



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO

DIVISIÓN DE CIENCIAS FORESTALES

DETERMINACIÓN DE LA MADUREZ DE *Guadua angustifolia* Kunth POR PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Que como requisito parcial para obtener el grado de:

Maestro en Ciencias en Ciencias Forestales



Presenta:

Hernández López Surisaddai

DIRECCION GENERAL ACADÉMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
SECRETARIA DE EXAMENES PROFESIONALES

Bajo la supervisión de: Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

Chapingo, Edo. de México, Julio de 2019

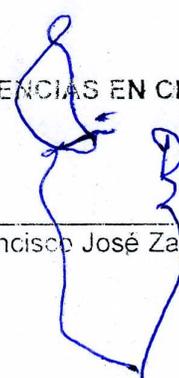


DETERMINACIÓN DE LA MADUREZ DE *Guadua angustifolia* Kunth POR PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Tesis realizada por **Surisaddai Hernández López** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN CIENCIAS FORESTALES

DIRECTOR:


M.C. Francisco José Zamudio Sánchez

CODIRECTOR:


Dra. Adriana Ávalos Vargas

ASESOR:


M.C. Ma. Amparo Máxima Borja de la Rosa

ASESOR:


Dra. Gabriela Orozco Gutiérrez

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	v
DEDICATORIA	vi
DATOS BIOGRÁFICOS	vii
1. INTRODUCCIÓN GENERAL	3
1.1 OBJETIVO GENERAL:	4
1.1 OBJETIVOS PARTICULARES:	4
2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. GENERALIDADES DEL BAMBÚ	5
2.2. IMPORTANCIA	5
2.3. DISTRIBUCIÓN	6
2.4. <i>Guadua angustifolia</i>	7
2.4.1. Biología, anatomía y estructura	7
2.4.2. Culmo, crecimiento y fisiología	8
2.5. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL BAMBÚ	11
2.6. LITERATURA CITADA	12
3. COLORIMETRÍA DE LOS CULMOS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> KUNTH EN TRES ESTADOS DE MADUREZ	15
RESUMEN	15
ABSTRACT	15
3.1. INTRODUCCIÓN	16
3.2. METODOLOGÍA	18
3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	21
3.4. CONCLUSIÓN	25
3.5. LITERATURA CITADA	26
4. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> KUNTH A TRES EDADES	28
RESUMEN	28
ABSTRACT	29
4.1. INTRODUCCIÓN	30
4.2. METODOLOGÍA	32
4.2.1. Comparación de modelos matemáticos de estimación para predecir características mecánicas	32
4.2.2. Determinación de un modelo de ajuste	33
4.2.3. Determinación de la densidad en <i>Guadua angustifolia</i>	35
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	37
4.3.1. Los culmos de AGROMOD en Chiapas	39
4.4. CONCLUSIÓN	44
4.5. LITERATURA CITADA	45
5. DISCUSIÓN GENERAL	48
6. CONCLUSIÓN	49

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. CRITERIOS DE PERCEPCIÓN DE DIFERENCIA DE COLOR ΔE^* _____	20
TABLA 2. ESTADÍSTICA COLORIMÉTRICA (MEDIA \pm SD) POR EDAD. PRUEBA DE TUKEY _____	23
TABLA 3. VALORES MEDIOS DE LAS COORDENADAS COLORIMÉTRICAS PARA CADA FACTOR EVALUADO, DIFERENCIAS CORRESPONDIENTES Y VARIACIÓN TOTAL DEL COLOR _____	24
TABLA 4. INTERVALOS DE CONFIANZA _____	24
TABLA 6. FÓRMULAS PARA PREDECIR LAS CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS DE MADERAS MEXICANAS _____	33
TABLA 6. ESTADÍSTICA DE RESUMEN DE LOS ERRORES RELATIVO (%) _____	34
TABLA 7. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y PRUEBA DE TUKEY PARA EL E_s (KG/CM ²) _____	38
TABLA 8. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA Y PRUEBA DE TUKEY PARA EL E_{DIN} (KG/CM ²) _____	38
TABLA 10. VALORES DE DENSIDAD BÁSICA, PARA <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> DETERMINADOS POR SECCIÓN DEL CULMO _____	39
TABLA 11. PRUEBA DE TUKEY PARA EL E_{DIN} POR SECCIÓN _____	41
TABLA 12. PRUEBA DE TUKEY PARA EL E_s POR SECCIÓN _____	42
TABLA 13. RESUMEN ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> , SU CLASIFICACIÓN Y COMPARACIÓN CON MADERAS MEXICANAS _____	43
TABLA 14. NORMA COLOMBIANA. REQUISITOS DE CALIDAD. _____	44

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DISTRIBUCIÓN DEL BAMBÚ EN MÉXICO _____	6
FIGURA 2. CULMO DE <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> , CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS _____	8
FIGURA 3. BROTE DE BAMBÚ EN <i>GUADUA ANGUSTIFOLIA</i> _____	9
FIGURA 4. SECCIONES DEL CULMO PARA EL ESTUDIO _____	19
FIGURA 5. GRÁFICA CIE-L*A*B* DE <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> A LOS 2 AÑOS _____	21
FIGURA 6. GRÁFICA CIE-L*A*B* DE <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> A LOS 4 AÑOS _____	22
FIGURA 7. GRÁFICA CIE-L*A*B* DE <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> A LOS 6 AÑOS _____	22
FIGURA 8. COLORES DEL CULMO DE BAMBÚ A DIFERENTES ESTADOS DE MADUREZ _____	25
FIGURA 9. RELACIÓN ENTRE DENSIDAD Y MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO PARA <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> _____	35
FIGURA 10. RELACIÓN DE LA DENSIDAD Y EL MÓDULO DE ELASTICIDAD POR FLEXIÓN PARA <i>G. ANGUSTIFOLIA</i> _____	35
FIGURA 11. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO _____	37
FIGURA 12. COMPARACIÓN DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DINÁMICO _____	37
FIGURA 13. COMPORTAMIENTO DE E_s Y E_{DIN} _____	40
FIGURA 14. COMPARACIÓN DEL E_{DIN} POR EDAD Y SECCIÓN DEL CULMO. _____	41
FIGURA 15. COMPARACIÓN DEL E_s POR EDAD Y SECCIÓN DEL CULMO _____	42

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el financiamiento otorgado para realizar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo y a la Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales por permitirme realizar mis estudios en sus instalaciones.

A los miembros del comité asesor, en especial al Dra. Adriana Ávalos Vargas por su excelente guía en esta investigación.

Al Dr. Leopoldo Mohedano Caballero por su apoyo, tiempo y dedicación durante el desarrollo de esta investigación.

Al equipo de trabajo que me ayudaron en la toma de datos en la investigación y desarrollo de la misma (Lic. Claudio Alfredo González Reyes, Ing. Raquel Cid Muñoz, Ing. Araceli De Jesús Vicente y Dra. Yolanda Franco Islas)

A la plantación AGROMOD por donar el material de investigación

DEDICATORIA

A mi madre María Lucía Hernández López, a mi abuela Prisciliana López Sánchez y a mi tía Concepción Hernández López; por su esfuerzo en el transcurso de mis estudios, por apoyarme siempre en todas mis decisiones, a quienes debo todo lo que soy; porque gracias a ellas hoy culmino una etapa importante en mi vida.

A mi abuelo Ubaldo Hernández por ser un padre para mí y brindarme todo su apoyo; porque gracias a él, este trabajo pudo ser realizado. Este logro también es tuyo.

A mi hermano Alberto Ubaldo Hernández, por su apoyo incondicional y su paciencia; por nunca dejarme sola.

A Claudio Alfredo González Reyes, por tu paciencia y apoyo incondicional en el desarrollo de esta meta.

Aquellas personas que estuvieron conmigo en los momentos felices y en los difíciles en esta etapa de mi vida, gracias por ayudarme a levantar y seguir siempre adelante.

DATOS BIOGRÁFICOS



Datos personales

Nombre: Surisaddai Hernández López

Fecha de nacimiento: 29 de abril de 1994

Lugar de nacimiento: Santa Ana Chiautempan, Tlaxcala

CURP: HELS940429MTLRPR02

Cédula profesional: 10528743

Desarrollo académico

Preparatoria: Preparatoria Agrícola en la Universidad Autónoma Chapingo

Licenciatura: Ingeniería en Restauración Forestal, Universidad Autónoma Chapingo

DETERMINACIÓN DE LA MADUREZ DE *Guadua angustifolia* Kunth POR PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS¹

DETERMINATION OF THE MATURITY OF *Guadua angustifolia* Kunth BY PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

RESUMEN

Los objetivos de este trabajo fueron describir el color del culmo de *Guadua angustifolia*, con el sistema colorimétrico CIELab, y analizar la variabilidad entre los tres estados de madurez (joven, maduro y sobremaduro). Asimismo, obtener el módulo de elasticidad dinámico y estático utilizando las metodologías propuestas para madera por Brown et al., (1980) y Sotomayor (2005), que dependen de la densidad, y compararlas con los valores prácticos obtenidos de una investigación previa y con dichos valores proponer un modelo matemático adecuado para la predicción de estas propiedades para *G. angustifolia*. El material de estudio se recolectó en la plantación de la empresa AGROMOD, ubicada en Reforma, Chiapas. Se tomaron 36 culmos de dos, cuatro y seis años. El color se determinó con ayuda de un colorímetro digital, bajo el sistema colorimétrico CIELab. La densidad se obtuvo en laboratorio, de acuerdo

ABSTRACT

The aims of this work were to describe the color of the culm of *Guadua angustifolia* with the CIE-L*a*b* colorimetric system and to analyze the variability between the three stages of maturity (young, mature and overmature). Also, to obtain the dynamic and static elastic moduli using the methodologies proposed by Brown et al. (1980) and Sotomayor (2005), that depend on the density and to compare them with the practical values obtained from a previous investigation and, with these values, to propose a mathematical model suitable for prediction of these properties for *G. angustifolia*. The study material was collected in the plantation of the company AGROMOD, located in Reforma, Chiapas state, Mexico. A total of 36 culms, of two, four and six years, was taken. The color was determined with the help of a digital colorimeter under the CIELab colorimetric system. The density was obtained in the laboratory, in accordance with

¹ Tesis de Maestría en Ciencias en Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo
Autor: Surisaddai Hernández López
Director de tesis: Dr. Francisco José Zamudio Sánchez

con las normas *ISO-22157 e ISO/TR 22157-2*. Partiendo de los datos de Jangra (2016), se tomaron los valores de la densidad y se les aplicaron las metodologías propuestas por Brown et al. (1980) y Sotomayor (2005) y se compararon los módulos de elasticidad obtenidos de estas técnicas con los valores prácticos de Jangra (2016). Posteriormente, con la densidad como variable independiente y los módulos de elasticidad prácticos se realizó un modelo de regresión exponencial, para obtener un modelo de predicción de las propiedades mecánicas en bambú y se aplicó a los datos de densidad obtenidos en esta investigación. Como consecuencia de la madurez se observó un cambio secuencial de coloración en la parte externa del culmo, desde un verde claro, verde grisáceo hasta un tono café. Los modelos propuestos para madera subestimaron los valores reales de las propiedades mecánicas para el bambú. Los modelos propuestos obtuvieron una correlación de 0.88 y 0.61, por tanto, son confiables para la predicción de la resistencia mecánica en función de su densidad.

Palabras clave: bambú, CIELab, densidad, propiedades mecánicas

ISO-22157 and ISO / TR 22157-2 standards. Based on data from Jangra (2016) the density values were taken and applied to the methodologies proposed by Brown et al. (1980) and Sotomayor (2005) and the elasticity moduli obtained from these techniques were compared to with the practical values of Jangra (2016). Subsequently, with the density as independent variable and the practical elasticity moduli an exponential regression model was performed, to obtain a prediction model of the mechanical properties in bamboo and was applied to the density data obtained in this investigation. As a consequence of the maturity, a sequential change of coloration was observed in the external part of the culm, from a light green, grayish green to a brown tone. The models proposed for wood underestimated the actual values of the mechanical properties for the bamboo. The proposed models obtained a correlation of 0.88 and 0.61, therefore, they are reliable for the prediction of the mechanical resistance as a function of its density.

Keywords: bamboo, CIELab, density, mechanical properties

1. INTRODUCCIÓN GENERAL

El bambú es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas, representa un recurso natural renovable de rápido crecimiento, gracias a la diversidad de productos forestales de diversos usos, es una especie promisor de valor ambiental y socioeconómico (Mercedes, 2006).

En el mundo existen aproximadamente 1,250 especies de Bambú, distribuidas mayormente en los continentes americano y asiático (Mercedes, 2006). En México se tienen cerca de 54 especies de bambúes nativos de los cuales 31 son endémicas y alrededor de 30 introducidas (Mercedes, 2006; Ruiz-Sánchez, et. al, 2015).

De estas especies la más destacada es la *Guadua angustifolia*, es uno de los materiales más utilizados desde la más remota antigüedad por el hombre principalmente para su uso en construcción (Liese & Köhl, 2015). Sin embargo, su manejo ha sido de manera empírica, dado que la información básica sobre el establecimiento del cultivo y su aprovechamiento es escasa, principalmente en las características fenotípicas que debe tener el bambú para ser cosechado.

Parte de ese conocimiento empírico es el color del culmo, pues es una de las características que los productores utilizan como indicador de madurez. Al respecto, Schröder (2012) menciona que el bambú cambia gradualmente en el exterior, lo que permite reconocer cuatro etapas muy definidas: brotes, culmos jóvenes, maduros y viejos. Por ello, es importante realizar estudios de colorimetría para las distintas especies de bambú.

Otras características que son de importante estudio son las propiedades físicas y mecánicas, ya que proporcionan el conocimiento necesario para comprender el comportamiento de este material y su uso adecuado (Álvarez, 2012).

El presente documento corresponde a una investigación de *Guadua angustifolia* Kunth a tres edades, en la que se estudiaron las características físicas (color, contenido de humedad y densidad) mediante el sistema colorimétrico CIE-L*a*b* y la normatividad *ISO-22157* e *ISO/TR-22157-2* y las pruebas mecánicas (módulo de elasticidad estático y dinámico) por medio del uso de modelos matemáticos en madera y la propuesta de un modelo para el *G. angustifolia* basado en datos de una investigación previa.

El documento se presenta de la siguiente manera: el capítulo primero es la revisión de literatura, el capítulo segundo se refiere al análisis colorimétrico de *G. angustifolia* a tres edades y finalmente el capítulo tercero responde a la temática de las propiedades físico-mecánicas mediante un modelo matemático.

1.1 OBJETIVO GENERAL:

- Determinar la madurez de *Guadua angustifolia* Kunth por propiedades físico-mecánicas para su aprovechamiento

1.1 OBJETIVOS PARTICULARES:

- Determinar las propiedades de *Guadua angustifolia* a tres edades mediante pruebas físicas: color y densidad básica y pruebas mecánicas: módulos de elasticidad para determinar la edad de aprovechamiento
- Relacionar la edad del bambú con el color y la densidad, mediante una función matemática para verificar el método tradicional de aprovechamiento

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. GENERALIDADES DEL BAMBÚ

Se denomina bambú a un grupo de plantas que pertenecen a la subfamilia *Bambusoideae* dentro de la familia de las gramíneas (*Poaceae*), son el único linaje importante dentro de la familia que se adapta y diversifica dentro del hábitat forestal (Liese & Köhl, 2015). A diferencia de la gran mayoría de las especies de esta familia, los bambúes en general son plantas grandes y robustas. Las características que hacen a los bambúes ser diferentes del resto de las gramíneas, son (Cortés, 2000):

- Tienen hábito perenne
- Los rizomas se presentan en general bien desarrollados
- Los tallos o culmos son siempre lignificados y fuertes
- Las hojas presentan un pseudopécíolo
- El antecio presenta tres lodículas
- El período de floración puede tomar muchos años.

2.2. IMPORTANCIA

El bambú tiene un gran potencial para mitigar muchos problemas, tanto ambientales como sociales y económicos (Zhou, et al., 2005).

En el aspecto ambiental, los guaduales favorecen la subsistencia de flora y fauna, se asocia con vegetación muy diversa y numerosa que le permite constituir una estructura vertical triestratofítica, característica de las sociedades vegetales altamente desarrolladas y evolucionadas y que tolera una amplia interrelación entre los diferentes componentes del sistema (Giraldo, 2009). Además, su rápido

crecimiento permite producir y aportar al suelo biomasa, lo cual contribuye a enriquecer y mejorar la estructura y textura del suelo (Sánchez, 2009).

Por otra parte, en el aspecto socioeconómico, el uso del bambú ha estado asociado con las actividades de la civilización humana desde tiempo antiguos. Actualmente, tiene aplicación en el campo de la Arquitectura, Ingeniería, Medicina, Química y la Industria (Mercedes, 2006). Dado los diferentes productos que se derivan de esta planta, éstos, en general, son especies promisorias de alto valor económico (Mejía et al., 2009).

2.3. DISTRIBUCIÓN

En el mundo existen aproximadamente 1,250 especies de Bambú, distribuidas mayormente en los continentes americano y asiático (Mercedes, 2006). Actualmente, México tiene 54 especies de bambúes nativos de los cuales 31 son especies endémicas (Mercedes, 2006; Ruiz-Sánchez, et. al, 2015). También se han introducido cerca de 30 especies siendo *Guadua angustifolia* la de mayor importancia para la construcción (Cedeño & Irigoyen , 2011). La Figura 1 presenta la distribución del bambú en México.

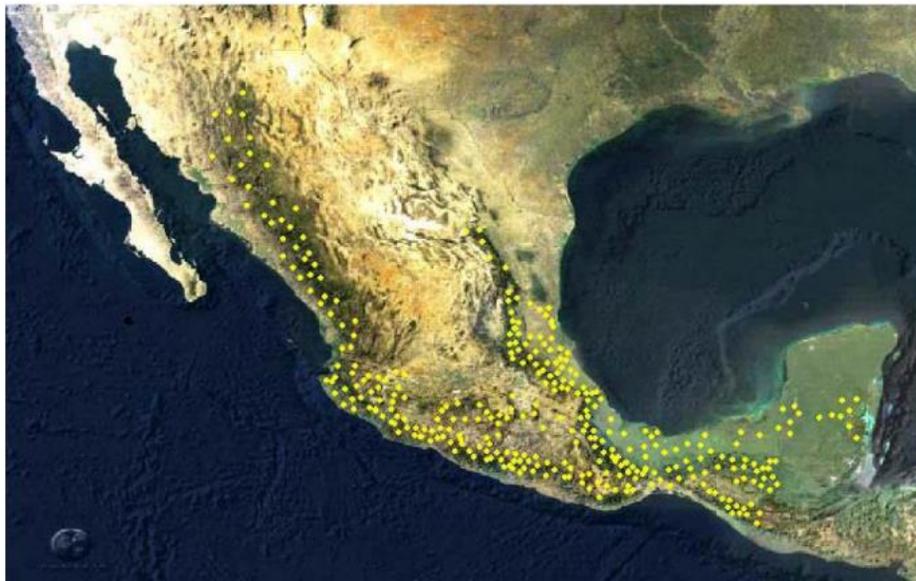


Figura 1. Distribución del bambú en México
Fuente: Luna, Lozano, & Takeuchi (2014)

2.4. Guadua angustifolia

2.4.1. Biología, anatomía y estructura

Guadua angustifolia es originaria de Colombia, Ecuador y Venezuela, fue introducida a México en 1995 (Lárraga-Sánchez et al., 2011). Presenta rizomas paquimorfos y culmos en macollos bien definidos que llegan a medir hasta 30 m de alto, color verde oscuro con bandas blancas en los nudos, tiene un diámetro de hasta 20 cm. Los entrenudos son cortos miden aproximadamente 26 cm de largo. Posee hojas caulinares caedizas y con abundante pubescencia oscura, sin aurículas presentes en la unión con las láminas (Cortés, 2015; Liese & Köhl, 2015).

La ramificación se encuentra por arriba de los nudos inferiores, una rama dominante y varias secundarias, los nudos de las ramas con espinas. Las hojas del follaje tienen algunas cerdas blancas en el ápice de la vaina y en la base del pecíolo, láminas lanceoladas glabras y lustrosas en ambas superficies, en promedio de 15 a 20 cm de largo y 2 a 5 cm de ancho, las nervaduras secundarias evidentes. Sin inflorescencia aglomerada, bractífera; de 5-10 cm de largo; laxa; con brácteas glumáceas subtenidas; con brotes axilares en la base de las espiguillas; pseudoespiguillas glabras, oblongolanceoladas; lema abrazando a la palea (Cortés, 2015; Liese & Köhl, 2015).

La característica distintiva de *Guadua angustifolia* es la banda blanca bien marcada sobre los nudos, así como también la presencia de espinas en los nudos y ramas (Cortés, 2015) (Figura 2).



Figura 2. Culmo de *Guadua angustifolia*, características distintivas

Fuente: elaboración propia (2018)

2.4.2. Culmo, crecimiento y fisiología

El culmo es aquel que se desarrolla a partir de una yema del rizoma y emergen a la superficie con el mismo diámetro que tendrán en la época de maduración, ya que no tienen madera verdadera que crece en grosor, sino que éste y la dureza están dados por la acumulación de sílice, lignina, celulosa y hemicelulosa (Álvarez, 2012)

El bambú, a diferencia de otras plantas, no tiene crecimiento diametral, una vez que brota del suelo, lo hace con el diámetro máximo que tendrá para todo su ciclo de vida, y va disminuyendo proporcionalmente con la altura (Figura 3) (Álvarez, 2012).



Figura 3. Brote de bambú en *Guadua angustifolia*

Fuente: elaboración propia (2016)

En los primeros cuatro a 12 meses son muy blandos y flexibles, por lo que se puede emplear en la fabricación de objetos artesanales tejidos. Cabe destacar que el culmo de bambú es el único que permite moldearse longitudinal y transversalmente de manera artificial, por medio de formaletas de madera ya sean cuadradas o rectangulares. Las cañas alcanzan su máxima resistencia entre los tres y los seis años, edad apropiada para su empleo en construcción, después de esta edad, empiezan a perder vitalidad y a dañarse (Ixcolín, 1999; Mercedes, 2006).

El crecimiento del bambú se basa en la elongación de los entrenudos. En general los basales maduran primero. De acuerdo con (Botero, 2016) se diferencian cuatro fases de desarrollo de la planta desde que brota del suelo hasta que muere.

Renuevo: Conocido también como brote o rebrote, es la primera fase del desarrollo de la planta y se caracteriza por estar cubierto por las hojas caulinares que protegen al culmo del ataque de patógenos en etapa de crecimiento inicial.

Todos los renuevos emergen del suelo con su diámetro definitivo y los nudos juntos dan un parecido a un acordeón cerrado. El crecimiento longitudinal se da al estirarse los nudos formando los entrenudos, normalmente ocurre de abajo hacia arriba en un lapso de seis meses en promedio (Botero, 2016).

Verde, joven o viche: Terminado el proceso de crecimiento del brote comienza la activación de las yemas laterales que darán paso a las ramas. Estas hacen que ocurra el desprendimiento de las hojas caulinares lo que deja el tallo totalmente expuesto con un color verde esmeralda intenso y las bandas blancas a lado y lado del nudo resaltan muy fácilmente. En ese momento la caña está en estado verde pues la madera no tiene resistencia, hay altos contenidos de azúcares y almidones y no es apta para uso que requiera resistencia físico-mecánica de la madera. Esta fase oscila entre los 180 días y los 3 años (Ixcolín, 1999; Botero, 2016).

Madura, hecha: Cuando la madera adquiere resistencia físico-mecánica, pierde su coloración verde intensa, se torna más amarillenta y normalmente aparecen en su tallo manchas de color blanco o gris claro y existe la presencia de líquenes, estas características son indicadores de que la caña ha llegado a su madurez por lo que debe ser cosechada. En este grado de madurez el tallo puede tardar de 3 a 5 años dependiendo del clima y las condiciones del sitio donde se desarrolla (Botero, 2016; Hernández, 2016).

Seca: Si la caña guadua no se cosecha en estado maduro, pierde su resistencia, se tornan los tallos de color amarillo a rojizo, se seca el follaje y por disminución de la actividad fisiológica termina el ciclo de vida de ese individuo. Normalmente cuando las manchas o rodales de Guadua no se aprovechan se observan individuos en estado seco que detiene la aparición de brotes por falta de espacio, luz, agua y nutrientes además de no estimularse los rizomas (Botero, 2016).

2.5. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL BAMBÚ

Contenido de humedad. El contenido de humedad en el bambú varía en el interior del tallo y está influenciado por la edad, la época de corte y las características propias de la especie. Con un año de edad los cogollos tienen un contenido de humedad relativa de alrededor de 120-130%. Los nudos presentan valores más bajos que los entrenudos, con diferencias de contenido de agua hasta el 15%, siendo más significativa en la parte basal que en la apical. Cabe mencionar que la estructura de la pared es diferente en el interior del culmo, lo que conlleva a tener variación también en el contenido de humedad, siendo mayor en la parte interna y menor en la parte externa (Islam, Hannan, & Lahiry, 2002; Latif & Liese, 2002).

Densidad. La densidad del bambú varía de aproximadamente 0,4 a 0,9 g / cm³ dependiendo de la especie, la estructura anatómica, así como la cantidad y distribución de las fibras alrededor de los haces vasculares (Wahab, Mohamed, Mustafa, & Hassan, 2009; Zhou, 1981). En consecuencia, la densidad aumenta desde la capa interna a la parte exterior del culmo y a lo largo del culmo desde la parte inferior hasta la parte superior (Liese, 1985).

Color. El color del bambú es una característica distintiva para conocer el estado de madurez del culmo, Mercedes (2006) y Botero (2016) mencionan que el culmo comienza a madurar cuando este pierde culmo comienza a perder su brillo y color “normal”, el culmo pierde su color verde esmeralda característico y pasa a ser de un color verde oscuro o gris.

Compresión. La resistencia a la compresión del bambú es relativamente alta, sin embargo, carece de significado si no se especifica el grado de madurez y la relación longitud- diámetro. Si la longitud del culmo es suficientemente grande en relación a la sección transversal mínima, la resistencia bajo cargas compresivas disminuye considerablemente por defecto de flexión lateral (Ixcolín, 1999).

Flexión. La estructura física de los culmos, como lo es su alta relación resistencia-peso, paredes rígidas transversalmente y su forma circular en la

sección transversal, permiten una alta resistencia a la tensión y, por tanto, evitan rupturas a la flexión. Es importante mencionar que, la resistencia a flexión depende de la edad de corte del bambú, la sección que se utilice, la densidad, la humedad y el peso específico (Sapuyes, Osorio, Takeuchi, Duarte, & Erazo, 2018).

Módulo de elasticidad. El Módulo de Elasticidad, conocido también como Modulo de Young, para el esfuerzo de Flexión está dado por la pendiente de la parte lineal de la curva Esfuerzo-deformación unitaria (González, Montoya, & Bedoya, 2007). La Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica (2010) , menciona que los esfuerzos admisibles para que *Guadua angustifolia* cumpla con los requisitos de calidad para su uso estructural, debe tener 9500 MPa en promedio para el módulo de elasticidad. Investigaciones realizadas en flexión por Ardila (2013); Luna et al. (2014); Sapuyes et al. (2018) encontraron valores en el módulo de elasticidad de 14933, 13904 y 15483 MPa, respectivamente.

2.6. LITERATURA CITADA

- Álvarez Castilla, E. R. (2012). *Comportamiento mecánico de las conexiones en los elementos de bambú para estructuras ligeras. El caso de las especies del trópico de Veracruz*. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ardila, C. (2013). *Determinación de los valores de esfuerzos admisibles del bambú Guadua angustifolia Kunth del departamento de Tolima*. Universidad Nacional de Colombia.
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). NSR-10, Título E Norma Sismoresistente Colombiana. Colombia.
- Botero C., L. F. (2016). Reproducción de la guadua angustifolia por el método de Chusquines. Retrieved from <http://www.inbar.int/sites/default/files/chusquines.pdf>
- Cedeño Valdiviezo, A., & Irigoyen Castillo, J. (2011). El bambú en México. *Bioteología Vegetal*. Retrieved from http://www.usjt.br/arq.urb/numero_06/arqurb6_06_ponto_de_vista_03_alberto_cedeno.pdf
- Cortés Rodríguez, G. . (2000). Los bambúes nativos de México. *BioDIVERSITAS*, 30, 12–15.

- Cortés Rodríguez, G. . (2015). *Guadua angustifolia*. Retrieved from <http://www.bambumex.org/paginas/introducidos.htm>
- Giraldo Herrera, E. (2009). *Importancia del Bambú en el medio ambiente*. Retrieved from <http://concentracionambiental.blogspot.mx/2010/08/importancia-del-bambu-en-el-medio.html>
- González, H. Á., Montoya Arango, J. A., & Bedoya Sánchez, J. R. (2007). RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN EN MUESTRAS DE BAMBÚ DE LA ESPECIE *Guadua angustifolia* Kunth. *Scientia et Technica*, *XIII*(35), 503–508.
- Hernández López, S. (2016). *Estudio de caso del cultivo y aprovechamiento de tres especies de bambu(Guadua angustifolia Kunt., Guadua aculeata Rupr., y Bambusa oldhamii Munro) en la comunidad de Coapal chico, San José Acateno, Puebla*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Islam, M. N., Hannan, M. ., & Lahiry, A. K. (2002). Effect of age and height positions of borak, jawa and mitingabamboo on their physical properties. *J Timber Dev Assoc India*, *48*, 16–22.
- Ixcolín Oroxom, C. A. (1999). *ESTADO ACTUAL DEL BAMBÚ COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN EN GUATEMALA*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Lárraga-Sánchez, N., Gutiérrez-Rangel, N., López-Sánchez, H., Pedraza-Santos, M. E., Vargas-Hernández, J., Santos-Pérez, G., & Santos-Pérez, U. I. (2011). Propagación vegetativa de tres especies de bambú. *Ra Ximhai*, *7*(2), 205–218.
- Latif, A. ., & Liese, W. (2002). *Culm characteristics of two bamboos in relation to age, height and site*. (A. Kumar, R. Rao, & S. Cherla B., Eds.), *Bamboo for sustainable development. Proceedings of the 5th international bamboo congress and 6th international bamboo workshop*. San José.
- Liese, W. (1985). Anatomy and properties of bamboo. *Bamboo Workshop Hangzhou*, 196–393. Retrieved from http://www.inbar.int/publication/PDF/INBAR_PR_03_1.pdf
- Liese, W., & Köhl, M. (2015). *Bamboo The plant and its uses*. (W. Liese & M. Köhl, Eds.). Germany: Tropical Forestry. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-14133-6>
- Luna, P., Lozano, J., & Takeuchi, C. (2014). Determinación experimental de valores característicos de resistencia para *Guadua angustifolia*. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, (ahead), 0–0. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2014005000007>
- Mejía Galón, A. I., Gallardo C., C., Vallejo O., J. J., Ramírez López, G., Arboleda E., C., Durango A., E. S., ... Cadavid T., E. (2009). Plantas del Género *Bambusa*: importancia y aplicaciones en la industria farmacéutica, cosmética

y alimentaria. *Vitae*, 16(3), 396–405. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169813261014>

Mercedes, J. R. (2006). *Guía Técnica Cultivo del Bambú*. Santo Domingo, República Dominicana.

Sánchez Domínguez, C. (2009). *El género Guadua (Poaceae-Bambusoideae) en el Estado de Veracruz*. UNIVERSIDAD VERACRUZANA.

Sapuyes, E., Osorio, J., Takeuchi, C., Duarte, M., & Erazo, W. (2018). Resistencia y elasticidad a la flexión de la guadua angustifolia Kunth de Pitalito, Huila. *Revista de Investigación*, 11(1), 97–111. <https://doi.org/10.29097/2011-639x.182>

Wahab, R., Mohamed, A., Mustafa, M. T., & Hassan, A. (2009). Physical characteristics and anatomical properties of cultivated bamboo (*Bambusa vulgaris* Schrad.) culms. *Journal of Biological Sciences*. <https://doi.org/10.3923/jbs.2009.753.759>

Zhou, F. (1981). Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. *Journal of the Nanjing Technology College of Forestry Products*, 2, 1–32.

3. COLORIMETRÍA DE LOS CULMOS DE *GUADUA* *ANGUSTIFOLIA* KUNTH EN TRES ESTADOS DE MADUREZ

Surisaddai Hernández López¹, Francisco José Zamudio Sánchez¹, Adriana Ávalos Vargas^{1*}, Gabriela Orozco Gutiérrez², Amparo Máxima Borja de la Rosa¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue describir el color del culmo de *Guadua angustifolia* con el sistema colorimétrico CIELab y analizar la variabilidad entre los tres estados de madurez (joven, maduro y sobremaduro). El material de estudio se recolectó en la plantación de la empresa AGROMOD, ubicada en Reforma, Chiapas. Se tomaron 36 culmos de dos, cuatro y seis años y se midió el color utilizando los parámetros del sistema CIELab con ayuda de un Colorímetro Digital. Posteriormente, se utilizó la metodología propuesta por La Commission Internationale de L'Eclairage (2004) para obtener el ΔE^* y medir la magnitud de la diferencia del color en los tres estados de madurez. Como consecuencia de la madurez se observó un cambio secuencial de coloración en la parte externa del culmo, desde un verde claro, verde grisáceo, gris, hasta un tono café; los ΔE^* fueron mayores a 20, lo que indica que la variación del color entre un estado de madurez y otro es notoria.

Palabras clave: CIELab, *Guadua angustifolia*, bambú, colorimetría

ABSTRACT

The aim of this study was to describe the *Guadua angustifolia* culm color with the CIELab color system and to analyze the color variation among the three stages of maturity (young, mature and overmature). The study material was collected from the AGROMOD plantation, Reforma, Chiapas. A total of 36 culms, of 2, 4

¹ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México

² INIFAP. Departamento de Plantaciones y genética forestal

♦Autor de correspondencia: adriana.avalos.vargas@gmail.com

and 6 years, were taken. For each of them, using the CIELab system parameters, the color was measured the color by the Digital Colorimeter. The increase the culm age originated a sequential coloration change, that goes from a light green, greyish green, gray, to a brown tone. It was observed that, on average, the moisture content decreases as the degree of maturity increases.

Keywords: CIELab, *Guadua angustifolia*, bamboo, colorimetry

3.1. INTRODUCCIÓN

El bambú es un recurso natural renovable de rápido crecimiento, es una especie promisoría de alto valor ecológico y económico; y se ha convertido en una especie forestal alternativa. Sin embargo, su manejo ha sido de manera empírica, dado que la información básica sobre el establecimiento del cultivo y su aprovechamiento es escasa, principalmente en las características fenotípicas que debe tener el bambú para ser cosechado.

Parte de ese conocimiento empírico es el color del culmo, pues es una de las características que los productores utilizan como indicador de madurez. Al respecto, Schröder (2012) menciona que el bambú cambia gradualmente en el exterior, lo que permite reconocer cuatro etapas muy definidas: brotes, culmos jóvenes, maduros y viejos.

El culmo joven se reconoce por el color verde claro y brillante con presencia de cera blanquecina, cuando color del bambú cambia a gris y verde oscuro, con presencia de musgos y líquenes (en lugares con alta humedad ambiental), entonces se muestra una evidencia clara de su madurez y se puede seleccionar para la cosecha y extracción del bosque o de la plantación. El tallo sobremaduro contiene una cantidad excesiva de hongos y el color tiende a ser amarillento (Schröder, 2012; Hernández, 2016). Por ello, es importante realizar estudios de colorimetría para las distintas especies de bambú.

Uno de los campos que más ha explotado los estudios de colorimetría es el de las propiedades físicas de la madera, en particular el color de acuerdo a su especie, su orientación y la presencia de nudos. Más aun, se sabe que el color

de la madera en la mayoría de las especies, es inestable en condiciones naturales, pudiendo ser alteradas por diversos factores, tales como: rayos solares, temperatura, contenido de humedad, reacciones químicas de foto-oxidación y acciones por organismos descomposición de la madera. Esta inestabilidad está relacionada directamente a sus constituyentes (componentes químicos, anatómicos entre otros) que ejercen gran influencia en la formación del color (Gonçalez, Félix, Gouveia, Camargo García, & Riberiro, 2010).

Asimismo, Keey (2005) menciona que dichos cambios en el color ocurren por la evaporización del agua de la madera, la cual contiene extractivos disueltos con azúcares y compuestos nitrogenados, produciendo un cambio en la composición química de la superficie, generando melaninos, y evidenciando un color más marrón en la mayoría de los casos (Raymind & Bradley, 2002).

En el caso del bambú, la composición química del culmo es similar a la de la madera, excepto en lo referente a los extractos alcalinos. Para bambú es en su mayoría celulosa, hemicelulosa y lignina; y en menor proporción resina, taninos, ceras y sales inorgánicas. Entre el 50-70% es holocelulosa, 30% pentosa y 20-25% lignina. Esta composición varía con las especies, condiciones de crecimiento, edad, parte del tallo y época del año (Hidalgo, 2003), por lo que se podría pensar que los resultados de la madera son extrapolables a la colorimetría del bambú.

Desafortunadamente, no existen muchos estudios sobre colorimetría del bambú y mucho menos se ha estudiado una posible relación entre el color y la edad. Por ello, en este trabajo se propone estudiar la colorimetría de *G. angustifolia* de acuerdo con tres edades.

Existen varios sistemas colorimétricos para medir los parámetros de color, uno de los métodos más precisos y comúnmente utilizados es el sistema de color de CIE Lab. Esta técnica consiste en medir tres parámetros colorimétricos L^* , a^* y b^* , a partir de los cuales es posible cuantificar el color del material. L^* es la luminosidad e indica el tono de gris dentro de una escala negro-blanco, su escala

va de 0 a 100, donde 0 es el negro y 100 indica el blanco. Los otros dos parámetros son las coordenadas cromáticas verde-rojo (a^*) y azul-amarillo (b^*), las cuales dentro de una escala de 0 a 60 indican la variabilidad de los pigmentos rojo, verde, amarillo y azul, definidas por las variables $+a^*$, $-a^*$, $+b^*$ y $-b^*$, respectivamente (Gonçalez, Marques, Karas, Janin, & Riberiro, 2014).

Las coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ localizan en un plano tridimensional los colores de los objetos. Además, los cambios uniformes en las componentes, tienden a corresponder a cambios uniformes en el color que se percibe. Dichos cambios se aproximan tomando la distancia Euclidiana (ΔE) entre ellos (Bradbury, Potts, & Beadle, 2010). A la distancia Euclidiana también se le conoce como variación total del color. Existen varios criterios para determinar cuándo la variación del color es perceptible por el ojo humano. Uno de ellos es el propuesto por Melchiades & Boschi (1999) que menciona que la diferencia de coloración puede ser observada por el ojo humano si $\Delta E > 1$. Otro criterio es el propuesto por Hikita, Toyoda & Azuma, (2001) quienes consideran que la diferencia de colores es perceptible cuando $\Delta E > 1.5$, es importante mencionar que esta escala es más grande. También existe el criterio ΔE^*_{76} que coincide con el de (Hikita et al., 2001) pero es aún más amplio.

El trabajo se organiza de la siguiente manera, en la segunda sección se describe la metodología tanto en campo como en gabinete. Después, en la tercera sección se presenta un análisis de los resultados, y finalmente, en la cuarta sección presentar las conclusiones.

3.2. METODOLOGÍA

La recolecta del material se realizó en la plantación de *G. angustifolia* de la empresa AGROMOD, la cual tiene 23 años de establecida y se encuentra ubicada en el municipio de Reforma, Chiapas; queda comprendida dentro de las coordenadas geográficas 17° 52' Latitud Norte y 93° 09' Longitud Oeste y una

altitud de 20 msnm. El clima de la región es cálido húmedo con lluvias todo el año (“Municipio de Reforma Chiapas,” 2017).

Se seleccionaron 36 culmos de *G. angustifolia*; de dos, cuatro y seis años (joven, maduro y sobremaduro, respectivamente), los cuales tenían en promedio 15m de altura y 7.5 de diámetro. Cada culmo se dividió en tres partes que se identificaron como: base (cepa), media (basa) y superior (sobrebasa) (Figura 4)

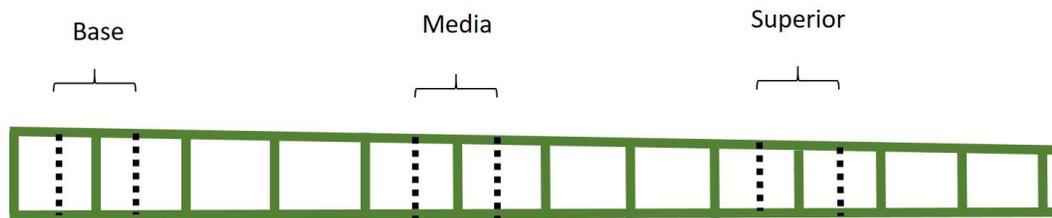


Figura 4. Secciones del culmo para el estudio

El color fue determinado en campo con un Colorímetro Digital (RGB-1002). La medición se estableció dentro del rango visible (400-700 nm). Las medidas se tomaron en cada una de las secciones a las que fue cortado el culmo de bambú (base, media y superior) y se obtuvo el valor promedio para las coordenadas L^* , a^* y b^* .

Posteriormente se utilizó el Índice de diferencia de color de la madera ΔE^* propuesto por la *Commission Internationale de L'Eclairage* (2004). Con el cual se compararon los parámetros del color del culmo de bambú a diferentes edades. Este índice define la magnitud de diferencia de color usando las coordenadas CIELab de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2},$$

donde:

ΔE^* = diferencia de color,

$\Delta L^* = L^*{}^M - L^*{}^P$, diferencia en luz y oscuridad (+ = más luminoso, - = más oscuro),

$\Delta a^* = a^*{}^M - a^*{}^P$, diferencia en rojo y verde (+ = más rojo, - = más verde),

$\Delta b^* = b^*{}^M - b^*{}^P$, diferencia en amarillo y azul (+ = más amarillo, - = más azul),

M = Valor del culmo 2,

P = Valor del culmo 1.

En este caso, para valorar si hay una diferencia importante en el color se utilizaron tres escalas que se presentan a continuación:

Tabla 1. Criterios de percepción de diferencia de color ΔE^*

Melchiades & Boschi (1999)	Hikita et al. (2001)	Wyszecki & Stiles (1982)
No observable: $\Delta E^* < 1$	Despreciable: $0.0 < \Delta E^* < 0.5$	No visible: $\Delta E^*_{76} < 0.2$
Observable: $\Delta E^* > 1$	Ligeramente perceptible: $0.5 < \Delta E^* < 1.5$	Muy leve: $0.2 \leq \Delta E^*_{76} < 0.5$
	Notable: $1.5 < \Delta E^* < 6.0$	Leve: $0.5 \leq \Delta E^*_{76} < 1.5$
	Muy apreciable: $6.0 < \Delta E^* < 12$	Notable: $1.5 \leq \Delta E^*_{76} < 3.0$
		Muy notable: $3.0 \leq \Delta E^*_{76} < 6.0$
		Grande: $6.0 \leq \Delta E^*_{76} < 12.0$
		Muy grande: $12.0 \geq \Delta E^*_{76}$

Los datos se analizaron en el programa estadístico R 3.5.1. Para el análisis colorimétrico se realizaron pruebas de Tukey, se calculó el intervalo de confianza y ΔE^* .

3.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los culmos de bambú presentaron, a simple vista, una diferencia de colores entre las edades, pero no por secciones. Se observa que el bambú a los dos años tiene una coloración que va de un verde claro a un verde ligeramente oscuro. El color promedio a esta edad, tiene las coordenadas $L^*=52.93$, $a^*=-18.55$ y $b^*=38.25$, que representa un color “Dark moderate yellow”. La Figura 5 presenta la gama de colores a esta edad dentro del espacio CIE- $L^*a^*b^*$.

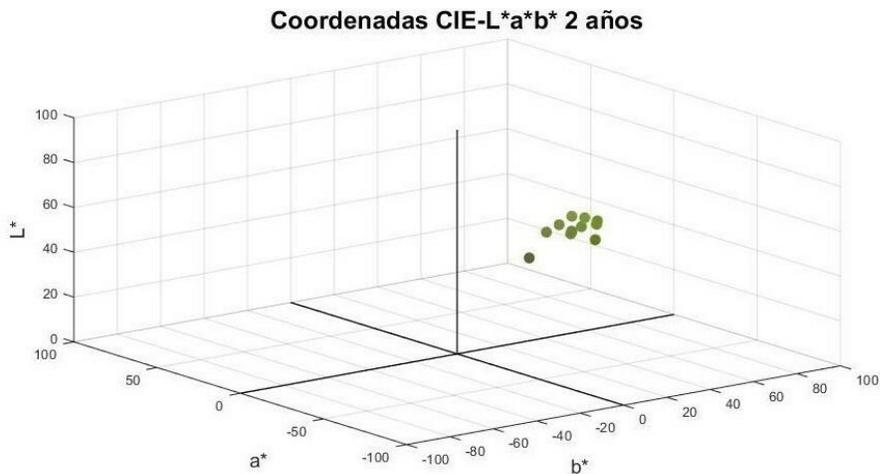


Figura 5. Gráfica CIE- $L^*a^*b^*$ de *G. angustifolia* a los 2 años

El comportamiento de los colores a los cuatro años cambió del verde claro brillante a un verde grisáceo y gris, las coordenadas CIE- $L^*a^*b^*$ promedio fueron $L^*= 51.81$, $a^*=-4.62$ y $b^*= 22.46$, y representan al color “Mostly desaturated dark yellow”. En la Figura 6 se observa la gama de colores a los cuatro años.

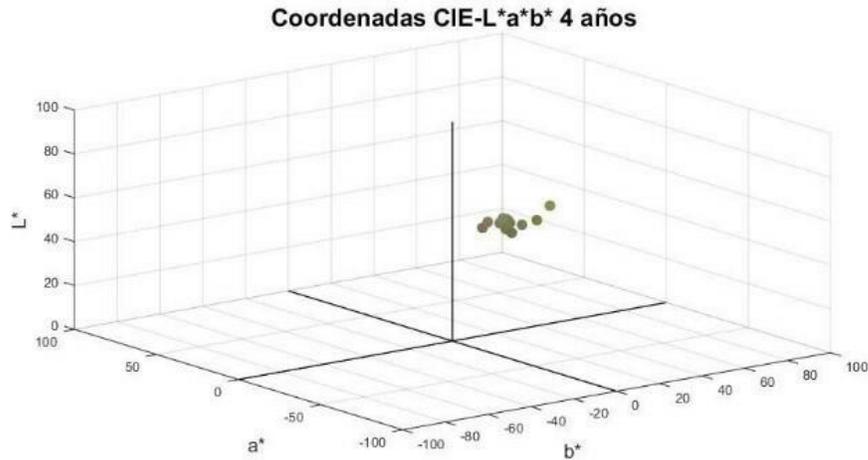


Figura 6. Gráfica CIE-L*a*b* de *G. angustifolia* a los 4 años

El culmo de bambú a los seis años, presenta un cambio drástico de color a diferencia de los dos anteriores, pues la gama pasó a colores cafés (Figura 7); el promedio de las coordenadas CIELab son $L^*=69.26$, $a^*=3.85$ y $b^*=34.03$, representado por el color "Slightly desaturated orange". En comparación con dos y cuatro años, la coordenada a^* es positiva y tiende al color rojo.

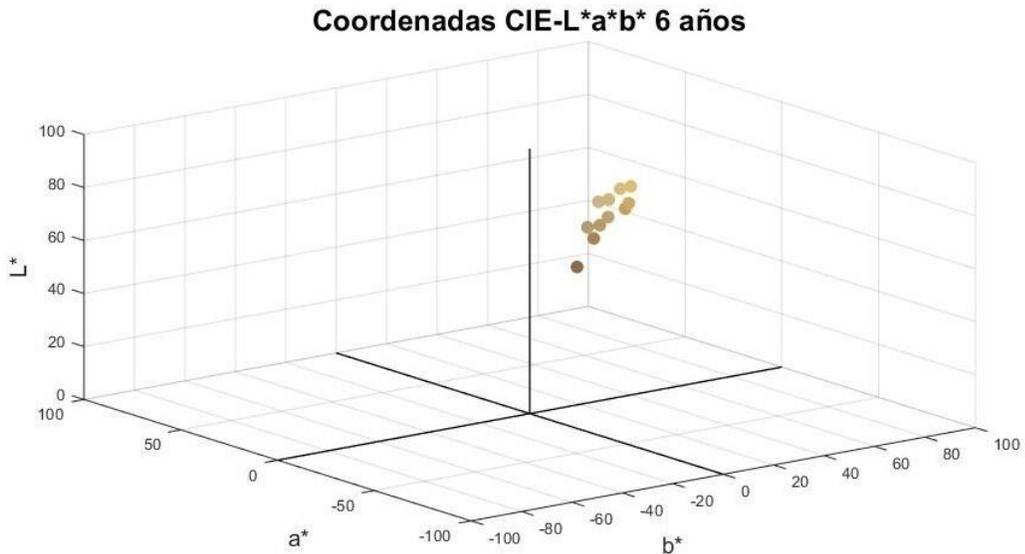


Figura 7. Gráfica CIE-L*a*b* de *G. angustifolia* a los 6 años

Aunque las Figuras 2-4 muestran que hay una diferencia visible de color, se realizó la prueba de Tukey sobre las coordenadas L*, a* y b*. En la Tabla 2 se presentan las coordenadas promedio junto con su desviación estándar para cada edad.

Tabla 2. Estadística colorimétrica (media ± SD) por edad. Prueba de Tukey

Variable	Edad		
	2	4	6
L*	52.93±4.91 β	51.81±3.08 β	69.26±8.79 α
a*	-18.55±3.50 γ	-4.62±4.96 β	3.85±3.43 α
b*	38.25±6.82 α	22.46±7.33 β	34.03±5.37 α

* Las letras griegas se leen horizontalmente, si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

Se observó que, la Luminosidad no presentó diferencia estadística entre 2 y 4 años; la coordenada a* presentó diferencia significativa en las tres edades, evidenciando un desplazamiento del color verde hacia el rojo. Con respecto a b*, dos y seis años no se muestra diferencia estadística; sin embargo, se puede observar que a medida que el culmo entra a su estado de madurez disminuye el color amarillo y conforme se vuelve sobremaduro éste aumenta nuevamente.

Por otro lado, utilizando los promedios para L*, a* y b* en las diferentes edades se calculó ΔE (Tabla 3). De acuerdo con el criterio de Melchiades & Boschi (1999) fue mayor a 1 en las tres comparaciones, lo cual indica que los cambios en el color son percibidos por el ojo humano. Retomando la clasificación de Hikita et al., (2001) se observa que los valores de ΔE para 2-4, 4-6 y 2-6 años son mayores a 12 y por tanto no entran en ninguna categoría. Finalmente, en el criterio de Wyszecki & Stiles (1982) los tres valores son mayores a 12 lo que indica una diferencia muy grande de colores. Entonces, se puede decir que las diferencias son bastante notables.

Tabla 3. Valores medios de las coordenadas colorimétricas para cada factor evaluado, diferencias correspondientes y variación total del color

Comparación	Δ	Coordenadas colorimétricas			Variación total (ΔE)
		L*	a*	b*	
2-4 años	Δ	-1.12	-13.93	-15.79	
	Δ^2	1.25	194.04	249.32	21.08
4-6 años	Δ	17.45	8.47	11.57	
	Δ^2	304.50	71.74	133.86	22.58
2-6 años	Δ	16.33	22.40	-4.22	
	Δ^2	266.67	501.76	17.81	28.03

Δ y Δ^2 . Diferencia entre los dos niveles de cada factor y diferencia al cuadrado, respectivamente.

Dado que con los tres criterios propuestos se encontró que existe una diferencia en la coloración de acuerdo a la edad, entonces es posible realizar una paleta de colores que facilite la clasificación de *G. angustifolia* in situ de acuerdo a la edad. Para ello, se construyeron los intervalos de confianza para las coordenadas CIE-L*a*b* de los culmos de bambú por edad (Tabla 4).

Tabla 4. Intervalos de confianza

Variable	L*	a*	b*
2	[49.81, 56.06]	[-20.77, -16.32]	[33.92, 42.59]
4	[49.85, 53.77]	[-7.77, -1.46]	[17.79, 27.12]
6	[63.67, 74.85]	[1.67, 6.04]	[30.61, 37.44]

Para cada edad se convirtieron las coordenadas CIE-L*a*b* de los extremos de los intervalos a su valor hexadecimal. Después, con el software estadístico R 3.5 se realizó un degradado de diez colores contenidos entre el máximo y el mínimo. En la Figura 8 se muestra la gama de colores contenidos en dichos intervalos de confianza, que corresponde a los colores que puede tener el bambú de acuerdo a su edad.

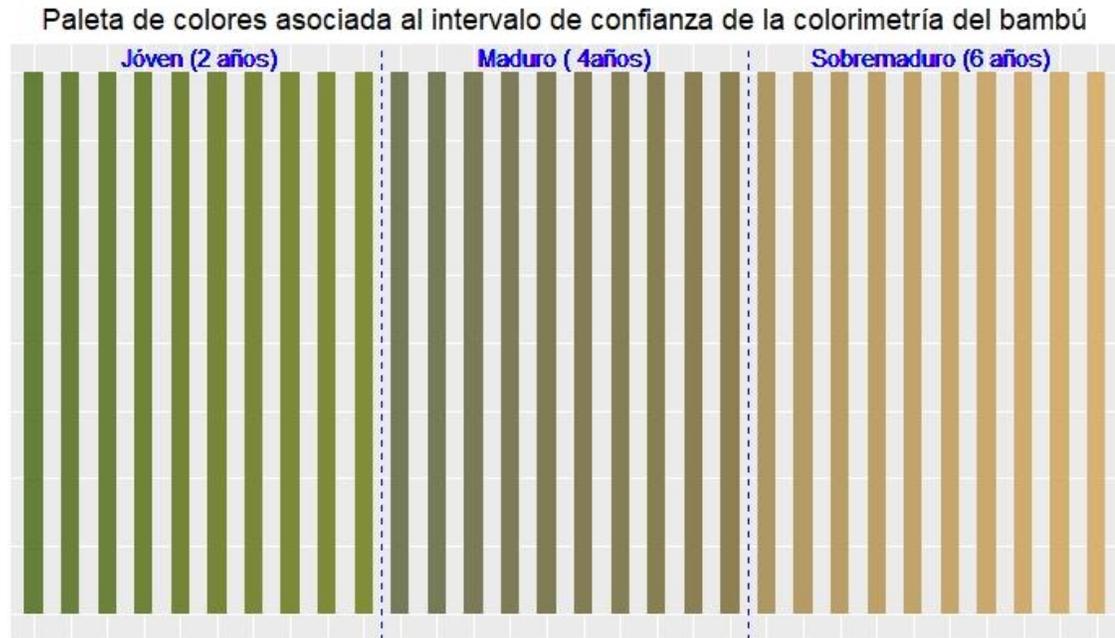


Figura 8. Colores del culmo de bambú a diferentes estados de madurez

Es importante mencionar que es necesario realizar este estudio colorimétrico en otras plantaciones de *G. angustifolia* pues si bien la paleta de colores es útil, se debe tener en mente que estas muestras de bambú provienen de una plantación sin manejo y con niveles de contaminación importantes, pues las muestras no presentaban poblaciones de líquenes, hongos y musgos.

3.4. CONCLUSIÓN

Los culmos de bambú en sus tres estados de madurez (dos, cuatro y seis años) se ubicaron en el espacio CIELab desde un “Dark moderate yellow” hasta un “Slightly desaturated orange”. Además, hay una diferencia visible por el ojo humano en la coloración. Lo anterior, hizo posible la construcción de una paleta de colores que permite identificar la edad de *G. angustifolia*. Se debe notar que, de acuerdo a la experiencia empírica de algunos productores, el momento adecuado para la cosecha de la *Guadua angustifolia* es cuando tiene una coloración grisácea que es probable que coincida con el color “Mostly desaturated dark yellow” que corresponde en promedio a los culmos de cuatro años.

Cabe destacar que el contenido de humedad, las condiciones climáticas, edafológicas y de manejo del sitio influyen en el color y este puede variar de un lugar a otro. Se recomienda hacer un estudio más profundo con diferentes sitios con características de manejo controlado para mejorar la clasificación del bambú de acuerdo a su color y edad.

3.5. LITERATURA CITADA

- Bradbury, G. J., Potts, B. M., & Beadle, C. L. (2010). Quantifying phenotypic variation in wood colour in *Acacia melanoxylon* R.Br. *Forestry*, 83(2), 153–162. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpp040>
- Commission Internationale de L'Eclairage. (2004). *CIE 15: Technical report: Colorimetry* (Vol. 3rd). [https://doi.org/ISBN 3 901 906 33 9](https://doi.org/ISBN%203%20901%20906%2033%209)
- Gonçalez, J. ., Félix, T. L. ., Gouveia, F. ., Camargo García, J. C., & Riberiro, P. G. (2010). Efeito da radiação ultravioleta na cor da madeira de freijó (*Cordia goeldiana* Huber) após receber produtos de acabamento. *Ciência Florestal*, 20(4), 657–664.
- Gonçalez, J. ., Marques, M. H. B., Karas, M. C. S., Janin, G., & Riberiro, P. G. (2014). Effect of drying process on marupá wood color. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 16, 337–342.
- Hernández López, S. (2016). *Estudio de caso del cultivo y aprovechamiento de tres especies de bambu (Guadua angustifolia Kunt., Guadua aculeata Rupr., y Bambusa oldhamii Munro) en la comunidad de Coapal chico, San José Acateno, Puebla*. Universidad Autónoma Chapingo.
- Hidalgo López, O. (2003). *Bamboo. The gift of the gods*. Bogotá.
- Hikita, Y., Toyoda, T., & Azuma, M. (2001). Weathering testing of timber: discoloration. *Y. Imamura, High Performance Utilization of Wood for Outdoor Uses*.
- Keey, R. . (2005). Colour development on drying. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 7, 3–16.
- Melchiades, F. G., & Boschi, A. O. (1999). Cores e tonalidades e revestimentos cerâmicos. *Cerâmica Industrial*, 4(1), 11–118.
- Municipio de Reforma Chiapas. (2017). Retrieved from <http://www.municipios.mx/chiapas/reforma/>
- Raymind, C., & Bradley, A. (2002). Assessment of wood colour in *Eucalyptus nitens*. *Appita Journal*, 55(22), 118–122.

- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39–48. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.53509>
- Schröder, S. (2012). Bamboo Cultivation, When and how to Harvest Bamboo. Retrieved from <https://www.guaduibamboo.com/cultivation/when-and-how-harvest-bamboo>
- Wyszecki, G., & Stiles, W. . (1982). *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. (Wiley, Ed.) (2da Ed.). New York.

4. PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE *GUADUA* *ANGUSTIFOLIA* KUNTH A TRES EDADES

Surisaddai Hernández López¹, Francisco José Zamudio Sánchez¹,
Adriana Ávalos Vargas^{1*}, Gabriela Orozco Gutiérrez², Amparo Máxima
Borja de la Rosa¹

RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue obtener el módulo de elasticidad estático y dinámico para la *Guadua angustifolia* Kunth utilizando las metodologías de estimación propuestas por Brown et al., (1980) y Sotomayor (2005) que dependen de la densidad y compararlas con los valores prácticos obtenidos de una investigación previa y con dichos valores proponer un modelo matemático adecuado para la predicción de estas propiedades para *G. angustifolia*. Partiendo de los datos de Jangra (2016), se tomaron los valores de la densidad y los módulos de elasticidad estático y dinámico de 187 muestras de *G. angustifolia* a los cuales se les aplicaron las metodologías propuestas por Brown et al. (1980) y Sotomayor (2005). Cabe señalar que se hizo una transformación para uniformizar unidades y comparar los módulos de elasticidad obtenidos de estas técnicas con los valores prácticos de la investigación. Posteriormente, con la densidad como variable independiente y los módulos de elasticidad prácticos se realizó un modelo de regresión exponencial, similar al utilizado en madera, para obtener un modelo de predicción de las propiedades mecánicas en bambú. Después, con culmos de *G. angustifolia* de dos, cuatro y seis años, provenientes de la plantación de la empresa AGROMOD, ubicada en Reforma, Chiapas se determinó en laboratorio la densidad de acuerdo con las normas *ISO-22157* e *ISO/TR 22157-2*. A estos datos, se les aplicó el modelo de predicción de los módulos de elasticidad para *G. angustifolia*. Respecto a los modelos propuestos

¹ División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Edo. de México, México

² INIFAP. Departamento de Plantaciones y genética forestal

♦Autor de correspondencia: adriana.avalos.vargas@gmail.com

para madera, al aplicarlos a las observaciones de Jangra (2016), se encontró que subestiman los valores de los módulos de elasticidad del bambú. Por tanto, se propuso un modelo tipo regresión exponencial para los módulos de elasticidad en función de la densidad con una bondad de ajuste de 0.88 y 0.61. Por lo que este modelo, es confiable para la predicción de la resistencia mecánica en función de su densidad para *G. angustifolia*

Palabras clave: bambú, densidad, módulo de elasticidad estático, módulo de elasticidad dinámico.

ABSTRACT

The aim of this work was to obtain the static and dynamic elastic moduli for the *Guadua angustifolia* Kunth using the estimation methodologies proposed by Brown et al., (1980) and Sotomayor (2005) that depend on the density and compare them to the values practicals obtained from previous research and with these values propose a mathematical model suitable for the prediction of these properties for *G. angustifolia*. Based on the data from Jangra (2016), density values and static and dynamic elastic moduli were taken from 187 samples of *G. angustifolia* to which the methodologies proposed by Brown et al. (1980) and Sotomayor (2005). It should be noted that a transformation was made to standardize units and compared the elasticity moduli obtained from these techniques to the practical values of the research. Subsequently, with the density as an independent variable and the practical elastic moduli, an exponential regression model was made, similar to that used in wood, to obtain a prediction model of the mechanical properties in bamboo. Then, with culms of *G. angustifolia* of two, four and six years, coming from the plantation of the company AGROMOD, located in Reforma, Chiapas, the density was determined in the laboratory according to ISO-22157 and ISO / TR 22157-2 norms. To these data, the prediction model of elasticity modules for *G. angustifolia* was applied. Regarding the models proposed for wood, when applied to the observations of Jangra (2016), it was found that the values of the moduli of elasticity of bamboo are underestimated. Therefore, an exponential regression type model was proposed for the elasticity modules as a function of density with a goodness of adjustment of 0.88 and 0.61. Therefore, this model is reliable for the prediction of mechanical strength as a function of its density for *G. angustifolia*

Keywords: bamboo, density, static module of elasticity, dynamic module of elasticity.

4.1. INTRODUCCIÓN

Los bambúes son gramíneas de rápido crecimiento y gran versatilidad, cuya utilización va desde sus brotes hasta la planta como tal. Sus propiedades físicas así como sus múltiples beneficios lo convierten en una fuente de materia prima excepcional con una amplia gama de usos (Lobovikov, Paudel, Piazza, Ren, & Wu, 2007).

Las propiedades más importantes para determinar la resistencia del bambú son la densidad (ρ), módulo dinámico de elasticidad (E_{din}), el módulo de elasticidad estático (E_s) y el módulo de ruptura (MOR) (Cheng-Jung, Ming-Jer, & Song-Yung, 2006).

El módulo de elasticidad (E) de un material es la relación entre el esfuerzo al que está sometido el material y su deformación unitaria. Representa la rigidez del material ante una carga impuesta sobre el mismo, está representada por la ecuación $E = \frac{\sigma}{\epsilon}$, donde σ es el esfuerzo y ϵ es la deformación (Osorio, 2018). Los módulos de elasticidad pueden ser representados por los siguientes métodos: estáticos, dinámicos y ultrasónicos (Cossolino & Alves, 2010).

El módulo de elasticidad estático (E_s) está determinado por la ecuación general del módulo de Young, para determinarlo se apoya principalmente en ensayos mecánicos destructivos en los cuales las muestras quedan inutilizadas después de la prueba. Consisten en la aplicación de una carga y simultáneamente, se va monitoreando la deformación inducida.

El módulo de elasticidad dinámico (E_{din}) se obtiene al aplicar, en condiciones dinámicas de carga, una tensión reducida, con lo que se captan los efectos puramente elásticos del material. Algunos métodos para obtenerlo es mediante vibraciones y propagación de onda, está representado por la ecuación: $E_{din} = \rho v^2$, donde ρ es la densidad y v es la velocidad de la onda de la muestra (Aragón Torre, 2015; Lara Rodríguez, 2015).

Finalmente, el módulo de ruptura (MOR) corresponde a la tensión unitaria máxima en flexión, tensión, compresión o cilladura que soporta un material antes de que se produzca la falla. Cualquier incremento de carga sobre el material provocará la rotura del mismo (Spavento, Keil, & Monteoliva, 2008).

Se ha observado que muchas de estas propiedades se ven afectadas en gran medida por las condiciones de crecimiento en las que éste se desarrolle, como la topografía, la temperatura, la humedad y la precipitación (Kamruzzaman, Saha, Bose, & Islam, 2008). Otro aspecto que también afecta a dichas propiedades es la edad del culmo en el momento de la cosecha, la edad óptima de corte varía según la especie y la ubicación de la plantación.

Investigaciones por Abd Latif, Wan Tarmeze, & Fauzidah (1990) y Norul H et al., (2006) encontraron que la edad del bambú se considera un factor clave que influye en sus propiedades mecánicas. Correal & Arbeláez (2010) encontraron una correlación significativa entre la edad y la densidad, y la edad y la resistencia a la compresión, pero ninguna relación entre la resistencia al corte y la edad o la posición a lo largo del culmo. Janssen (1981) y Zhou (1981) sugirieron que la densidad podría usarse como una propiedad medible no destructiva a partir de la cual se puede inferir la resistencia en flexión, compresión y tensión en un procedimiento de clasificación para el bambú.

Tradicionalmente, los estudios para determinar las propiedades mecánicas en bambú emplean pruebas destructivas; sin embargo, se carece de investigación en pruebas no destructivas; estas últimas, evitan las roturas del material o de las probetas confeccionadas para su estudio, proporcionando un conjunto de resultados interesantes por sí mismos y para su contraste en la estimación de otros parámetros del material (Rosell & Cantalapiedra, 2011).

La utilización de métodos no destructivos para obtener las propiedades mecánicas se ha dado con éxito en la madera (Rosell & Cantalapiedra, 2011). Las metodologías propuestas por Brown, Panshin, & Forsaith, (1980) y Sotomayor (2005) predicen los valores de la flexión, compresión, cortante y

dureza en la madera mediante modelos matemáticos utilizando la densidad (ρ) como variable independiente.

4.2. METODOLOGÍA

4.2.1. Comparación de modelos matemáticos de estimación para predecir características mecánicas

En esta investigación, se tomaron como base los datos de la tesis de Jangra (2016), dicho estudio presenta los resultados de 187 pruebas de flexión medidas por métodos destructivos (prueba destructiva de flexión de cuatro puntos) y no destructivos (determinación del módulo dinámico de elasticidad basado en la velocidad de onda) en culmos de *Guadua angustifolia* a diferentes edades. El objetivo principal del trabajo de Jangra (2016) fue relacionar las metodologías destructivas con las no destructivas y en base a dichas relaciones establecer un sistema de clasificación de la fuerza del bambú.

Los especímenes pertenecían a dos lotes provenientes de Quindío y Caicedonia, Colombia. Sin embargo, no se tiene información precisa sobre la edad y la posición a lo largo del culmo para los especímenes provenientes del primer sitio. Partiendo de los datos de Jangra (2016), se tomaron los valores de densidad y se aplicaron los modelos matemáticos de Brown, Panshin, & Forsaith (1980) y Sotomayor (2005) (Tabla 5) para la obtención de los módulos de elasticidad. Posteriormente, se realizó una comparación de los módulos de las tres metodologías por medio de una gráfica y a través del cálculo del error. Cabe señalar que, para realizar la comparación de dichas metodologías, los datos se transformaron a las mismas unidades para que estos fueran comparables.

Tabla 5. Fórmulas para predecir las características mecánicas de maderas mexicanas

Ensayo y Características	Sotomayor (2005)	Brown et al., (1980)
	CM= $A\rho^b$	CM= $A\rho^b$
Flexión Estática		
Módulo de elasticidad (E_s)	191 045 $\rho^{1.02}$	162.92 ρ^*
Compresión Paralela		
Módulo de elasticidad	209127 $\rho^{1.14}$	204.59 ρ^*

CM= Característica mecánica de la madera, ρ = Densidad de la madera (gr/cm³).
* X 1000

4.2.2. Determinación de un modelo de ajuste

Mediante el E_s , el E_{din} y ρ obtenidos por Jangra (2016) se realizó un análisis de regresión exponencial. Dicha regresión se realizó en el software estadístico R 3.5.1 con la función nls, que requiere de valores de inicio. Para establecer los valores iniciales, primero se aplicó una transformación logarítmica al E_s , el E_{din} y la ρ . Después, se les aplicó una regresión lineal con la función lm. Los coeficientes resultantes de la regresión lineal son los valores de inicio que requiere la función nls. Es decir, se obtuvo una ecuación de la forma $y=A\rho^b$ tanto para el E_s como para el E_{din} con la cual fue posible predecir los valores de las propiedades mecánicas de la *G. angustifolia* para este estudio. Finalmente, se obtuvieron los errores de dicha regresión, así como la bondad del ajuste.

La Tabla 6 presenta la estadística de resumen del error relativo de cada módulo de elasticidad determinado por las metodologías de Brown et al. (1980) y Sotomayor (2005) en comparación con los datos prácticos de Jangra (2016). Se observa que los errores fueron grandes y por lo que se deduce las metodologías utilizadas para madera son poco precisas en la estimación de los módulos de elasticidad para bambú. Brown et al. (1980) presenta un error de 38.49% en el

E_s , siendo la metodología que más se aleja de los datos presentados por Jangra (2016), con respecto al E_{din} este módulo se acerca un poco más a los datos prácticos. Sotomayor (2005) presenta un error del 28% en los dos módulos, es quien más se acerca en promedio de las dos metodologías. Debido a la imprecisión de los modelos de predicción para madera, fue necesario proponer una regresión exponencial para estimar el E_s y el E_{din} para *G. angustifolia*.

Tabla 6. Estadística de Resumen de los errores relativo (%)

	Brown et al. (1980)		Sotomayor (2005)	
	E_{din}	E_s	E_{din}	E_s
Mínimo	2.538	8.134	5.225	7.3
1er Cuartil	23.019	33.495	25.565	22.81
Mediana	26.594	40.321	29.138	31.14
Media	25.624	38.328	28.347	28.29
3er Cuartil	29.034	44.366	32.541	35.24
Máximo	37.213	60.036	39.034	53.58

Las ecuaciones propuestas para la obtención de los módulos de elasticidad en esta investigación quedan determinadas por las Ecuación 1 y Ecuación 2.

$$E_{din} = 262400.2 \rho^{0.88} \quad r=0.88 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$E_s = 237112.9 \rho^{0.72} \quad r=0.61 \quad \text{Ecuación 2}$$

Las Figura 9 y Figura 10 muestran el modelo de ajuste exponencial aplicado a los datos de Jangra (2016). Estas regresiones estadísticas presentan una bondad de ajuste de 0.88 para el caso del E_{din} y 0.61 para el E_s , esto indica que el Módulo de elasticidad dinámico tiene una mayor relación con la densidad.

Relación entre Densidad y E_din

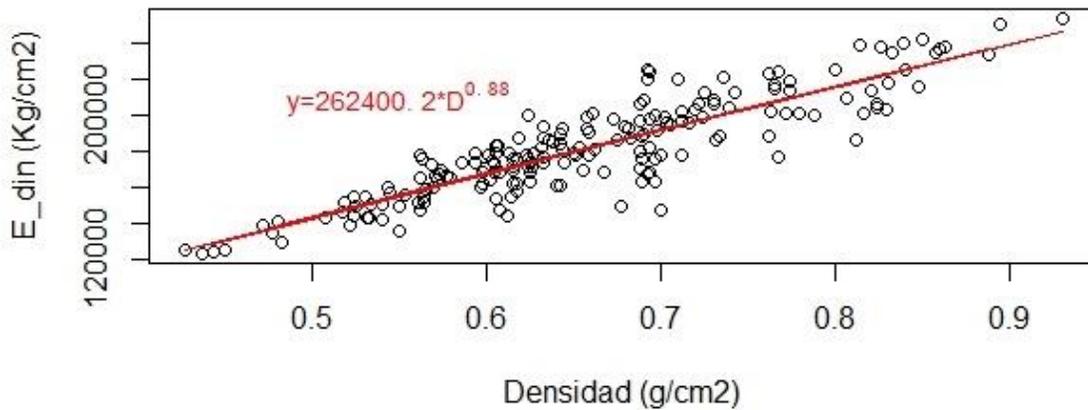


Figura 9. Relación entre Densidad y Módulo de elasticidad dinámico para *G. angustifolia*

Relación entre Densidad y Es

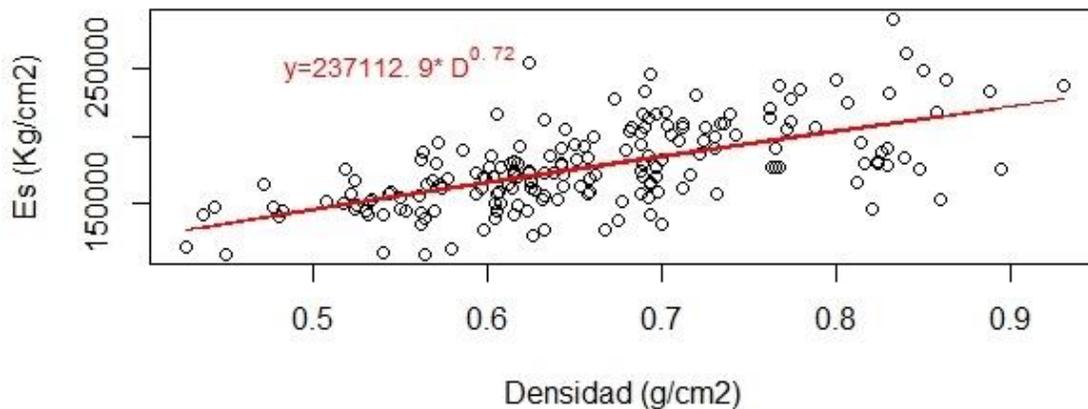


Figura 10. Relación de la densidad y el Módulo de elasticidad por flexión para *G. angustifolia*

Es importante mencionar que los datos de Jangra (2016) fueron obtenidos para culmos que se encuentran en el rango de edades de uno a más de cinco años, entonces, este ajuste permite estimar los módulos de elasticidad para culmos de distintas edades.

4.2.3. Determinación de la densidad en *Guadua angustifolia*

La recolecta del material se realizó en la plantación de *G. angustifolia* de la empresa AGROMOD, se encuentra ubicada en el municipio de Reforma, Chiapas; queda comprendida dentro de las coordenadas geográficas 17° 52'

Latitud Norte y 93° 09' Longitud Oeste y una altitud de 20 msnm. El clima de la región es cálido húmedo con lluvias todo el año (“Municipio de Reforma Chiapas,” 2017).

La recolecta del material, su preparación para obtener las muestras de prueba y la realización del ensayo de densidad se realizaron de acuerdo con lo establecido en las normas *ISO-22157 Bamboo-Determination of physical and mechanical properties-Part 1-Requirements*, e *ISO/TR 22157-2 Bamboo-Determination of physical and mechanical properties of bamboo-Part 2-Laboratory Manual* (ISO, 2001, 2002).

Se seleccionaron 36 culmos de *G. angustifolia*; de dos, cuatro y seis años (joven, maduro y sobremaduro, respectivamente), los cuales tenían en promedio 15m de altura y 7.5 de diámetro. Cada culmo se dividió en tres partes que se identificaron como: base (cepa), media (basa) y superior (sobrebasa).

En laboratorio, se tomó el peso inicial (P_i), posteriormente, las probetas se saturaron mediante el método de inmersión hasta lograr su volumen máximo (VV). Después, se obtuvo su peso anhidro (P_0) secándolo en una estufa con circulación forzada de aire, a $103\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$, por 48 horas. El contenido de humedad y la densidad se obtuvieron con las siguientes fórmulas:

$$Db = \frac{P_0}{VV} = (\rho)$$

Una vez obtenidos los valores de densidad, mediante el programa estadístico R 3.5.1, se obtuvo la estadística resumen, asimismo, se les aplicó el modelo de ajuste para *G. angustifolia* obtenido de los datos de Jangra (2016). Posteriormente, se realizó la comparación de los módulos de elasticidad por edad y por sección del culmo, mediante una prueba de Tukey.

4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las Figura 11 y Figura 12 muestran la comparación de los módulos de elasticidad que se obtuvieron por la tesis de Jangra (2016) y los obtenidos mediante los modelos propuestos por Brown et al., (1980) y Sotomayor C., (2005). Se observa que ambos modelos subestiman a los datos reales de la tesis.

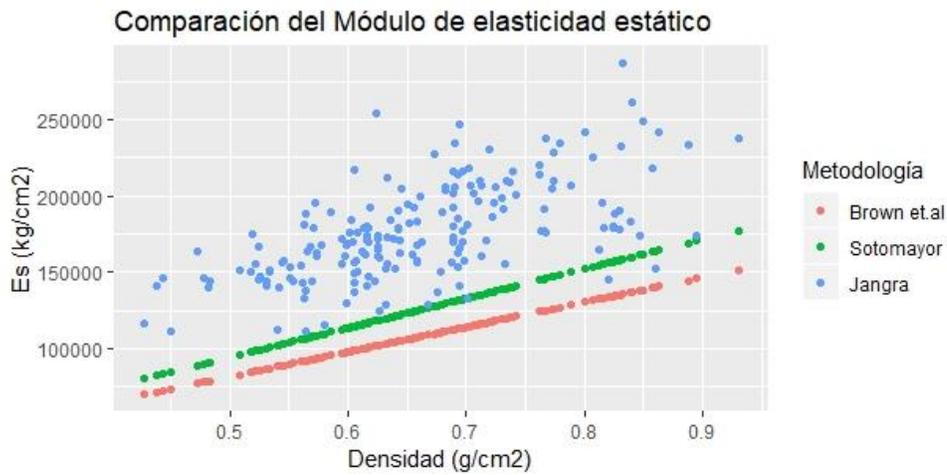


Figura 11. Comparación del Módulo de elasticidad estático

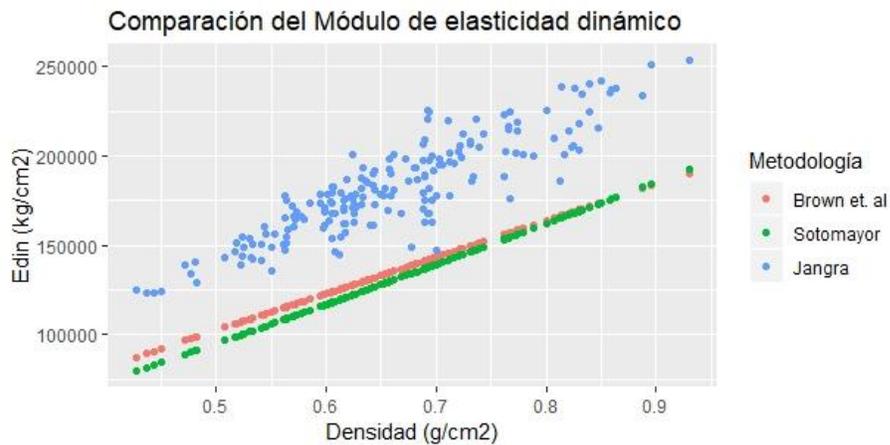


Figura 12. Comparación del Módulo de elasticidad dinámico

Las Tabla 7 y Tabla 8, muestran la estadística descriptiva y la prueba de Tukey. Se puede observar que, para el E_{din} , la metodología y de Brown y Sotomayor no presentan diferencia estadística, a diferencia del E_s donde todos si la presenta. Sin embargo, dichas metodologías se alejan por debajo del valor medio de los valores obtenidos en la tesis de Jangra (2016). Por lo que se puede deducir que, las metodologías propuestas para el caso de las maderas pueden no ser muy útiles para *G. angustifolia*, ya que pueden subestimar los valores de los módulos de elasticidad.

Tabla 7. Estadística descriptiva y prueba de Tukey para el E_s (kg/cm²)

	Brown et al. (1980)	Sotomayor (2005)	Jangra (2016)
Media	107472 α	125010 β	176851 γ
Desviación Estándar	16357.38	19406.44	31726.36
Coefficiente de variación	0.152	0.155	0.179

* *Las letras griegas se leen horizontalmente, si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

Tabla 8. Estadística descriptiva y prueba de Tukey para el E_{din} (Kg/cm²)

	Brown et al. (1980)	Sotomayor (2005)	Jangra (2016)
Media	134960 β	130386 β	181908 α
Desviación Estándar	20942.61	23127.58	27561.54
Coefficiente de variación	0.155	0.177	0.152

* *Las letras griegas se leen horizontalmente, si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

4.3.1. Los culmos de AGROMOD en Chiapas

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para la densidad y los módulos de elasticidad para 36 culmos de dos, cuatro y seis años y para las tres secciones en las que se divide el culmo. En la Tabla 9 se presenta la estadística descriptiva para la densidad de *G. angustifolia* de las muestras obtenidas en Reforma, Chiapas. Se observa que existe un incremento de la densidad de la base hacia la parte superior, encontrándose diferencias significativas de la sección superior en relación con las otras dos secciones, este comportamiento es el mismo para las tres edades. De igual manera, dicha tendencia coincide en lo presentado para *Guadua aculeata*, *Bambusa blumeana* y en general para las especies de bambúes leñosos (Zaragoza-Hernández, Ordonez-Candelaria, Bárcenas-Pazos, Borja-de la Rosa, & Zamudio-Sánchez, 2015). Sin embargo, los valores de la densidad son inferiores a los determinados por Maya, Camargo & Marino (2017) quienes evalúan la misma especie y obtuvieron valores de 0.76 y 0.83 g/cm³. La variación tan amplia en la Densidad básica del bambú se explica por las características anatómicas del mismo, asimismo, por las condiciones ambientales y el manejo donde estos se desarrollan. Por otro lado, es importante mencionar que no hay diferencia significativa entre la densidad del bambú a diferentes edades.

Tabla 9. Valores de densidad básica, para *G. angustifolia* determinados por sección del culmo

Edad	2 años			4 años			6 años		
	Base	Media	Superior	Base	Media	Superior	Base	Media	Superior
Densidad básica promedio	0.438 α	0.513 β	0.567 γ	0.501 α	0.573 β	0.615 γ	0.462 α	0.564 β	0.612 γ
Desviación estándar	0.041	0.036	0.034	0.050	0.037	0.047	0.058	0.039	0.051
Coefficiente de variación	0.093	0.070	0.061	0.100	0.065	0.077	0.095	0.069	0.084
Media General	0.505 β			0.563 α			0.546 α		

* *Las letras griegas se leen horizontalmente (por cada edad), si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

La densidad del bambú en dirección longitudinal en comparación de algunas especies arbóreas tiende a ser diferente, por ejemplo, *Abies religiosa* muestra la tendencia de que la densidad disminuye conforme aumenta la altura (Walker, Butterfield, Harris, Langrish, & Uprichard, 1993), lo que coincide con lo encontrado en *Salix babylonica* por Cobas, Area, & Moteoliva (2014). Mientras que en *G. angustifolia* y otras especies de bambú ocurre el caso contrario. Además, el comportamiento de esta propiedad acorde con la edad del culmo, muestra que a los cuatro años tiene la mayor densidad, sin embargo, no presenta diferencia estadística en comparación a los seis años.

Una vez obtenida la densidad, se estimaron los E_s y E_{din} para los 36 culmos en sus tres secciones, a través de las regresiones en las ecuaciones 1 y 2.

En la Figura 13, se muestra la relación entre la densidad y cada módulo de elasticidad. Se observa que el comportamiento de los módulos se cruza cuando la densidad es 0.55g/cm^3 , el E_{din} es menor que el E_s cuando la ρ es menor de 0.55 g/cm^3 , sin embargo, después de este valor el comportamiento se invierte.

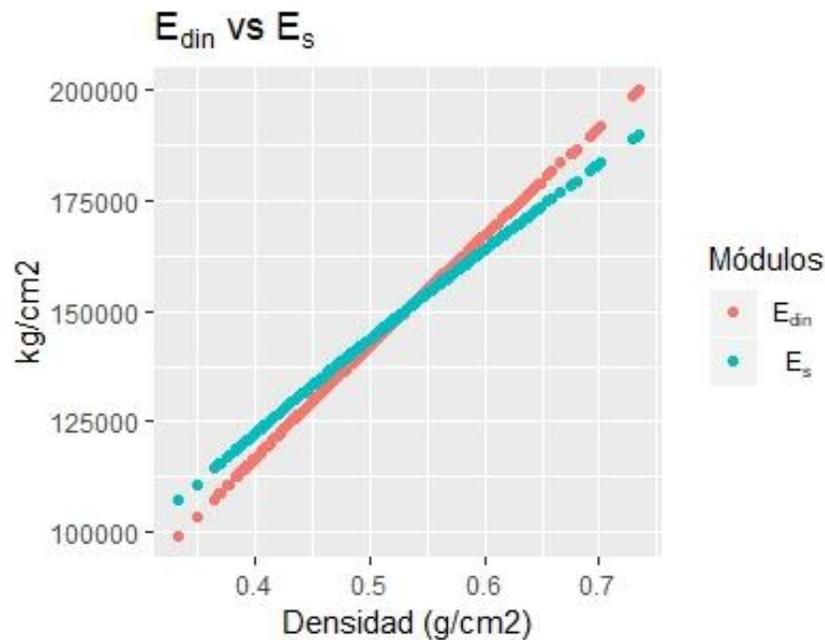


Figura 13. Comportamiento de E_s y E_{din}

Las Figura 14 y Figura 15 representan el comportamiento de los módulos de elasticidad por edad y por sección, la tendencia que tienen estos valores es similar al comportamiento de la densidad descrito en la Tabla 6, asimismo, las Tabla 10 y Tabla 11 muestran la prueba de Tukey del comportamiento de los módulos por sección. Los valores con mayor E_{din} y E_s se presentan en la parte superior del culmo en las tres edades, lo cual concuerda con lo obtenido por Correal D & Arbeláez C (2010) quienes también encontraron que la edad óptima de cosecha es entre los tres y cuatro años, basados en los módulos de elasticidad, la resistencia y la densidad de los culmos. En este trabajo, el bambú a los cuatro años también presentó los valores máximos de E_{din} y E_s , sin embargo, no presenta diferencia estadística significativa en comparación a los seis años.

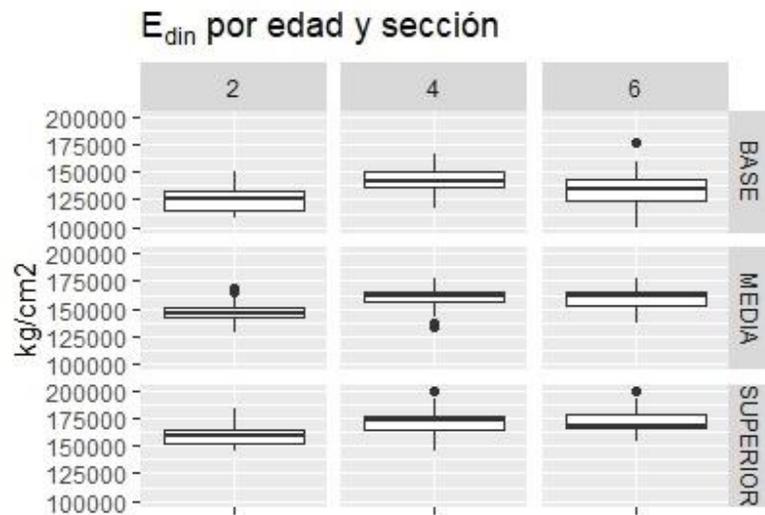


Figura 14. Comparación del E_{din} por edad y sección del culmo.

Tabla 10. Prueba de Tukey para el E_{din} por sección

EDAD	SECCIÓN		
	BASE	MEDIA	SUPERIOR
2	125392.2 γ	145528.3 β	159079.6 α
4	142538.8 γ	160523.2 β	170783.8 α
6	133957.2 γ	159851.4 β	171976.7 α

* *Las letras griegas se leen horizontalmente, si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

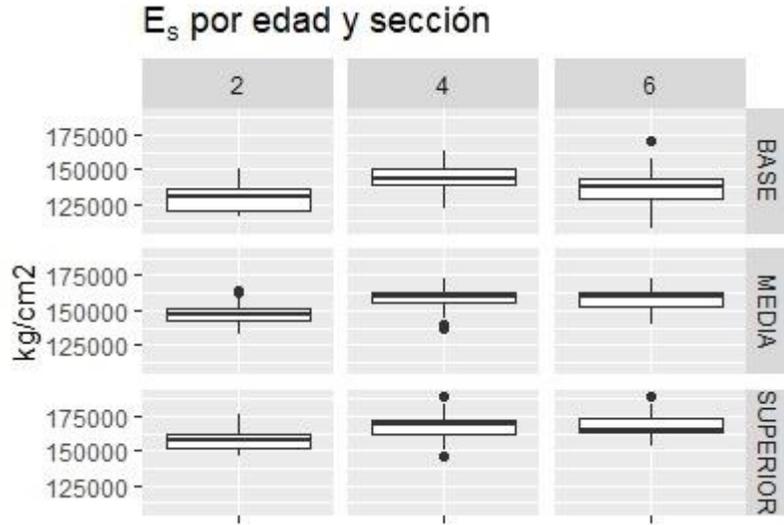


Figura 15. Comparación del E_s por edad y sección del culmo

Tabla 11. Prueba de Tukey para el E_s por sección

		SECCIÓN		
EDAD	BASE	MEDIA	SUPERIOR	
2	129578.2 γ	146391.1 β	157455.8 α	
4	143884.0 γ	158616.6 β	166843.5 α	
6	136718.9 γ	158074.2 β	167798.7 α	

* *Las letras griegas se leen horizontalmente, si son iguales la variable no difieren significativamente ($p < 0.05$).

La Tabla 12. Resumen estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de *G. angustifolia*, su clasificación y comparación con maderas mexicanas contiene la comparación de los Módulos de elasticidad de *G. angustifolia* con especies maderables que presentan la misma densidad, asimismo, se muestra su clasificación de acuerdo con los parámetros propuestos por Sotomayor (2005). Los módulos promedio obtenidos en este estudio son más bajos que los presentados para *G. angustifolia* f. *atlantica* y *G. angustifolia* f. *sur* (192191 y 176 104 kg/cm², respectivamente) (Gutierrez & Takeuchi, 2014). Y se acerca al valor

obtenido de *G. aculeata* (160000 kg/cm²) (Ordóñez-Candelaria & Bárcenas-Pazos, 2014).

Tabla 12. Resumen estadístico de las propiedades físicas y mecánicas de *G. angustifolia*, su clasificación y comparación con maderas mexicanas

Estadístico	Especie	Densidad g/cm ³	Clasificación	E _s Kg/cm ²	Clasificación	E _{din} Kg/cm ²	Clasificación
Mínimo	<i>G. angustifolia</i>	0.33	Baja	107221	Media	99402	Baja
	<i>Schizolobium parahybum</i>	0.30	Baja	62200	Baja	53000	Baja
Mediana	<i>G. angustifolia</i>	0.54	Media	153427	Alta	154076	Alta
	<i>Pinus pseudostrobus</i>	0.54	Media	134000	Alta	103600	Media
Media	<i>G. angustifolia</i>	0.54	Media	151707	Alta	102181	Media
	<i>Magnolia</i> sp.	0.54	Media	101900	Media	103595	Media
Máximo	<i>G. angustifolia</i>	0.73	Alta	189771	Muy alta	199830	Alta
	<i>Brosimum alicastrum</i>	0.73	Alta	137700	Alta	146100	Media

Se puede ver que los valores de E_{din} y E_s son mayores en los culmos de bambú y su clasificación promedio es de media a alta. En base al *Reglamento colombiano de construcción sismo resistente* (NSR-10) (Tabla 13) los valores promedio de los Módulos de elasticidad obtenidos en este estudio, demuestran que, el bambú de la plantación AGROMOD de Reforma, Chiapas cumple con los requisitos de calidad para construcciones estructurales sismo resistente.

Tabla 13. Norma Colombiana. Requisitos de calidad.

Módulos de elasticidad (kg/cm²)		
Módulo Promedio	Modulo percentil 5	Módulo mínimo
96873	76478	40788

Cabe destacar, que las estructuras diseñadas de acuerdo con los requisitos de calidad para la *Guadua angustifolia* que menciona la norma colombiana tendrá un nivel de seguridad equivalente al de estructuras diseñadas con otros materiales. Sin embargo, dichas normas se limitan al diseño de construcciones para vivienda y no pueden ser utilizadas para el diseño de estructuras diferentes de edificaciones.

4.4. CONCLUSIÓN

Las predicciones de las propiedades mecánicas mediante los modelos estadísticos para maderas propuestos por Brown et al., (1980) y Sotomayor (2005) subestiman los valores en comparación de los resultados de Jangra (2016). El modelo propuesto en esta metodología para el caso del E_{din} y el E_s presentan una correlación de 0.88 y 0.6, por lo que pueden ser considerados para la estimación de los módulos para futuros trabajos con la misma especie.

La densidad de los culmos de *G. angustifolia* no es la principal variable para describir sus propiedades físico-mecánicas. Al igual que muchas de las especies de bambú la densidad estudiada se incrementa de la base del culmo a la sección superior, sin embargo, no se muestra una variación significativa en la comparación entre edades. El mismo comportamiento tuvieron los módulos de elasticidad dinámico y estático.

Es importante tener en cuenta que las condiciones climáticas, edafológicas y de manejo del sitio influyen en las propiedades evaluadas y, por tanto, proporcionan características distintas a los culmos, lo que se debe considerar de acuerdo al uso que se quiera dar.

Por lo tanto, es importante abundar en la compilación de información sobre las propiedades físicas y mecánicas de *G. angustifolia* y realizar un modelo matemático de ajuste que permita estimar dichas propiedades basándose en una metodología no destructiva.

4.5. LITERATURA CITADA

- Abd Latif, M., Wan Tarmeze, W. A., & Fauzidah, A. (1990). Anatomical features and mechanical properties of three malasyan bamboos. *Journal of Tropical Forest Sciences*, 2(3), 227–234.
- Aragón Torre, G. (2015). *Determinación del módulo de deformación dinámico de un mortero de revestimiento a partir de muestras obtenidas en laboratorio e in situ*. Universidad de Burgos. Retrieved from <http://tesisenred.net/handle/10259/4624>
- Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. (2010). NSR-10, Título E Norma Sísmoresistente Colombiana. Colombia.
- Brown, H. P., Panshin, A. J., & Forsaith, C. . (1980). *Textbook of Wood Technology: The physical, mechanical and chemical properties of the comercial Woods of the United States*. (McGraw-Hill Company, Ed.). New York.
- Cheng-Jung, L., Ming-Jer, T., & Song-Yung, W. (2006). Nondestructive evaluation techniques for assessing dynamic modulus of elasticity of moso bamboo (*Phyllosachys edulis*) lamina. *Journal of Wood Science*, 52(4), 342–347. <https://doi.org/10.1007/s10086-005-0772-1>
- Correal D, J. F., & Arbeláez C, J. (2010). Influence of age and height position on colombian *Guadua angustifolia* bamboo mechanical propieties. *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 12(2), 105–113. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2010000200005>
- Cossolino, L. C., & Alves Pereira, A. H. (2010). Módulos elásticos : Visão geral e métodos de caracterização. *Informativo Técnico-Científico ITC-ME/ATCP*, 1–30.
- Gutierrez Gonzalez, M. G., & Takeuchi Tam, C. P. (2014). Efecto del contenido de humedad en la resistencia a tensión paralela a la fibra del bambú *Guadua Angustifolia* Kunth. *Scientia Et Technica*, 19(3), 245–250. Retrieved from <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/9117>

- ISO. (2001). Technical Report Iso / Tr 15489-2, 2001.
- ISO. (2002). Bamboo —Determination of physical and mechanical properties - Part 1: Requirements. *Shock*, 1, 1–8. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2007.4288250>
- Jangra, S. (2016). *Flexural properties as a basis for strength grading of dry round bamboo*. Coventry University.
- Janssen J., J. . (1981). *Bamboo in building structures*. Eindhoven Univeresity of technology. <https://doi.org/10.6100/IR11834>
- Kamruzzaman, M., Saha, S. K., Bose, A. K., & Islam, M. N. (2008). Effects of age and height on physical and mechanical properties of bamboo. *Journal of Tropical Forest Science*, 20(3), 211–217.
- Lara Rodríguez, C. A. (2015). *Obtención de la relación entre el módulo de elasticidad estático y dinámico del concreto , medidos experimentalmente*. Universidad Panamericana.
- Lobovikov, M., Paudel, S., Piazza, M., Ren, H., & Wu, J. (2007). *World bamboo resources. A thematic study prepared in the framewoek of the Global Forest -Resources Assessment*. (FAO, Ed.). Roma.
- Maya Echeverry, J. M., Camargo García, J. C., & Marino Mosquera, O. (2017). Características de los culmos de Guadua de acuerdo al sitio y su estado de madurez. *Colombia Forestal*, 20(2), 171–180. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2017.2.a06>
- Municipio de Reforma Chiapas. (2017). Retrieved from <http://www.municipios.mx/chiapas/reforma/>
- Norul H, H., Othman, S., Rokiah, H., Abd Latif, M., Ani, S., & Mohod T, M. (2006). Characterization of bamboo *Gigantochloa Scortechinii* at different ages. *Journal of Tropical Forest Science*, 18(4), 236–242.
- Ordóñez-Candelaria, V. R., & Bárcenas-Pazos, G. M. (2014). Propiedades físicas y mecánicas de tres especies de guaduas mexicanas (*Guadua aculeata*, *Guadua amplexifolia* y *Guadua velutina*). *Madera Bosques*, 20(2), 111–125.
- Osorio, J. D. (2018). ¿Qué es el módulo de elasticidad en concreto? Retrieved from <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/elasticidad-del-concreto>
- Rosell, J. R., & Cantalapiedra, I. R. (2011). Método simple para determinar el módulo de Young dinámico a partir de una excitación por impacto, aplicado a morteros de cal y cemento. *Materiales de Construcción*, 61(301), 39–48. <https://doi.org/10.3989/mc.2010.53509>
- Sotomayor C., J. R. (2005). Características mecánicas y clasificación de la madera de 150 especies mexicanas. *Investigación e Ingeniería de La Madera*, 1(1), 1–24.
- Spavento, E. M., Keil, G. D., & Monteoliva, S. (2008). Propiedades mecánicas de la madera. Argentina.

- Zaragoza-Hernández, I., Ordonez-Candelaria, V. R., Bárcenas-Pazos, G. M., Borja-de la Rosa, A. M., & Zamudio-Sánchez, F. J. (2015). Propiedades fisico-mecánicas de una guadua mexicana (*Guadua aculeata*). *Maderas. Ciencia y Tecnología*, 17(3), 505–516. <https://doi.org/10.4067/S0718-221X2015005000045>
- Zhou, F. (1981). Studies on physical and mechanical properties of bamboo woods. *Journal of the Nanjing Technology College of Forestry Products*, 2, 1–32.

5. DISCUSIÓN GENERAL

Los culmos presentaron, una diferencia de colores entre las edades, pero no por secciones. Se observa que el bambú a los dos años el color promedio a esta edad, tiene las coordenadas $L^*=52.93$, $a^*=-18.55$ y $b^*=38.25$, que representa un color "Dark moderate yellow". A los cuatro años el color cambio aun verde grisáceo y gris, sus coordenadas fueron $L^*= 51.81$, $a^*=-4.62$ y $b^*= 22.46$, y representan al color "Mostly desaturated dark yellow". Finalmente, el culmo a los seis años presentó un cambio drástico de color en comparación a las otras dos edades, pues su tonalidad pasó a colores cafés, el promedio de sus coordenadas fue $L^*=69.26$, $a^*=3.85$ y $b^*=34.03$, representado por el color "Slightly desaturated orange".

Por otra parte, el valor de ΔE demostró para las tres clasificaciones que las diferencias son bastante notables al ojo humano. Asimismo, se muestra que el contenido de humedad promedio disminuye conforme el culmo va madurando, por lo que esta característica puede ser una causa del cambio de coloración del bambú, sin embargo, se debe tomar con cuidado puesto que el rango del CH% es muy amplio.

En cuanto a las características mecánicas, la comparación de los módulos de elasticidad que se obtuvieron por la tesis de Jangra (2016) y los obtenidos mediante los modelos propuestos por Brown et al., (1980) y Sotomayor C., (2005) se observó que los que se utilizan para madera subestiman a los valores reales, por lo que se puede decir que estas metodologías podrían no ser útiles para bambú.

De acuerdo con el modelo de ajuste que se realizó en base a los datos de Jangra (2006), el E_{din} presentó un ajuste de bondad de 0.88 esto indica que el E_{din} tiene una mayor relación con la densidad.

Por otra parte, la densidad mostró un incremento de la parte de la base hacia la parte superior, encontrándose diferencias significativas; este comportamiento es

el mismo para las tres edades. Sin embargo, los valores de densidad fueron menores a los obtenidos por Maya Echeverry et al., (2017); Zaragoza-Hernández, Ordóñez-Candelaria, Bárcenas- Pazos, Borja-de la Rosa, & Zamudio- Sánchez (2015). El comportamiento de esta propiedad acorde con la edad del culmo, muestra que a los cuatro años tiene la mayor densidad, sin embargo, no presenta diferencia estadística en comparación a los seis años.

Finalmente, el comportamiento de los módulos de elasticidad para *G. angustifolia* es similar al comportamiento de la densidad y son similares a los obtenidos en (Ordóñez-Candelaria & Bárcenas-Pazos, 2014).

6. CONCLUSIÓN

Los culmos de bambú en sus tres estados de madurez (dos, cuatro y seis años) se ubicaron en el espacio CIELab desde un “Dark moderate yellow” hasta un “Slightly desaturated orange”. Lo anterior, hizo posible la construcción de una paleta de colores que permite identificar la edad de *G. angustifolia*. Asimismo, se puede inferir que el CH% está correlacionado con el color del culmo. Es importante destacar que, de acuerdo con la experiencia empírica de los productores, el momento adecuado para la cosecha de la *G. angustifolia* es cuando tiene una coloración grisácea que coincide con el color a los cuatro años de edad.

Las predicciones de las propiedades mecánicas mediante los modelos estadísticos para maderas propuestos por Brown et al., (1980) y Sotomayor (2005) subestiman los valores en comparación de los resultados de Jangra (2016). La madurez de los culmos de *G. angustifolia* es un criterio importante para definir sus propiedades físico-mecánicas. Al igual que muchas de las especies de bambú la densidad estudiada se incrementa de la base del culmo a la sección superior, sin embargo, no se muestra una variación significativa en la comparación entre edades.

Es importante tener en cuenta que las condiciones climáticas, edafológicas y de manejo del sitio influyen en las propiedades evaluadas y, por tanto, proporcionan características distintas a los culmos, lo que se debe considerar de acuerdo al uso que se quiera dar.