20,7 | 21,4 | 21,3 | 21,5 | 22,6 |
| | D.E. | 0,1 | 2,5 | 0,9 | 5,5 | 6,3 | 8,4 | 8,1 | 6,4 | 4,1 | 4,0 |
| 45 | Prom | 4,9 | 8,0 | 8,3 | 9,6 | 9,8 | 12,1 | 10,1 | 10,6 | 10,6 | 10,5 |
| | D.E. | 2,5 | 2,5 | 1,6 | 5,4 | 5,4 | 5,1 | 3,1 | 4,9 | 5,1 | 4,3 |
| | Prom | 3,6 | 7,0 | 5,6 | 5,1 | 6,3 | 6,8 | 7,4 | 8,1 | 8,5 | 10,5 |
| | D.E. | 0,6 | 3,1 | 2,5 | 3,0 | 3,5 | 3,1 | 3,7 | 4,1 | 4,1 | 2,9 |
| 90 | Prom | 7,6 | 7,9 | 8,2 | 8,5 | 8,1 | 8,4 | 8,5 | 8,5 | 8,2 | 6,3 |
| | D.E. | 0,9 | 1,3 | 1,4 | 1,9 | 2,2 | 2,5 | 2,7 | 2,5 | 2,7 | 4,1 |
| | Prom | 5,7 | 5,8 | 5,7 | 5,7 | 5,6 | 6,1 | 6,0 | 6,2 | 6,3 | 6,4 |
| | D.E. | 2,5 | 2,9 | 3,2 | 3,4 | 3,3 | 3,5 | 3,1 | 2,9 | 2,4 | 3,0 |

ANEXO 3
FOTOGRAFÍAS SEM



Dónde: (a) M1: Muestra de zona basal sin intemperismo (3 000X), (b) M2: Muestra de zona media sin intemperismo, (c) M4: Muestra de zona media con 0° de ángulo de exposición (3 000X), (d) M8: Muestra de zona media con 90° de ángulo de exposición (3 000X).

ANEXO 4

DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD Y DENSIDAD DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Código de probeta | Largo (mm) | Diámetro (mm) | | | Espesor (mm) | | | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Peso seco (g) | CH final (%) | Densidad (g/cm ³) |
|-------------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------|-------------------------------|
| | | D _{sup.} | D _{base} | D _{Prom.} | E _{sup.} | E _{base} | E _{Prom.} | | | | | |
| BCN5 | 100,36 | 83,00 | 87,00 | 85,00 | 12,30 | 16,02 | 14,16 | 205 | 200 | 184 | 8,7 | 0,63 |
| BCN6 | 99,43 | 86,50 | 90,50 | 88,50 | 8,93 | 10,70 | 9,82 | 172 | 164 | 146 | 12,5 | 0,68 |
| BCN13 | 100,07 | 97,50 | 104,00 | 100,75 | 9,87 | 11,91 | 10,89 | 233 | 228 | 208 | 9,8 | 0,74 |
| BCN15 | 102,21 | 108,00 | 104,50 | 106,25 | 13,56 | 12,22 | 12,89 | 240 | 234 | 210 | 11,5 | 0,61 |
| BGS2 | 101,21 | 93,00 | 90,50 | 91,75 | 9,41 | 9,00 | 9,20 | 148 | 146 | 131 | 11,3 | 0,60 |
| BGS5 | 102,64 | 94,50 | 93,50 | 94,00 | 10,77 | 11,43 | 11,10 | 189 | 185 | 168 | 10,0 | 0,62 |
| BGS6 | 100,64 | 89,50 | 88,00 | 88,75 | 9,42 | 7,67 | 8,54 | 145 | 143 | 131 | 8,8 | 0,66 |
| BGS10 | 102,86 | 98,50 | 95,00 | 96,75 | 8,17 | 8,05 | 8,11 | 149 | 142 | 129 | 10,0 | 0,61 |
| MCN4 | 101,50 | 84,00 | 85,50 | 84,75 | 6,37 | 9,81 | 8,09 | 138 | 134 | 123 | 9,2 | 0,68 |
| MCN8 | 101,00 | 80,00 | 82,00 | 81,00 | 6,96 | 11,31 | 9,14 | 131 | 125 | 113 | 10,3 | 0,60 |
| MCN12 | 101,50 | 94,00 | 97,00 | 95,50 | 8,11 | 10,24 | 9,17 | 242 | 234 | 218 | 7,5 | 0,93 |
| MCN15 | 99,29 | 90,00 | 87,50 | 88,75 | 11,26 | 8,53 | 9,89 | 182 | 181 | 164 | 10,3 | 0,74 |
| MCS3 | 102,36 | 78,00 | 77,50 | 77,75 | 6,81 | 6,89 | 6,85 | 107 | 106 | 95 | 11,8 | 0,68 |
| MCS7 | 102,93 | 89,50 | 91,50 | 90,50 | 8,88 | 10,96 | 9,92 | 165 | 163 | 149 | 9,2 | 0,63 |
| MCS11 | 101,21 | 80,00 | 79,00 | 79,50 | 7,91 | 8,17 | 8,04 | 119 | 114 | 104 | 9,8 | 0,62 |
| MCS14 | 105,00 | 80,00 | 80,50 | 80,25 | 7,26 | 7,23 | 7,24 | 114 | 114 | 102 | 12,2 | 0,65 |
| BCN1 | 103,36 | 89,50 | 95,00 | 92,25 | 9,08 | 10,31 | 9,69 | 202 | 191 | 174 | 9,5 | 0,74 |
| BCN8 | 101,43 | 95,50 | 100,00 | 97,75 | 8,36 | 8,23 | 8,29 | 212 | 199 | 182 | 9,2 | 0,84 |
| BCN11 | 101,07 | 91,50 | 92,50 | 92,00 | 9,56 | 8,90 | 9,23 | 189 | 184 | 168 | 9,3 | 0,76 |
| BCN12 | 100,21 | 79,00 | 83,50 | 81,25 | 11,29 | 15,25 | 13,27 | 195 | 187 | 174 | 7,2 | 0,66 |
| BGS3 | 99,21 | 90,00 | 88,00 | 89,00 | 10,33 | 9,10 | 9,72 | 138 | 135 | 122 | 11,0 | 0,56 |
| BGS7 | 102,79 | 98,50 | 95,50 | 97,00 | 10,16 | 9,68 | 9,92 | 175 | 170 | 154 | 10,5 | 0,61 |
| BGS12 | 108,43 | 101,00 | 99,00 | 100,00 | 10,91 | 10,01 | 10,46 | 189 | 185 | 166 | 11,7 | 0,58 |
| BGS13 | 102,57 | 95,00 | 96,50 | 95,75 | 11,02 | 11,72 | 11,37 | 184 | 182 | 167 | 9,2 | 0,59 |
| MCN2 | 102,00 | 80,00 | 84,50 | 82,25 | 7,41 | 6,53 | 6,97 | 132 | 129 | 118 | 9,5 | 0,77 |
| MCN3 | 101,14 | 77,50 | 76,00 | 76,75 | 6,33 | 8,63 | 7,48 | 122 | 116 | 106 | 9,0 | 0,70 |
| MCN7 | 101,57 | 76,50 | 78,00 | 77,25 | 8,43 | 6,79 | 7,61 | 129 | 127 | 116 | 9,5 | 0,75 |
| MCN14 | 99,86 | 91,50 | 90,00 | 90,75 | 10,56 | 8,92 | 9,74 | 201 | 194 | 179 | 8,5 | 0,78 |
| MCS1 | 101,14 | 82,50 | 82,00 | 82,25 | 6,33 | 6,37 | 6,35 | 102 | 100 | 90 | 10,5 | 0,65 |
| MCS6 | 102,14 | 79,50 | 80,00 | 79,75 | 7,34 | 7,15 | 7,25 | 108 | 104 | 94 | 11,0 | 0,62 |
| MCS12 | 101,21 | 97,00 | 96,50 | 96,75 | 8,54 | 8,50 | 8,52 | 198 | 191 | 175 | 9,3 | 0,80 |
| MCS13 | 103,00 | 85,50 | 90,00 | 87,75 | 8,30 | 9,99 | 9,14 | 161 | 155 | 141 | 9,8 | 0,67 |
| BCN2 | 104,79 | 89,50 | 94,00 | 91,75 | 8,99 | 10,35 | 9,67 | 199 | 193 | 177 | 8,8 | 0,74 |
| BCN3 | 103,07 | 86,50 | 91,00 | 88,75 | 9,31 | 9,86 | 9,59 | 176 | 172 | 155 | 10,7 | 0,70 |
| BCN7 | 168,36 | 87,00 | 90,50 | 88,75 | 8,62 | 11,41 | 10,01 | 169 | 165 | 150 | 9,8 | 0,40 |
| BCN10 | 100,00 | 94,50 | 92,50 | 93,50 | 10,15 | 9,47 | 9,81 | 191 | 187 | 170 | 9,8 | 0,72 |

| Código de probeta | Largo (mm) | Diámetro (mm) | | | Espesor (mm) | | | Peso inicial (g) | Peso final (g) | Peso seco (g) | CH final (%) | Densidad (g/cm ³) |
|-------------------|------------|-------------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|--------------------|------------------|----------------|---------------|--------------|-------------------------------|
| | | D _{sup.} | D _{base} | D _{Prom.} | E _{sup.} | E _{base} | E _{Prom.} | | | | | |
| BCS9 | 101,43 | 90,50 | 89,00 | 89,75 | 7,74 | 6,98 | 7,36 | 119 | 117 | 107 | 9,7 | 0,61 |
| BCS11 | 105,07 | 103,50 | 100,00 | 101,75 | 11,62 | 10,41 | 11,02 | 199 | 196 | 177 | 10,8 | 0,59 |
| BCS14 | 103,79 | 95,00 | 93,50 | 94,25 | 10,66 | 10,29 | 10,48 | 183 | 183 | 166 | 10,5 | 0,64 |
| BCS15 | 104,14 | 106,00 | 107,00 | 106,50 | 9,08 | 9,07 | 9,07 | 184 | 176 | 160 | 10,2 | 0,61 |
| MCN6 | 100,79 | 78,50 | 77,50 | 78,00 | 6,78 | 7,96 | 7,37 | 131 | 130 | 119 | 9,0 | 0,79 |
| MCN9 | 101,86 | 79,50 | 79,50 | 79,50 | 7,57 | 6,88 | 7,23 | 128 | 126 | 115 | 10,0 | 0,75 |
| MCN11 | 100,07 | 99,50 | 103,50 | 101,50 | 9,70 | 9,32 | 9,51 | 281 | 273 | 254 | 7,7 | 0,99 |
| MCN13 | 99,21 | 93,00 | 90,50 | 91,75 | 12,01 | 8,75 | 10,38 | 210 | 204 | 189 | 7,8 | 0,77 |
| MCS2 | 100,07 | 83,50 | 84,00 | 83,75 | 7,62 | 7,46 | 7,54 | 111 | 112 | 101 | 10,8 | 0,62 |
| MCS5 | 100,93 | 80,00 | 83,00 | 81,50 | 7,09 | 8,91 | 8,00 | 104 | 101 | 91 | 11,2 | 0,54 |
| MCS8 | 99,14 | 92,50 | 93,00 | 92,75 | 7,42 | 7,71 | 7,56 | 138 | 132 | 121 | 9,0 | 0,66 |
| MCS15 | 100,29 | 81,00 | 82,50 | 81,75 | 7,41 | 7,45 | 7,43 | 111 | 108 | 97 | 11,2 | 0,62 |

ANEXO 5

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE FLEXIÓN

| Ángulo (°C) | Código probeta | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | MOR (MPa) | MOE (GPa) | |
|---------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|-------------|
| Sin intemperismo | BF6 | 90,92 | 8,90 | 27,89 | 1,99 | |
| | BF11 | 90,05 | 7,20 | 26,67 | 1,37 | |
| | BF14 | 98,54 | 8,41 | 26,55 | 1,88 | |
| | BF17 | 90,94 | 8,31 | 24,45 | 1,39 | |
| | BF20 | 97,51 | 8,52 | 23,20 | 1,38 | |
| | BF23 | 76,82 | 8,27 | 29,37 | 2,80 | |
| | Prom. | | | | 26,35 | 1,80 |
| | D.E. | | | | 2,24 | 0,56 |
| | MF6 | 89,85 | 8,77 | 29,80 | 1,99 | |
| | MF9 | 91,97 | 8,89 | 27,65 | 1,45 | |
| | MF12 | 96,88 | 9,49 | 27,10 | 1,98 | |
| | MF18 | 88,46 | 7,43 | 26,75 | 1,30 | |
| | MF20 | 98,95 | 10,75 | 21,10 | 1,26 | |
| | MF23 | 95,42 | 9,21 | 23,67 | 1,20 | |
| Prom. | | | | 26,01 | 1,53 | |
| D.E. | | | | 3,11 | 0,36 | |
| 0° | BF7 | 90,36 | 8,43 | 30,24 | 1,73 | |
| | BF8 | 96,95 | 7,74 | 20,04 | 1,03 | |
| | BF13 | 109,89 | 9,58 | 19,44 | 0,96 | |
| | BF15 | 98,28 | 11,01 | 21,93 | 1,21 | |
| | BF18 | 101,19 | 10,58 | 27,77 | 1,57 | |
| | BF21 | 84,53 | 10,20 | 30,60 | 2,62 | |
| | BF25 | 99,44 | 8,38 | 26,04 | 1,26 | |
| | BF30 | 96,33 | 13,31 | 27,97 | 2,26 | |
| | Prom. | | | | 25,50 | 1,58 |
| | D.E. | | | | 4,46 | 0,59 |
| | MF1 | 90,70 | 6,55 | 24,04 | 1,37 | |
| | MF3 | 91,36 | 7,20 | 23,12 | 1,46 | |
| | MF7 | 84,42 | 7,96 | 24,81 | 1,62 | |
| | MF13 | 95,61 | 8,57 | 23,79 | 1,57 | |
| MF15 | 104,72 | 7,96 | 18,54 | 0,85 | | |
| MF19 | 94,79 | 7,48 | 21,63 | 1,01 | | |
| MF29 | 82,81 | 7,68 | 34,38 | 2,81 | | |
| MF30 | 90,90 | 7,28 | 22,95 | 1,08 | | |
| Prom. | | | | 24,16 | 1,47 | |
| D.E. | | | | 4,56 | 0,61 | |

| Ángulo (°C) | Código probeta | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | MOR (MPa) | MOE (GPa) |
|--------------|----------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 45° | BF3 | 93,06 | 10,61 | 25,70 | 1,29 |
| | BF4 | 94,915 | 10,95 | 25,29 | 1,74 |
| | BF9 | 100,115 | 7,53 | 24,43 | 1,53 |
| | BF12 | 107,815 | 10,49 | 18,18 | 1,09 |
| | BF19 | 103,41 | 10,54 | 18,94 | 1,38 |
| | BF22 | 84,755 | 8,95 | 26,48 | 2,57 |
| | BF26 | 92,78 | 8,99 | 25,27 | 1,17 |
| | BF28 | 113,07 | 9,22 | 24,99 | 1,05 |
| | Prom. | | | 23,66 | 1,48 |
| | D.E. | | | 3,21 | 0,50 |
| | MF4 | 80,61 | 6,96 | 26,71 | 2,09 |
| | MF8 | 83,315 | 6,63 | 20,73 | 1,60 |
| | MF10 | 93,475 | 7,475 | 24,29 | 1,08 |
| | MF14 | 95,85 | 7,305 | 28,69 | 1,61 |
| | MF16 | 96,615 | 8,43 | 21,34 | 0,93 |
| | MF21 | 99,66 | 8,575 | 18,95 | 1,00 |
| | MF25 | 99,59 | 8,785 | 19,06 | 1,01 |
| MF26 | 93,225 | 7,71 | 22,39 | 1,07 | |
| Prom. | | | 22,77 | 1,30 | |
| D.E. | | | 3,54 | 0,42 | |
| 90° | BF1 | 91,39 | 10,99 | 26,22 | 1,37 |
| | BF2 | 94,53 | 10,72 | 22,12 | 1,46 |
| | BF5 | 96,36 | 10,39 | 24,19 | 1,37 |
| | BF10 | 98,74 | 7,53 | 21,79 | 1,01 |
| | BF16 | 99,52 | 8,95 | 20,05 | 1,16 |
| | BF24 | 103,85 | 10,28 | 28,05 | 1,69 |
| | BF27 | 11,00 | 8,29 | 19,32 | 1,24 |
| | BF29 | 107,78 | 13,98 | 17,48 | 0,83 |
| | Prom. | | | 22,40 | 1,27 |
| | D.E. | | | 3,57 | 0,27 |
| | MF2 | 75,97 | 6,71 | 20,89 | 1,81 |
| | MF5 | 78,91 | 6,70 | 24,17 | 1,57 |
| | MF11 | 87,74 | 7,50 | 22,47 | 1,22 |
| | MF17 | 100,9 | 10,36 | 20,96 | 1,15 |
| | MF22 | 94,035 | 7,64 | 24,55 | 1,10 |
| | MF24 | 96,565 | 7,58 | 29,89 | 1,49 |
| | MF27 | 98,06 | 7,95 | 25,05 | 1,42 |
| MF28 | 96,135 | 7,45 | 22,88 | 1,20 | |
| Prom. | | | 23,86 | 1,39 | |
| D.E. | | | 2,89 | 0,25 | |

ANEXO 6

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE COMPRESIÓN PARALELA

| Ángulo (°C) | Código probeta | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | RM (MPa) | MOE (GPa) |
|------------------|----------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Sin intemperismo | BCN5 | 92,00 | 7,29 | 38,88 | 4,03 |
| | BCN10 | 87,00 | 6,58 | 38,92 | 7,28 |
| | BCN13 | 104,50 | 10,70 | 30,70 | 18,77 |
| | Prom. | | | 36,16 | 10,02 |
| | D.E. | | | 4,73 | 7,74 |
| | BCS1 | 93,00 | 8,90 | 36,13 | 14,46 |
| | BCS6 | 90,00 | 9,96 | 29,05 | 2,67 |
| | BCS7 | 96,50 | 8,05 | 27,76 | 22,11 |
| | Prom. | | | 30,98 | 13,08 |
| | D.E. | | | 4,51 | 9,79 |
| | MCN2 | 73,00 | 6,39 | 35,42 | 4,85 |
| | MCN5 | 79,50 | 7,26 | 44,69 | 6,58 |
| | MCN9 | 79,50 | 6,93 | 35,89 | 11,54 |
| | Prom. | | | 38,66 | 7,66 |
| | D.E. | | | 5,23 | 3,47 |
| 0° | MCS7 | 79,50 | 6,96 | 38,97 | 16,78 |
| | MCS11 | 88,00 | 7,90 | 38,04 | 6,97 |
| | MCS14 | 81,00 | 7,97 | 26,87 | 8,20 |
| | Prom. | | | 34,63 | 10,65 |
| | D.E. | | | 6,73 | 5,34 |
| | BCN3 | 84 | 9,17 | 39,73 | 5,61 |
| | BCN4 | 90 | 10,13 | 35,44 | 3,44 |
| | BCN12 | 83,25 | 10,07 | 41,78 | 10,76 |
| | BCN14 | 104,5 | 10,48 | 32,27 | 5,44 |
| | Prom. | | | 37,30 | 6,31 |
| | D.E. | | | 4,27 | 3,12 |
| | BCS3 | 83,50 | 9,09 | 37,79 | 13,54 |
| | BCS4 | 91,25 | 8,80 | 40,48 | 6,42 |
| | BCS10 | 88,75 | 7,20 | 40,99 | 9,35 |
| | BCS11 | 94,75 | 7,61 | 42,26 | 7,95 |
| Prom. | | | 40,38 | 9,32 | |
| D.E. | | | 1,88 | 3,06 | |
| MCN4 | 84,75 | 6,54 | 35,41 | 5,55 | |
| MCN7 | 79,50 | 7,46 | 36,75 | 7,81 | |
| MCN10 | 83,50 | 7,45 | 37,76 | 8,44 | |
| MCN15 | 78,50 | 7,99 | 35,45 | 7,76 | |
| Prom. | | | 36,34 | 7,39 | |
| D.E. | | | 1,13 | 1,26 | |

| Ángulo (°C) | Código probeta | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | RM (MPa) | MOE (GPa) |
|--------------|----------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 0° | MCS3 | 83,00 | 6,44 | 39,50 | 4,35 |
| | MCS6 | 77,75 | 6,53 | 37,13 | 4,59 |
| | MCS10 | 83,25 | 7,08 | 49,09 | 11,24 |
| | MCS15 | 78,50 | 7,52 | 33,30 | 5,28 |
| | Prom. | | | 39,76 | 6,37 |
| | D.E. | | | 6,73 | 3,28 |
| 45° | BCN2 | 86 | 9,85 | 37,86 | 4,43 |
| | BCN6 | 98,75 | 8,08 | 31,98 | 2,44 |
| | BCN8 | 92,25 | 9,00 | 33,63 | 1,49 |
| | BCN11 | 90 | 7,72 | 36,68 | 8,19 |
| | Prom. | | | 35,04 | 4,14 |
| | D.E. | | | 2,71 | 2,97 |
| | BCS5 | 87,75 | 7,93 | 52,15 | 13,95 |
| | BCS8 | 91,75 | 7,32 | 39,07 | 3,86 |
| | BCS13 | 107,25 | 12,07 | 29,64 | 2,95 |
| | BCS15 | 103,5 | 10,02 | 30,24 | 3,49 |
| | Prom. | | | 37,78 | 6,06 |
| | D.E. | | | 10,51 | 5,27 |
| | MCN1 | 79,75 | 6,59 | 20,12 | 14,42 |
| | MCN3 | 79,75 | 6,58 | 26,47 | 6,97 |
| | MCN8 | 93,5 | 8,49 | 39,85 | 5,93 |
| MCN13 | 82,75 | 8,25 | 39,62 | 9,38 | |
| Prom. | | | 31,51 | 9,17 | |
| D.E. | | | 9,84 | 3,78 | |
| 90° | MCS1 | 85 | 6,32 | 35,58 | 5,26 |
| | MCS8 | 80,475 | 7,02 | 36,51 | 8,82 |
| | MCS12 | 90,25 | 9,32 | 46,54 | 5,51 |
| | MCS13 | 82,75 | 8,00 | 34,34 | 3,24 |
| | Prom. | | | 38,24 | 5,71 |
| | D.E. | | | 5,60 | 2,31 |
| 90° | BCN1 | 93,00 | 9,26 | 36,72 | 4,13 |
| | BCN7 | 93,25 | 8,00 | 38,11 | 6,96 |
| | BCN9 | 93,00 | 7,94 | 42,36 | 4,13 |
| | BCN15 | 96,75 | 14,82 | 34,17 | 3,12 |
| | Prom. | | | 37,84 | 4,59 |
| | D.E. | | | 3,43 | 1,65 |
| | BCS2 | 86,00 | 9,62 | 36,53 | 3,85 |
| | BCS9 | 99,50 | 9,88 | 31,65 | 3,77 |
| | BCS12 | 94,25 | 8,40 | 34,45 | 4,09 |
| | BCS14 | 106,25 | 11,49 | 28,99 | 1,43 |
| | Prom. | | | 32,91 | 3,28 |
| | D.E. | | | 3,29 | 1,25 |

| Ángulo (°C) | Código probeta | Diámetro (mm) | Espesor (mm) | MOR (MPa) | MOE (GPa) |
|-------------|----------------|---------------|--------------|--------------|-------------|
| 90° | MCN6 | 79,75 | 7,60 | 39,25 | 4,09 |
| | MCN11 | 91,50 | 8,40 | 38,93 | 9,93 |
| | MCN12 | 97,75 | 9,20 | 36,59 | 4,97 |
| | MCN14 | 83,75 | 8,07 | 32,68 | 3,23 |
| | Prom. | | | 36,86 | 5,55 |
| | D.E. | | | 3,03 | 3,00 |
| | MCS2 | 82,00 | 6,62 | 35,02 | 7,42 |
| | MCS4 | 79,00 | 6,29 | 40,41 | 10,73 |
| | MCS5 | 80,25 | 6,44 | 37,55 | 3,63 |
| | MCS9 | 94,50 | 9,72 | 41,24 | 8,55 |
| | Prom. | | | 38,56 | 7,58 |
| | D.E. | | | 2,84 | 2,97 |

ANEXO 7

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE TENSIÓN

| Ángulo (°C) | Código probeta | Ancho (mm) | Espesor (mm) | MOR (MPa) | MOE (GPa) |
|---------------------|----------------|------------|---------------|---------------|--------------|
| Sin intemperismo | BT1.1 | 7,38 | 9,33 | 87,63 | 33,75 |
| | BT1.2 | 7,92 | 9,80 | 74,59 | 30,44 |
| | BT2.1 | 7,32 | 9,52 | 106,94 | 32,90 |
| | BT2.2 | 7,20 | 8,14 | 113,89 | 37,31 |
| | BT3.2 | 7,50 | 10,33 | 121,11 | 19,59 |
| | BT3.5 | 7,66 | 12,12 | 112,76 | 13,51 |
| | Prom. | | | 102,82 | 27,92 |
| | D.E. | | | 17,89 | 9,28 |
| | MT1.1 | 7,09 | 6,41 | 133,31 | 99,39 |
| | MT1.2 | 7,63 | 6,68 | 112,76 | 49,20 |
| | MT2.1 | 7,36 | 8,51 | 142,75 | 26,96 |
| | MT2.2 | 7,37 | 7,73 | 130,65 | 35,45 |
| | MT3.1 | 8,52 | 7,10 | 75,92 | 42,24 |
| | MT3.2 | 7,11 | 7,53 | 131,22 | ----- |
| Prom. | | | 121,10 | 50,65 | |
| D.E. | | | 24,17 | 28,46 | |
| 0° | BT1.3 | 6,81 | 10,73 | 74,97 | ----- |
| | BT1.4 | 7,92 | 9,80 | 68,98 | 30,52 |
| | BT1.10 | 7,16 | 10,43 | 83,99 | 33,84 |
| | BT2.4 | 7,71 | 8,69 | 117,11 | 34,81 |
| | BT2.5 | 9,09 | 8,42 | 99,54 | 27,17 |
| | BT3.1 | 7,42 | 11,89 | 62,81 | 16,97 |
| | BT3.4 | 8,83 | 10,69 | 85,58 | 24,47 |
| | BT3.9 | 8,46 | 13,41 | 67,34 | 18,38 |
| | BT3.12 | 7,39 | 12,92 | 95,62 | 14,79 |
| | Prom. | | | 83,99 | 25,12 |
| | D.E. | | | 17,71 | 7,76 |
| | MT1.3 | 6,06 | 8,15 | 77,67 | 28,09 |
| | MT1.4 | 7,49 | 7,73 | 84,63 | 45,59 |
| | MT2.3 | 7,63 | 6,43 | 72,68 | 60,61 |
| | MT2.4 | 7,91 | 6,97 | 91,29 | 50,46 |
| | MT2.10 | 7,82 | 7,88 | 132,39 | 29,90 |
| | MT3.3 | 7,72 | 7,76 | 110,59 | 36,08 |
| | MT3.4 | 5,75 | 6,62 | 106,11 | 47,41 |
| Prom. | | | 96,48 | 42,59 | |
| D.E. | | | 21,09 | 11,78 | |

| Ángulo (°C) | Código probeta | Ancho (mm) | Espesor (mm) | MOR (MPa) | MOE (GPa) |
|--------------|----------------|------------|---------------|--------------|--------------|
| 45° | BT1.5 | 7,78 | 8,84 | 82,92 | 44,45 |
| | BT1.6 | 7,98 | 10,96 | 49,93 | 18,38 |
| | BT2.3 | 7,46 | 8,36 | 86,59 | 28,22 |
| | BT2.6 | 6,99 | 7,42 | 77,36 | 27,56 |
| | BT2.9 | 8,53 | 7,14 | 119,93 | 19,49 |
| | BT3.3 | 7,24 | 12,06 | 55,94 | 16,33 |
| | BT3.6 | 7,49 | 12,24 | 74,41 | ----- |
| | BT3.11 | 8,51 | 14,76 | 77,11 | ----- |
| | Prom. | | | 78,02 | 25,74 |
| | D.E. | | | 21,19 | 10,40 |
| | MT1.5 | 6,35 | 8,03 | 105,73 | 22,65 |
| | MT1.6 | 6,43 | 8,09 | 98,47 | ----- |
| | MT1.9 | 8,72 | 8,63 | 68,48 | 19,11 |
| | MT2.5 | 8,41 | 8,56 | 117,48 | 22,93 |
| | MT2.6 | 9,64 | 8,33 | 112,27 | 19,56 |
| MT3.5 | 7,73 | 7,44 | 108,13 | 28,21 | |
| MT3.6 | 8,05 | 7,02 | 110,15 | 30,07 | |
| MT3.9 | 6,86 | 7,43 | 115,72 | 25,65 | |
| Prom. | | | 104,55 | 24,03 | |
| D.E. | | | 15,75 | 4,16 | |
| 90° | BT1.7 | 6,20 | 10,15 | 64,46 | 19,14 |
| | BT1.8 | 6,31 | 8,15 | 125,37 | ----- |
| | BT1.9 | 8,33 | 6,90 | 129,34 | ----- |
| | BT2.7 | 6,45 | 7,50 | 99,68 | 51,33 |
| | BT2.8 | 7,23 | 7,96 | 92,44 | 34,78 |
| | BT 3.7 | 6,44 | 13,25 | 79,55 | 14,39 |
| | BT3.8 | 6,10 | 11,71 | 78,32 | ----- |
| | BT3.10 | 8,32 | 11,72 | 87,84 | 12,83 |
| | Prom. | | | 94,62 | 26,49 |
| | D.E. | | | 22,77 | 16,38 |
| | MT1.7 | 7,25 | 8,22 | 55,83 | 18,58 |
| | MT1.8 | 7,76 | 7,48 | 67,25 | 39,57 |
| | MT2.7 | 7,98 | 8,74 | 120,88 | ----- |
| | MT2.8 | 8,17 | 8,23 | 107,44 | ----- |
| | MT2.9 | 8,57 | 8,08 | 99,83 | 38,75 |
| MT3.7 | 7,05 | 7,72 | 134,59 | ----- | |
| MT3.8 | 7,84 | 7,79 | 111,58 | 33,81 | |
| MT3.10 | 8,18 | 7,17 | 139,16 | 29,37 | |
| Prom. | | | 104,57 | 32,02 | |
| D.E. | | | 29,79 | 8,56 | |

ANEXO 8

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CAMBIO DE LA VARIACIÓN DE COLOR DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 5 | 1394,9 | 278,98 | 26,39 | <0,0001 |
| Error | 18 | 190,28 | 10,57 | | |
| Total corregida | 23 | 1585,18 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,88 | 23,15 | 8,13 | 14,04 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 19,44 | 19,44 | 1,84 | 0,1918 |
| A | 2 | 1360,22 | 680,11 | 64,34 | <0,0001 |
| Z*A | 2 | 15,24 | 7,62 | 0,72 | 0,4998 |

ANEXO 9

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 11 | 24,72 | 2,25 | 1,92 | 0,069 |
| Error | 36 | 42,08 | 1,17 | | |
| Total corregida | 47 | 66,79 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,37 | 10,93 | 2,42 | 9,89 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 0,85 | 0,85 | 0,73 | 0,3985 |
| N | 1 | 12,4 | 12,4 | 10,61 | 0,0025 |
| A | 2 | 2,24 | 1,12 | 0,96 | 0,3937 |
| Z*N | 1 | 2,34 | 2,34 | 2 | 0,1656 |
| Z*A | 2 | 0,3 | 0,15 | 0,13 | 0,8789 |
| N*A | 2 | 2,26 | 1,13 | 0,97 | 0,3899 |
| Z*N*A | 2 | 4,32 | 2,16 | 1,85 | 0,1721 |

ANEXO 10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA DENSIDAD DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------|---------|
| Modelo | 11 | 0,09 | 0,01 | 1,6 | 0,1401 |
| Error | 36 | 0,18 | 5,00E-03 | | |
| Total corregida | 47 | 0,27 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,33 | 11,09 | 0,10 | 0,64 | | |

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|--------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Z | 1 | 0,03 | 0,03 | 6,98 | 0,0121 |
| N | 1 | 3,50E-03 | 3,50E-03 | 0,71 | 0,4065 |
| A | 2 | 3,70E-03 | 1,90E-03 | 0,37 | 0,6913 |
| Z*N | 1 | 2,30E-03 | 2,30E-03 | 0,46 | 0,5034 |
| Z*A | 2 | 3,20E-03 | 1,60E-03 | 0,33 | 0,7239 |
| N*A | 2 | 0,01 | 2,80E-03 | 0,57 | 0,5722 |
| Z*N*A | 2 | 0,03 | 0,02 | 3,47 | 0,0418 |

ANEXO 11

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA FLEXIÓN DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------|---------|
| Modelo | 7 | 106,63 | 15,23 | 1,19 | 0,3251 |
| Error | 52 | 665,87 | 12,81 | | |
| Total corregida | 59 | 772,51 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,14 | 14,78 | 4,35 | 24,22 | | |

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Z | 1 | 1,17 | 1,17 | 0,09 | 0,7639 |
| A | 3 | 87,39 | 29,13 | 2,27 | 0,0907 |
| Z*A | 3 | 18,09 | 6,03 | 0,47 | 0,7039 |

ANEXO 12

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 7 | 1,42 | 0,20 | 0,94 | 0,4819 |
| Error | 52 | 11,20 | 0,22 | | |
| Total corregida | 59 | 12,62 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,11 | 31,75 | 0,89 | 1,46 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 0,19 | 0,19 | 0,89 | 0,3501 |
| A | 3 | 0,98 | 0,33 | 1,52 | 0,2202 |
| Z*A | 3 | 0,28 | 0,09 | 0,43 | 0,7306 |

ANEXO 13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A LA COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 15 | 424,51 | 28,3 | 0,96 | 0,5072 |
| Error | 44 | 1292,87 | 29,38 | | |
| Total corregida | 59 | 1717,39 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,25 | 14,84 | 5,35 | 36,52 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 8,80 | 8,80 | 0,30 | 0,5869 |
| N | 1 | 2,80 | 2,80 | 0,10 | 0,7590 |
| A | 3 | 95,51 | 31,84 | 1,08 | 0,3660 |
| Z*N | 1 | 33,80 | 33,80 | 1,15 | 0,2894 |
| Z*A | 3 | 56,28 | 18,76 | 0,64 | 0,5943 |
| N*A | 3 | 197,10 | 65,70 | 2,24 | 0,0974 |
| Z*N*A | 3 | 23,72 | 7,91 | 0,27 | 0,8473 |

ANEXO 14

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN PARALELA A LA FIBRA DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 15 | 354,70 | 23,65 | 1,44 | 0,1715 |
| Error | 44 | 722,44 | 16,42 | | |
| Total corregida | 59 | 1077,14 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,33 | 57,05 | 6,61 | 7,10 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 2,48 | 2,48 | 0,15 | 0,6995 |
| N | 1 | 11,99 | 11,99 | 0,73 | 0,3974 |
| A | 3 | 193,63 | 64,54 | 3,93 | 0,0143 |
| Z*N | 1 | 8,74 | 8,74 | 0,53 | 0,4696 |
| Z*A | 3 | 65,11 | 21,70 | 1,32 | 0,2793 |
| N*A | 3 | 25,58 | 8,53 | 0,52 | 0,6711 |
| Z*N*A | 3 | 46,33 | 15,44 | 0,94 | 0,4292 |

ANEXO 15

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA RESISTENCIA MÁXIMA A TENSIÓN DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|----------------|---------|---------|
| Modelo | 7 | 9052,5 | 1293,21 | 2,75 | 0,0164 |
| Error | 52 | 24422,29 | 469,66 | | |
| Total corregida | 59 | 33474,79 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,27 | 22,31 | 23,35 | 97,15 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 4158,61 | 4158,61 | 8,85 | 0,0044 |
| A | 3 | 4027,21 | 1342,4 | 2,86 | 0,0458 |
| Z*A | 3 | 646,43 | 215,48 | 0,46 | 0,7123 |

ANEXO 16

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN TENSIÓN DESPUÉS DEL INTEMPERISMO

| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
|------------------------|--------------------|-------------------|-----------------|---------|---------|
| Modelo | 7 | 3812,56 | 544,65 | 3,22 | 0,0082 |
| Error | 41 | 6936,98 | 169,19 | | |
| Total corregida | 48 | 10749,54 | | | |
| R cuadrado | C.V. | RMSE | Promedio | | |
| 0,35 | 41,52 | 20,21 | 31,33 | | |
| Fuente | Grados de libertad | Suma de cuadrados | Cuadrado medio | Razón F | Valor p |
| Z | 1 | 1441,3 | 1441,3 | 8,52 | 0,0057 |
| A | 3 | 1356,93 | 452,31 | 2,67 | 0,0599 |
| Z*A | 3 | 1128,74 | 376,25 | 2,22 | 0,0999 |