

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES



**DETERIORO CAUSADO POR DOS
HONGOS DE PUDRICIÓN EN LAS
PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL
COMPUESTO BAMBÚ-PLÁSTICO**

Presentado por:

Ana Gabriela Altez Basaldúa

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE
INGENIERO FORESTAL

Lima - Perú

2016

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los Miembros del Jurado que suscriben, reunidos para calificar la sustentación del Trabajo de Tesis, presentado por la ex-alumna de la Facultad de Ciencias Forestales, Bach. **ANA GABRIELA ALTEZ BASALDÚA**, intitulado “DETERIORO CAUSADO POR DOS HONGOS DE PUDRICIÓN EN LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DEL COMPUESTO BAMBÚ-PLÁSTICO”.

Oídas las respuestas a las observaciones formuladas, lo declaramos:

.....

con el calificativo de

En consecuencia queda en condición de ser considerada APTA y recibir el título de INGENIERO FORESTAL.

La Molina, 29 de agosto de 2016

.....
Mg. Sc. Florencio Trujillo Cuellar
Presidente

.....
Mg. Sc. Moisés Acevedo Mallque
Miembro

.....
Mg. Sc. Carlos A. Cadenas Giraldo
Miembro

.....
Ing. Martín Araujo Flores
Asesor

Mg. Sc. Aldo J. Cárdenas Oscanoa
Coasesor

DEDICATORIA

Con mucho cariño dedico este trabajo:

A mi tío Calancho, que aunque no esté hoy a mi lado es el ángel que guía mi camino y que se sentiría muy orgulloso por este logro.

A mis padres Félix y Edith por brindarme su amor, cariño, apoyo y dedicación, que desde siempre me han inculcado buenos valores y me inspiran a salir adelante.

A mis tíos Antonia y Augusto, quienes son como mis segundos padres, por brindarme siempre su cariño y apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos al Programa Nacional de Innovación para la Competitividad y Productividad, INNOVATE PERÚ, por apoyar y financiar la presente investigación con el proyecto 414-PNICP-PIAP-2014.

A mi alma mater la Universidad Nacional Agraria La Molina, especialmente a la Facultad de Ciencias Forestales por ser parte de esta investigación.

Un agradecimiento muy especial al profesor PhD. Héctor Enrique Gonzales Mora por brindarme su confianza, apoyo, consejos y las facilidades para el desarrollo de esta investigación.

Al Ing. Martin Araujo Flores por ser mi asesor, por brindarme sus valiosos consejos, aportes y observaciones para el desarrollo de la tesis.

Al Centro de Innovación (Cite Madera) del Instituto Tecnológico de la Producción (ITP) en especial al Mg. Sc. Aldo Cárdenas por ser mi coasesor, brindarme sus consejos, aportes y observaciones para el desarrollo de la tesis.

Al Sr. Jaime Borja técnico del laboratorio de preservación por enseñarme el sorprendente mundo de los hongos y su gran apoyo en la fase experimental de la tesis.

A mis amigos Karen Lázaro, Efraín Suarez, Ikeda Lora, Mariela López, Erick Suarez, por su amistad sincera, su apoyo y los momentos compartidos.

Al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), en especial al Ing. Javier Gagó por su colaboración.

A los técnicos de los laboratorios: Vicente Huamán, Marco Panduro y Enrique Cabrera.

A mi hermano Juan Altez que me ayudo en parte de la fase experimental y por sus observaciones en la redacción de la tesis.

A mis padres, hermanos, tíos y familia en general por sus consejos, preocupación y apoyo que de alguna manera me inspiran a ser cada día mejor.

RESUMEN

En el presente estudio se evaluó la resistencia a la degradación biológica del material compuesto bambú-plástico, mediante la exposición a hongos de pudrición blanca (*Pycnoporus sanguineus*) y marrón (*Rhodonía placenta*), mediante la prueba de bloque-suelo por 16 semanas según la norma ASTM D2017. Asimismo, se evaluó el efecto del deterioro causado por dichos hongos en las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto.

El material compuesto fue elaborado mediante moldeo por compresión utilizando partículas de bambú (*Guadua angustifolia* Kunth) de dos tamaños (-40/+60 y -60/+80 mesh) y en dos proporciones (30 por ciento y 50 por ciento), polipropileno virgen (48 por ciento y 68 por ciento) y anhídrido maléico de polipropileno (2 por ciento).

Según los resultados obtenidos en los ensayos de degradación biológica, los compuestos bambú-plástico elaborados con menor proporción (30 por ciento) y mayor tamaño de partículas de bambú (-40/+60) presentaron mayor resistencia a la degradación causada por los hongos de pudrición. Además, *Pycnoporus sanguineus* causó mayor degradación en el compuesto que *Rhodonía placenta*; sin embargo, la degradación causada por ambos fue poco significativa, calificando al material como altamente resistente.

Pese a los resultados obtenidos de resistencia biológica, las propiedades físicas de densidad, absorción e hinchamiento así como las propiedades mecánicas de flexión y tensión fueron afectadas significativamente por la degradación causada por los hongos de pudrición en los compuestos bambú-plástico; a excepción de la propiedad mecánica de impacto, la cual no fue afectada significativamente. Asimismo, los compuestos con menor tamaño de partículas de bambú (-60/+80) y menor proporción (30 por ciento) presentaron los valores más altos en las propiedades físicas y mecánicas, luego de su exposición a ambos hongos de pudrición.

Palabras claves: Materiales compuestos; bambú; hongos de pudrición; degradación biológica; propiedades físicas; propiedades mecánicas.

ÍNDICE GENERAL

	Página
I. Introducción	1
II. Revisión de Literatura	3
1. Bambú: <i>Guadua angustifolia</i> Kunth	3
1.1. Distribución y taxonomía.....	3
1.2. Descripción morfológica	4
1.3. Descripción anatómica	5
1.4. Descripción química.....	5
1.5. Durabilidad natural del bambú.....	6
1.6. Usos.....	6
2. Antecedentes.....	7
3. Generalidades: Los materiales compuestos plástico-madera	8
3.1. Componentes de los compuestos plástico-madera	8
3.1.1. Fibras vegetales: Madera.....	8
3.1.2. Polímeros	9
3.1.3. Aditivos: agente acoplante.....	10
3.2. Métodos de procesamiento de los materiales compuestos plástico- madera.....	10
3.2.1. Moldeo por compresión	10
3.2.2. extrusión.....	11
3.3. Propiedades de los compuestos plástico-madera.....	12
3.3.1. Propiedades físicas	12
3.3.2. Propiedades mecánicas	15
3.4. Deterioro o Degradación biológica de los compuestos plástico-madera.....	19
3.4.1. Hongos de pudrición.....	20
3.4.2. Pruebas de degradación utilizando hongos de pudrición.....	20
3.4.3. Factores de deterioro de los compuestos plástico-madera	21
III. Materiales y Métodos	27
1. Lugar de muestreo de <i>Guadua angustifolia</i>	27
2. Lugar de estudio	27
3. Materia prima de los compuestos bambú-plástico	27
4. Hongos Xilófagos	28
5. Materiales y equipos	28
6. Metodología	29
6.1. Procedimiento.....	32
6.1.1. Recolección y traslado de las cañas de bambú.....	32
6.1.2. Acondicionamiento del bambú.....	33
6.1.3. Obtención de las partículas de bambú.....	34
6.1.4. Mezclado y proceso de extrusión	35
6.1.5. Fabricación de los tableros del compuesto bambú-plástico	36
6.1.6. Dimensiones y número de probetas	39
6.1.7. Ensayo de la degradación biológica.....	41
6.1.8. Evaluación de las propiedades físico-mecánicas	48
6.2. Diseño experimental y análisis estadístico.....	53
6.2.1. Variables independientes:	53
6.2.2. Variables dependientes:.....	53
IV. Resultados y discusión.....	56
1. Evaluación de la degradación biológica.....	56

2.	Evaluación de las propiedades físicas.....	62
2.1.	Densidad.....	62
2.2.	Absorción de agua.....	67
2.3.	Hinchamiento.....	71
3.	Evaluación de las propiedades mecánicas.....	76
3.1.	Flexión.....	76
3.1.1.	resistencia máxima en flexión (MOR).....	76
3.1.2.	Módulo de elasticidad en flexión (MOE).....	82
3.2.	Tensión.....	87
3.3.	Impacto.....	92
V.	Conclusiones.....	97
VI.	Recomendaciones.....	99
VII.	Referencias bibliográficas.....	100
VIII.	Anexos.....	107

Índice de tablas

	Página
Tabla 1:	Investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos a base de fibra ligno-celulósica y sus respectivos resultados de pérdida de peso..... 23
Tabla 2:	Investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos a base de fibra ligno-celulósica y sus respectivos resultados de pérdida de peso..... 25
Tabla 3:	Número de tratamiento según tipo de hongo, tamaño de partícula de bambú y proporción bambú/plástico..... 35
Tabla 4:	Tamaño de las probetas según el tipo de ensayo y normas utilizadas 39
Tabla 5:	Escala de evaluación de la resistencia a un hongo específico. 48
Tabla 6:	Diseño experimental de los tratamientos empleados en la prueba de degradación del compuesto bambú-plástico. 54
Tabla 7:	Valores promedios y desviaciones estándar de la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico y los testigos solo de bambú expuestos a dos hongos de pudrición..... 56
Tabla 8:	Valores del análisis de variancia de la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación 58
Tabla 9:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey para la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación 60
Tabla 10:	Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y de los testigos sin ningún tratamiento (Tst). 63
Tabla 11:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación. 65
Tabla 12:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey para la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación. 66
Tabla 13:	Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst). 67
Tabla 14:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación. 69

Tabla 15:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	71
Tabla 16:	Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.	72
Tabla 17:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación....	74
Tabla 18:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	76
Tabla 19:	Valores promedios y desviaciones estándar de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).	77
Tabla 20:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	79
Tabla 21:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	81
Tabla 22:	Valores promedios y desviaciones estándar del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y testigos espuestos a humedad y sin ningún tratamiento.	82
Tabla 23:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	85
Tabla 24:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	86
Tabla 25:	Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).	87
Tabla 26:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	90
Tabla 27:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	91
Tabla 28:	Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).	92

Tabla 29:	Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	94
Tabla 30:	Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	95

Índice de figuras

	Página
Figura 1:	Distribución del bambú en el mundo.....3
Figura 2:	Estructura morfológica del culmo de la <i>Guadua angustifolia</i> Kunth.4
Figura 3:	Células del parénquima con gránulos de almidón6
Figura 4:	Diagrama de una prensa hidráulica..... 11
Figura 5:	Fases del proceso de moldeo por compresión de WPC: (a) Llenado, (b) compresión y curado, y (c) Apertura de los platos y retiro de la pieza. 11
Figura 6:	Proceso de extrusión 12
Figura 7:	Diagrama flujo de la primera etapa de la metodología 30
Figura 8:	Diagrama flujo de la segunda etapa de la metodología..... 30
Figura 9:	Diagrama flujo de la tercera y cuarta etapa de la metodología..... 32
Figura 10:	Reconocimiento de la plantación y toma de puntos GPS. 33
Figura 11:	Recolección y corte de la parte apical del culmo. 33
Figura 12:	Traslado de los culmos de bambú a Lima. 33
Figura 13:	Acondicionamiento y secado de los culmos de bambú..... 34
Figura 14:	Proceso de molienda de los culmos de bambú 35
Figura 15:	Proceso de extrusión (IPEN, Julio 2015). 36
Figura 16:	Prensa hidráulica. 37
Figura 17:	Proceso de fabricación de los tableros de los compuestos bambú-plástico..... 38
Figura 18:	Forma de las probetas de ensayo. 40
Figura 19:	Diagrama de flujo del ensayo de degradación biológica. 41
Figura 20:	Hongos de pudrición: (a) <i>Pycnoporus sanguineus</i> y (b) <i>Rhodonia placenta</i> 41
Figura 21:	Inoculación de las tiras de alimentación..... 42
Figura 22:	Balanza analítica con pesado de probeta bambú-plástico. 43
Figura 23:	Probetas bambú-plástico sumergidas en equipo de baño maría. 43
Figura 24:	Botella de ensayo de la prueba de degradación biológica. 44
Figura 25:	Determinación de la capacidad de retención del suelo. 44
Figura 26:	Esterilizador de vapor de presión portátil y frascos de prueba esterilizados. 45
Figura 27:	Preparación de botellas de ensayo de la prueba de degradación biológica. 46
Figura 28:	Eliminación del micelio del hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i> 47
Figura 29:	Eliminación del micelio del hongo <i>Rhodonia placenta</i> 47

Figura 30:	Porcentaje de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico en la prueba de degradación biológica.	57
Figura 31:	Comparación de porcentajes de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico y los testigos de bambú en la prueba de degradación biológica.....	58
Figura 32:	Densidad de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación	64
Figura 33:	Comparación de densidades de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.	64
Figura 34:	Absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.	68
Figura 35:	Comparación de la absorción a las 24 horas de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.	69
Figura 36:	Hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación	73
Figura 37:	Comparación del hinchamiento a las 24 horas de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.	73
Figura 38:	Resistencia máxima de flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.	78
Figura 39:	Comparación de la resistencia máxima en flexión (MOR) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.....	79
Figura 40:	Módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.....	83
Figura 41:	Comparación módulo de elasticidad en flexión (MOE) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.....	84
Figura 42:	Resistencia máxima en tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.	88
Figura 43:	Comparación de la resistencia máxima en tensión (MOR) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.....	89
Figura 44:	Prueba de Impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación	93
Figura 45:	Comparación de impacto de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.	94

Índice de anexos

	Página
.....	
Anexo 1 Datos para la determinación de la pérdida de peso	107
Anexo 2 Datos para la determinación de la densidad	110
Anexo 3 Datos para la determinación de la absorción de agua y del hinchamiento.....	115
Anexo 4 Datos para determinar el ensayo de flexión.....	123
Anexo 5 Datos para determinar el ensayo de tensión	126
Anexo 6 Datos para determinar el ensayo de impacto	129
Anexo 7 Análisis estadístico de la variable pérdida de peso	137
Anexo 8 Análisis estadístico de la variable absorción 24 horas	139
Anexo 9 Análisis estadístico de la variable hinchamiento 24 horas	141
Anexo 10 Análisis estadístico de la variable densidad.....	143
Anexo 11 Análisis estadístico de la variable flexión.....	145
Anexo 12 Análisis estadístico de la variable tensión	149
Anexo 13 Análisis estadístico de la variable impacto	151

I. INTRODUCCIÓN

Los materiales compuestos plástico-madera también llamados WPC's (por sus siglas en inglés Wood Plastic Composites) surgieron en respuesta a la búsqueda de nuevos materiales que presenten buenas características y excelentes propiedades, estos mezclan el estilo y la apariencia de la madera con la resistencia a la humedad, dureza y trabajabilidad del plástico (Schneider y Witt 2004). Son utilizados generalmente en la fabricación de muebles, deckings, ventanas, puertas, durmientes, interiores de automóviles, etc. Asimismo en el mercado hay una creciente demanda por materiales de bajo costo de mantenimiento, alta durabilidad y respeto por el medio ambiente (Ibach 2010).

En los últimos años se ha extendido el uso de materiales ligno-celulósicos diferentes de la madera en los WPC's, dentro de los cuales sobresale el bambú. Según Cruz (2009) esta gramínea destaca por su rápido crecimiento y por presentar fibras muy fuertes. En el Perú, la especie de bambú más utilizada a nivel comercial es la *Guadua angustifolia* Kunth (Takahashi 2010). Esta especie posee fibras altamente resistentes y con adecuadas propiedades físico-mecánicas para diversos usos, por ello se le considera un sustituto de la madera y de otros bambúes (Londoño, 2000). Además es ampliamente utilizada en la industria de la construcción, del mueble, de la artesanía y del papel (Botero 2004).

En los primeros años de comercialización, los WPC's se promocionaron como resistentes al ataque biológico (Morrell *et al.* 2010). Los fabricantes aparentemente creían que el plástico encapsulaba completamente las fibras de madera, lo cual limitaba el acceso para el ataque de hongos (Mankowski y Morrell 2000). Sin embargo, en el parque Nacional Everglades en Florida, Estados Unidos se encontraron evidencias de cuerpos fructíferos de hongos de pudrición blanca y marrón en las superficies de productos de WPC expuestos por 4 años, lo que demostró que la madera en estos materiales seguía siendo susceptible al biodeterioro (Morris y Cooper 1998). Una serie de estudios posteriores realizados en laboratorio demostraron que la madera en muchos WPC's fue susceptible a la degradación (Morrell *et al.* 2010). Aunque cabe señalar que la tasa de degradación de los WPC's es más baja comparada con la madera sólida, de todos modos estos son susceptibles a la degradación

biológica por hongos de pudrición por contener madera en su formulación (Ibach 2010). De la misma manera materiales compuestos bambú-plástico, estudiados en la presente investigación, al contener bambú en su composición son susceptibles a la degradación biológica por hongos de pudrición, así menciona Hidalgo (2003) que la durabilidad natural del bambú es reducida, lo cual limita su tiempo de uso.

Como se sabe la degradación causada por hongos de pudrición afecta principalmente a la madera en los materiales compuesto plástico-madera (WPC), pero no se conoce con certeza los efectos sobre las propiedades generales en los compuestos. Por ello se han realizado diversos estudios que han demostrado pérdidas en las propiedades físico-mecánicas después de una exposición a hongos bajo condiciones controladas (Morrell, *et al.* 2010).

En la presente investigación se elaboraron materiales compuestos bambú-plástico con dos tamaños de partícula (-40/+60 y -60/+80) de bambú y dos proporciones de bambú/plástico (50/50 y 30/70), que fueron expuestos a hongos de pudrición blanca y marrón bajo condiciones controladas de laboratorio. El objetivo fue evaluar el efecto del deterioro causado por los dos hongos de pudrición en el compuesto bambú-plástico y en las propiedades físico-mecánicas de dicho compuesto.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

1. BAMBÚ: *Guadua angustifolia* Kunth

1.1. DISTRIBUCIÓN Y TAXONOMÍA

El bambú taxonómicamente pertenece a la familia Poacea y a la subfamilia de Bambusoideae. En el mundo existe un total de 90 géneros y 1100 especies de bambúes, que se distribuyen latitudinalmente desde el norte de Japón (51° N) hasta el sur de Chile (47° S) y altitudinalmente desde el nivel del mar hasta los 4,300 metros (Castaño y Moreno 2004). En América existen entre 460 a 600 especies y 41 géneros, que se extienden desde los Estados Unidos (39°25'N) hasta Argentina (47°S), encontrándose una mayor diversidad en países como Brasil, Colombia, Venezuela y Ecuador. El bambú americano nativo más importante a nivel mundial es la *Guadua angustifolia* Kunth que es el tercero más alto del mundo (Cruz 2009). En el Perú existen más de 50 especies nativas parcialmente identificadas y varias aún por identificar (Takahashi 2010).



Figura 1: **Distribución del bambú en el mundo**

FUENTE: Adaptado de Zehui y Zhenhua (2007).

1.2. DESCRIPCIÓN MORFOLÓGICA

El bambú es una de las gramíneas más grandes del mundo, se distinguen por tener un hábito perenne, con sistema de raíces (rizomas) bien desarrollados; con tallos cilíndricos segmentados (culmos), lignificados y fuertes; follaje abundante y hojas pecioladas (Botero 2004, Castaño y Moreno 2004).

Botero (2004) mencionó que la *G. angustifolia* es de rápido crecimiento y de mayor productividad. Presenta incrementos de altura de 21 cm por día, alcanzando su altura máxima en los primeros seis meses de crecimiento y su madurez entre los cuatro y cinco años. Además Cruz (2009), afirmó que suele crecer entre 10 y 30 metros.

Según Castaño y Moreno (2004) el culmo equivale al tallo de otras plantas leñosas, ya que constituye el eje aéreo segmentado que emerge del rizoma. Normalmente se observa en el culmo un incremento gradual en la longitud, desde la cepa (base) hacia la sobrebasa (porción media) y posteriormente una reducción desde ésta hacia la copa (ápice). Las tres cuartas partes del culmo (cepa, basa y sobrebasa) son utilizables en la construcción quedando lo demás como residuo (varillón y copa). La estructura morfológica de la *G. angustifolia* se muestra en la Figura 2.

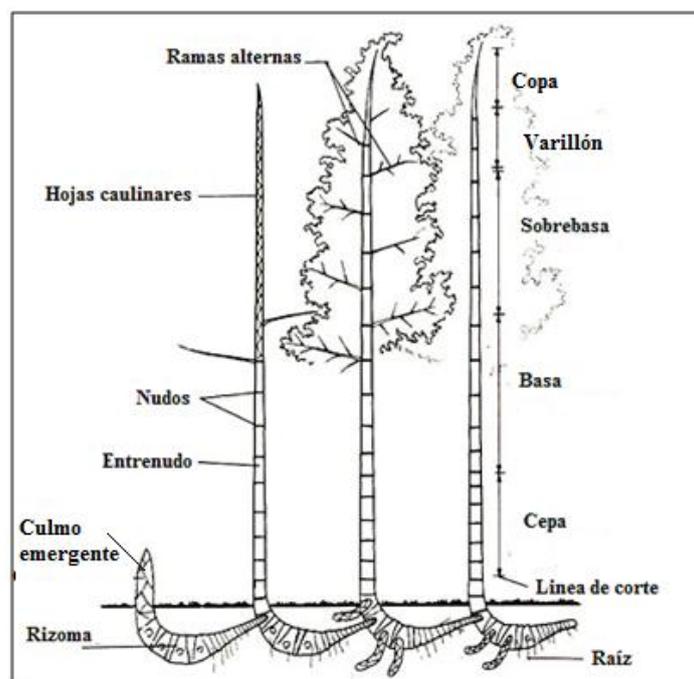


Figura 2: Estructura morfológica del culmo de la *Guadua angustifolia* Kunth.

FUENTE: *Bambusa Estudio* (2015).

1.3. DESCRIPCIÓN ANATÓMICA

Liese (1985) mencionó que en general en el bambú, anatómicamente el tejido del culmo está compuesto principalmente por células del parénquima, fibras y haces vasculares (compuestos por los vasos y tubos cribosos con células acompañantes). Cuantitativamente tiene 50 por ciento de parénquima, 40 por ciento de fibras y 10 por ciento de tejidos conductivos (vasos y tubos cribosos).

Según Londoño *et al.* (2002) particularmente en la *G. angustifolia*, el tejido del culmo está compuesto por corteza, células de parénquima, fibras y haces vasculares. Cuantitativamente tiene 51 por ciento de parénquima, 40 por ciento de fibras y 9 por ciento de tejido conductivo. Asimismo a lo largo del culmo, el porcentaje de fibra es más alto en el segmento apical (56 por ciento) que en los segmentos basal (29 por ciento) y medio (26 por ciento).

La estructura anatómica determina las propiedades del culmo en el bambú (Liese 1985). Del mismo modo estas características anatómicas del culmo son las que reflejan su uso final (Londoño *et al.* 2002).

1.4. DESCRIPCIÓN QUÍMICA

Liese (2004) mencionó que los componentes químicos de las células del culmo son celulosa (50 por ciento), hemicelulosas (25 por ciento) y lignina (25 por ciento). Dichas cantidades son similares a la madera, sin embargo el bambú no produce componentes tóxicos (extractivos) como el duramen de la mayoría de árboles. Por ello su durabilidad natural contra la biodegradación es generalmente bastante baja.

Además se destaca la presencia del almidón en las células del parénquima que se almacena como fuente de energía (Fig. 3). Su cantidad es de 2 hasta 10 por ciento y está influenciada por la edad y la altura de la caña (Liese 2004). El almidón es considerado como un componente enriquecedor, por lo cual el bambú es la fuente principal de alimento de organismos biológicos como hongos e insectos (Burgos 2003).

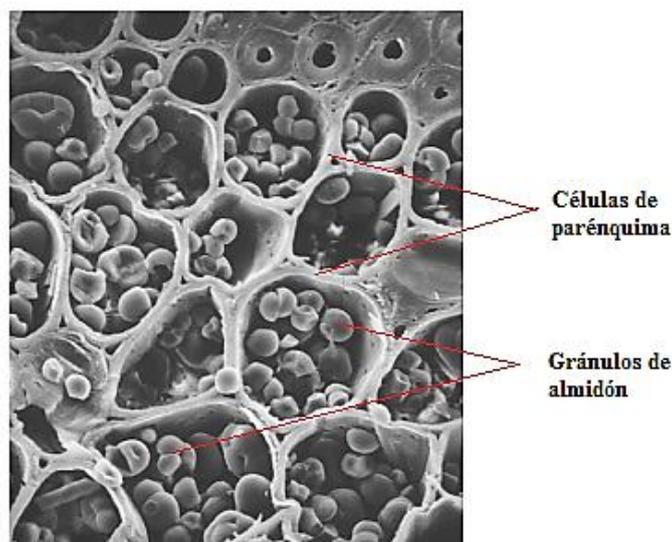


Figura 3: **Células del parénquima con gránulos de almidón**

FUENTE: Liese (2004).

1.5. DURABILIDAD NATURAL DEL BAMBÚ

La durabilidad del bambú está relacionada con la naturaleza anatómica y química de sus células, varía a lo largo del culmo y en el espesor de la pared. Así se considera que la parte basal es más durable y la parte interna de la pared se deteriora más rápido que la parte externa. Asimismo el bambú es fuente de alimento de una gran variedad de organismos, como resultado de la falta de constituyentes tóxicos y su abundancia en almidón (Burgos 2003). Existen diversos agentes degradadores de los tallos de guadua, los más significativos son los hongos xilófagos, insectos y la humedad (Castaño y Moreno 2004).

Los hongos xilófagos o de pudrición desintegran el sistema celular de los tallos del culmo, lo que da lugar a la pudrición y a la aparición de manchas (Castaño y Moreno 2004). Estos hongos degradadores del culmo, crecen en el lumen de las células y degradan con sus enzimas únicamente las celulosas y hemicelulosas con lignina restante causando la pudrición marrón o degradan todas las sustancias de la pared causando la pudrición blanca. Así los ligeros cambios de color o pérdida de peso en el culmo son indicadores de la acción fúngica que reduce en gran medida las propiedades de resistencia (Liese 2004).

1.6. USOS

La *Guadua angustifolia* Kunth con respecto a las especies maderables posee enormes ventajas comparativas como propiedades mecánicas superiores, rápido crecimiento, mayor productividad y tiempos cortos de aprovechamiento, que han hecho que tenga diversos usos (Cruz 2009). Las mayores aplicaciones del bambú se dan en la construcción (viviendas,

puentes, etc.), la fabricación de muebles, la cestería, artesanía, pulpa de papel, rayón, carbón vegetal, textiles, alimento, pisos, aglomerados y paneles. Adicionalmente se le utiliza como planta ornamental y recurso natural para la conservación del medio ambiente (Botero 2004, Castaño y Moreno 2004).

2. ANTECEDENTES

Los compuestos plástico-madera desde sus inicios han experimentado numerosos cambios y un gran crecimiento. El uso de los materiales lignocelulósicos como materia prima en los termoplásticos surgió a principios de 1940 en el Servicio Forestal de los Estados Unidos (Schneider y Witt 2004). Más adelante, en los años de 1960's y 1970's, se publicaron artículos académicos y la datación de patentes. A finales de 1980 los productos de los compuestos plástico-madera comenzaron a aparecer en los mercados de Estados Unidos (Bowyer *et al.* 2010). En 1990 hubo un resurgimiento mundial en su interés debido a la tendencia ambiental del uso de materiales renovables (Rowell 2006).

En todo el mundo ha aumentado el volumen de producción de productos compuestos de plásticos reforzados con madera y fibras. Evidencia de ello, es el mercado de Estados Unidos, donde el uso de los compuestos madera-plástico está presente en la fabricación de muebles y en la industria de la construcción. Asimismo, un interés similar se da en Europa en la producción de perfiles y tubos, piezas de robots, aplicaciones en el sector del mueble, productos para la construcción y aplicaciones para interiores de automóviles (Ichazo 2001, Bledzki 2005 y Jacob 2006 citados por Bouza 2008).

Durante muchos años no hubo respuestas acerca de la degradación causada por hongos de pudrición en los WPC's (Morris y Cooper 1998). Pero Naghipour (1996) realizó una investigación acerca de los cambios en las propiedades mecánicas de los WPC's después de la exposición a un hongo de pudrición. Elaboró cinco formulaciones de WPC a base de polipropileno y polietileno de alta densidad, fibras de madera (con 40; 50; 60; 70 y 80 por ciento) y con adición de agente acoplante. Las muestras de las formulaciones de WPC fueron expuestas durante 16 semanas a un hongo de pudrición marrón. Los resultados mostraron que el hongo causó pérdida significativa de masa y de fuerza en los materiales compuestos con alto contenido de madera (por encima del 60 por ciento).

De la misma manera Schirp y Wolcott (2005) estudiaron el efecto de la degradación de los hongos y la absorción de humedad en las propiedades mecánicas de WPC elaborados por

extrusión. Para dicho experimento utilizaron dos formulaciones de WPC (50 y 70 por ciento de madera) y polietileno, que los expusieron a un hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y a un hongo de pudrición marrón (*Gloeophyllum trabeum*). Obtuvieron como resultados que las mayores pérdidas de peso para ambos tipos de hongos se dieron en las formulaciones con alto contenido de madera (70 por ciento) y con respecto a la fuerza de flexión (MOR) y la rigidez en flexión (MOE) fueron afectadas más severamente por la absorción de humedad que por la colonización de los hongos.

3. GENERALIDADES: LOS MATERIALES COMPUESTOS PLÁSTICO-MADERA

Los materiales compuestos son combinaciones de dos o más materiales diferentes que poseen una interfase discreta y reconocible que los separa, estos dan como resultado un material heterogéneo con propiedades estructurales o funcionales mejoradas (Stupenengo 2011). En la actualidad se están utilizando con mayor frecuencia los materiales compuestos de matrices poliméricas reforzadas con fibras naturales, ya que son más económicas y de menor impacto medioambiental. Uno de los ejemplos más conocidos son los polímeros reforzados con fibra lignocelulósica como la madera, los llamados compuestos plástico-madera o WPC por sus siglas en inglés de Wood Plastic Composites (Wolcott y Englund 1999). Los productos de WPC exhiben propiedades superiores que los productos elaborados con sus componentes por separado (solo con plástico o sólo con madera) tales como la resistencia físico-mecánica, resistencia a los hongos e insectos y el control de la acidez y el fuego (Forest Products Laboratory 2010).

3.1. COMPONENTES DE LOS COMPUESTOS PLÁSTICO-MADERA

Los compuestos plástico-madera consisten de una mezcla de madera de cualquier forma ya sea como harina, fibras o partículas; polímeros de grado industrial como el polietileno, polipropileno y cloruro de polivinilo; y aditivos como agentes de acoplamiento, pigmentos, antioxidantes, estabilizadores UV, agentes antimicrobianos, etc. (Caulfield *et al.* 2005, Klyosov 2007).

3.1.1. FIBRAS VEGETALES: MADERA

Las fibras vegetales son consideradas como alternativa de refuerzo en los compuestos poliméricos, ya que presentan buenas propiedades mecánicas, son biodegradables, reciclables, de bajo costo y baja densidad (Lee *et al.* 2009). Generalmente, las fibras consisten de: celulosa, hemicelulosa y lignina. Los porcentajes de estos componentes varían

con los diferentes tipos de fibra. Las posibles desventajas que presentan las fibras vegetales son la absorción de agua del ambiente y la incompatibilidad fibra (hidrofílica)-polímero (hidrofóbica) que trae como consecuencia la deformación de la superficie de los materiales compuestos por la hinchazón y la creación de huecos (Westman *et al.* 2010).

En la industria de los compuestos la fibra vegetal más utilizada es la madera, ya que se considera menos costosa, más rígida y más fuerte (Clemons 2008). Las formas de utilización se pueden clasificar en dos grandes grupos, de partículas y de fibras. El grupo de las partículas sirven tanto como refuerzo y relleno dentro de las matrices poliméricas, ya que estas tienen dimensiones que son aproximadamente iguales en todas las direcciones y puede ser de cualquier forma. Las partículas se pueden utilizar para aumentar las propiedades mecánicas; sin embargo, se utilizan comúnmente como extendedores para reducir el uso de polímeros. En cambio en el grupo de las fibras solo se consideran de reforzamiento porque su función principal en la matriz es apoyar la carga a lo largo de la longitud de la fibra que proporciona la fuerza y rigidez en la dirección de la fibra. Como consecuencia, las propiedades de los WPC's, tales como la tracción y la resistencia a la flexión mejoran por la presencia de las fibras de madera (Wolcott y Englund 1999).

3.1.2. POLÍMEROS

Los polímeros son materiales de alto peso molecular que están conformados por moléculas múltiples de unidades simples y su desempeño está determinado por su estructura molecular (Clemons 2008). Según el criterio de comportamiento y procesabilidad frente al calor podemos clasificarlos en dos grandes grupos, los termoestables y los termoplásticos (Besednjak 2005). Los polímeros termoestables son aquellos plásticos que una vez curados no pueden ser fundidos de nuevo por calentamiento, estos incluyen a las resinas. Por otro lado, los polímeros termoplásticos son aquellos plásticos que se pueden fundir repetidamente, estos incluyen al polietileno, polipropileno y cloruro de polivinilo (PVC) (Caulfield *et al.* 2005). Para la fabricación de los WPC los más aplicables son los termoplásticos, ya que pueden ser procesados a temperatura por debajo de los 200 °C, debido a la limitada estabilidad térmica de la madera (Klyosov 2007).

El polipropileno es un material termoplástico que se obtiene por la polimerización del propileno. Este homopolímero se caracteriza porque es cristalino, tiene una temperatura de fusión definida entre 161-165 °C, una baja distribución de peso molecular y una baja densidad de 0.90 g/cm³. Además comparado con el polietileno presenta mejores

propiedades ya que es más ligero, más fuerte, más rígido, menos resbaladizo, presenta una mejor resistencia a la deformación y un menor desgaste. Sin embargo a bajas temperaturas es más frágil que el polietileno (Plowden *et al.* 1997 y Klyosov 2007).

3.1.3. ADITIVOS: AGENTE ACOPLANTE

En las técnicas de procesamiento utilizadas para la mezcla del plástico con la madera se puede requerir del uso de muchos tipos diferentes de aditivos (Rowell 2006). Dado que en los WPC's, el componente madera es hidrófilo y el plástico es hidrófobo, a menudo se utiliza un compatibilizador o agente acoplante para mejorar la unión interfacial de estas dos fases distintas (Caulfield *et al.* 2005). También se emplean para mejorar la dispersión, flujo y propiedades mecánicas de los materiales compuestos cuando se requiere un mayor rendimiento (Rowell 2006). Uno de los compatibilizadores más comunes utilizados en la actualidad es anhídrido maléico de polipropileno (MAPP).

Este compatibilizante (MAPP) funciona mediante dos mecanismos diferentes. El primero, donde el anhídrido reacciona con un grupo hidroxilo de la pared celular del polímero para formar un enlace éster. Segundo hay un enredamiento de la cola del polipropileno con el MAPP en la masa termoplástica fundida, que da como resultado un enlace mecánico entre la lignocelulosa hidrófila y el termoplástico hidrófobo. (Caulfield *et al.* 2005, Rowell 2006).

3.2. MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS PLÁSTICO- MADERA

Los productos de WPC's se fabrican bajo condiciones de calor y presión para encerrar la fibra celulósica en el plástico. Los procesos de fabricación más utilizados son compresión, extrusión e inyección (Klyosov 2007). En el presente estudio solo se utilizaron los procesos de compresión y extrusión, los cuales se detallan a continuación:

3.2.1. MOLDEO POR COMPRESIÓN

Es un procedimiento para obligar a un material plástico a adaptar su forma exterior a la de un molde que actúa como embolo. Se realiza en una prensa hidráulica (Fig. 4) y consiste en depositar, cierta cantidad de material en la cavidad inferior de un molde. Esta cavidad es calentada por electricidad al igual que la parte superior del molde. La parte inferior sube y las cavidades se cierran, se aplica presión por medio de un embolo hidráulico, así el material a moldear llena la cavidad y se forma la pieza (Fig. 5). El molde permanece cerrado mientras el producto se cura o endurece (Cornish 1997).

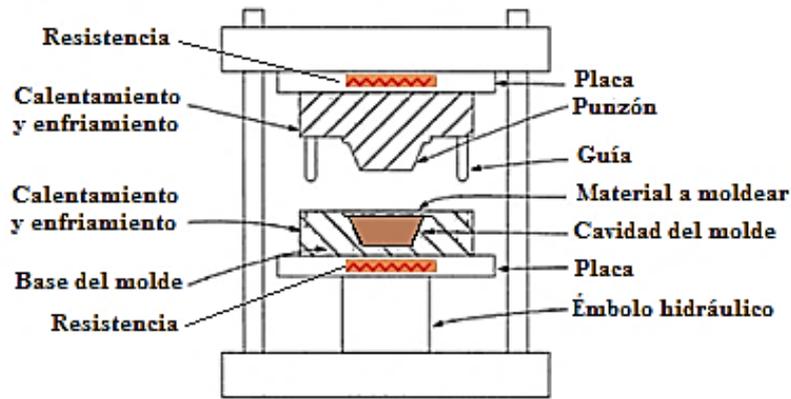


Figura 4: Diagrama de una prensa hidráulica.

FUENTE: adaptado de Callister (2007).

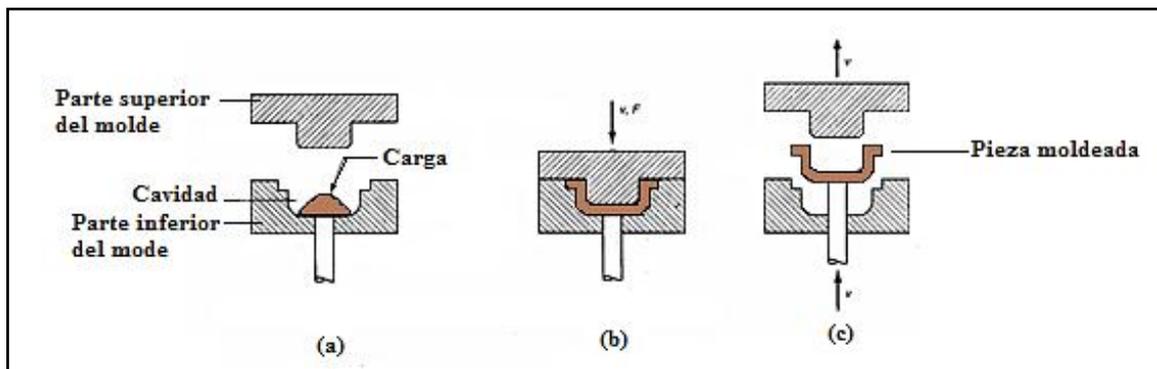


Figura 5: Fases del proceso de moldeo por compresión de WPC: (a) Llenado, (b) compresión y curado, y (c) Apertura de los platos y retiro de la pieza.

FUENTE: adaptado de De Garmo et al. (1994).

3.2.2. EXTRUSIÓN

El proceso de extrusión es uno de los más importantes en la industria de transformación de plásticos, pero además se utiliza para mezclar y formular compuestos de plásticos. El proceso de extrusión consiste en colocar el material en la tolva de alimentación de la máquina extrusora, de allí pasa a un cilindro donde hay un husillo o tornillo sin fin que gira dentro del cilindro y es capaz de bombear (empujar) el material a una velocidad específica, por donde avanza hasta llegar a la zona de calentamiento. Luego el material se suaviza y funde por calentamiento y es empujado hasta el final del cilindro, donde hay un dado con una forma determinada donde se enfría y transforma en sólido y adquiere el perfil deseado (Cornish 1997 y Ramos 2013).

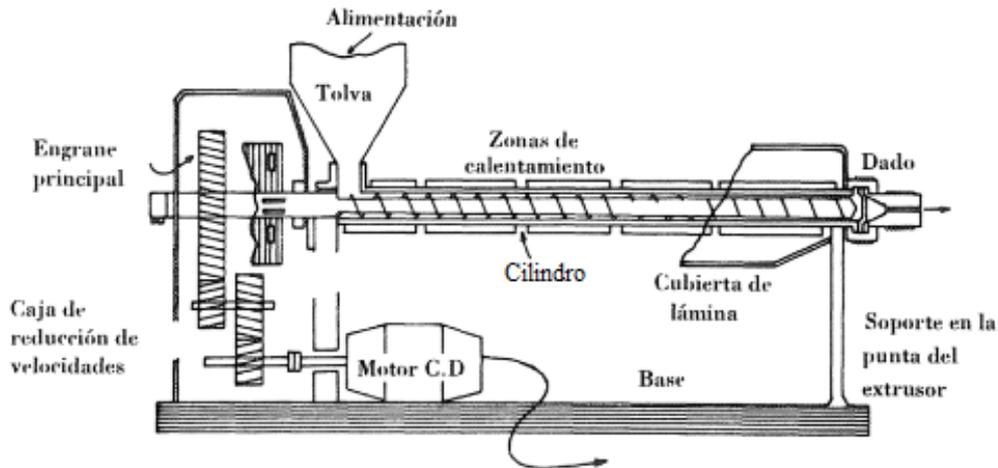


Figura 6: **Proceso de extrusión**

FUENTE: Ramos (2013)

3.3. PROPIEDADES DE LOS COMPUESTOS PLÁSTICO-MADERA

Las principales propiedades estudiadas en los materiales compuestos plástico-madera fueron las propiedades físicas de absorción, hinchamiento y densidad y las mecánicas de flexión, impacto y tensión, las cuales se detallan a continuación:

3.3.1. PROPIEDADES FÍSICAS

a. Absorción e hinchamiento

En los materiales compuestos la mala adherencia entre las partículas de madera y la matriz polimérica genera espacios vacíos (poros) alrededor de las partículas de madera (Bouafif *et al.* 2009). Estos poros son abiertos y forman cadenas que penetran por toda la matriz, donde las partículas de madera quedan expuestas a la absorción de agua. Por tanto la absorción de agua y el hinchamiento en los materiales compuestos dependen de su porosidad y la cantidad de fibras celulósicas (Klyosov 2007).

La absorción de agua es producida principalmente por los grupos hidroxilo de las fibras celulósicas lo que conduce a su hinchamiento. Por ello cuando los materiales compuestos plástico-madera están expuestos a la humedad, las fibras de madera se hinchan lo cual provoca daños en la matriz (microfisuras), es decir la fractura de las partículas de madera debido a la hinchazón favoreciendo la posterior descomposición por hongos (Ibach 2010).

Pero cabe resaltar que los materiales compuestos plástico-madera poseen una absorción de agua relativamente baja en comparación con la madera sólida (Klyosov 2007, Wang y

Morrel 2004). Lo cual influye directamente en la durabilidad de los materiales plástico-madera es decir en su resistencia a la degradación fúngica (Klyosov 2007).

Por otro lado se considera que el hinchamiento del espesor en los materiales compuestos plástico-madera es más alto en comparación con la madera sólida (Kartal *et al.* 2013). Ya que existen factores como la expansión de las grietas y/o la desunión de las interfaces madera-plástico que proporcionan vías para la penetración del agua. De esta manera el hinchamiento de los componentes de la madera afectan la microestructura de los WPC's (Steckel *et al.* 2006).

En los WPC's el resultado del tamaño de partícula en la absorción de agua se puede explicar por su reacción con los grupos hidroxilos. Es decir las partículas más grandes conducen a mayores superficies hidrófilas expuestas o mayor exposición, aumentando la absorción de humedad y el hinchamiento (Bouafif *et al.* 2009, Verhey y Laks 2002). Por otro lado las partículas más pequeñas son más propensas a ser encapsuladas de manera uniforme por la matriz polimérica por tanto presentan una vía menos continua para la absorción de agua o entrada de humedad (Wang y Morrel 2004).

La creencia de que las partículas de madera están completamente encapsuladas por el plástico en los materiales compuestos no es completamente cierta. En particular, cuando los WPC's contienen una cantidad significativa de partículas de celulosa, estas forman largas cadenas extendidas y en contacto, a lo largo de las cuales penetra el agua (Klyosov 2007).

Por lo tanto en los materiales compuestos plástico-madera la tasa de degradación fúngica en relación a la tasa de absorción de humedad dependerá del tamaño de partículas de madera y la relación de madera/polímero (Wang y Morrel 2004).

En el 2011, Hosseinihashemi *et al.* elaboraron compuestos con fibra de bagazo (40 por ciento), de polipropileno (58 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) que se expusieron a hongos de pudrición por un tiempo de exposición de 16 semanas y luego determinaron los valores de las propiedades físicas. Para la absorción e hinchamiento a las 24 horas se obtuvieron valores de 10,04 por ciento y 4,10 por ciento respectivamente luego de la exposición a un hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y de 9,03 y 3,61 por ciento respectivamente para el hongo de pudrición marrón (*Coniophora puteana*).

En el 2012, Cárdenas obtuvo valores de absorción de 5,1 por ciento e hinchamiento del 10 por ciento para compuestos elaborados con partículas de pino (50 por ciento) y polipropileno (48 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) por 200 días sin exposición a hongos de pudrición.

En el 2013, Kartal *et al.* elaboraron compuestos con madera, bambú y polipropileno con tres tamaños de partícula (30, 60 y 100 mesh) y dos proporciones 50/50 y 30/70 (polipropileno/madera o bambú) y lo expusieron a hongos de pudrición. Obtuvieron valores de la absorción a los 30 días para la proporción 50/50 con madera con tamaño de partícula 30 mesh de 16,56 por ciento y con 60 mesh de 16,43 por ciento y con bambú con 40 mesh de 17,14 por ciento. Para el hinchamiento obtuvieron valores de la absorción a los 30 días para la proporción 50/50 con madera con tamaño de partícula 30 mesh de 9,46 por ciento y con 60 mesh de 9,73 por ciento y con bambú con 40 mesh de 6 por ciento. Así determinaron un ligero decrecimiento en el contenido de humedad en las muestras con la disminución del tamaño de las partículas pero mencionan que esto no fue estadísticamente significativo. Por otro lado resaltan que el efecto del contenido de partículas fue predominante en la absorción e hinchamiento de las muestras.

b. Densidad

En los materiales compuestos plástico-madera (WPC) la disminución de la densidad significa un incremento en la porosidad lo que afecta todas las propiedades importantes en los tableros. Los materiales compuestos tienen cadenas de poros (espacios vacíos) que penetran en toda la matriz en los cuales las fibras de madera quedan expuestas. Esta porosidad facilitaría el acceso de organismos microbianos y/o fúngicos que tomaran como alimento la madera y por ende conduciría a la degradación. Así se cumple que cuanto menor es la densidad de tableros de los compuestos plástico-madera, mayor es la probabilidad de degradación posiblemente microbiana y/o fúngica. Mantener una densidad lo más alta posible para una determinada composición de plástico-madera es muy importante para la calidad del WPC (Klyosov 2007).

En los WPC el incremento en el contenido de partículas de madera disminuye los valores de densidad (Klyosov 2007). Sin embargo el tamaño de partículas tiene una ligera influencia en los valores de densidad. Un decrecimiento del tamaño de las partículas, incrementa ligeramente los valores de densidad (Kartal *et al.* 2013).

Schirp and Wolcott (2005) elaboraron compuestos con madera (50 por ciento), polietileno (44 por ciento) y agente acoplante (6 por ciento) y lo expusieron a hongos de pudrición por un tiempo de exposición de 3 meses. Obtuvieron valores de densidad de 1,05 g/cm³ expuesto al hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y de 1,07 g/cm³ expuesto al hongo de pudrición marrón (*Gloeophyllum trabeum*).

En el 2012, Cárdenas elaboró compuestos con partículas de pino (50 por ciento), polipropileno (48 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) y se obtuvieron valores de densidad entre 1,06 y 1,11 g/cm³ que fueron mayores que los testigos (0,90 g/cm³). Dichos resultados los explicó que la madera de pino al tener alta densidad (aprox. 1,5 g/cm³) y por la alta adhesión de estas partículas de madera a la matriz polimérica, ello causaría el aumento de la densidad del compuesto.

Kartal *et al.* (2013) elaboraron compuestos con polipropileno y madera o bambú, con tres tamaños de partícula (30; 60 y 100 mesh) y con proporciones (50/50 y 30pp/70mób) sin exposición a hongos de pudrición. Obtuvieron valores de densidad para los tamaños de partícula 30; 60 y 100 mesh con la proporción 50/50 de 1,07; 1,08 y 1,08 g/cm³ respectivamente y para la proporción 30/70 de 1,15; 1,17 y 1,20 g/cm³ respectivamente. En el caso de los compuestos bambú-polipropileno con tamaño de partícula 40 mesh obtuvieron valores de 1,04 g/cm³ para los de proporción 50/50 y 1,14 g/cm³ para los de proporción 30/70.

3.3.2. PROPIEDADES MECÁNICAS

En los materiales compuestos plástico-madera (WPC) como se sabe el ataque de hongos afecta principalmente a la madera, pero no se conoce con certeza los efectos sobre las propiedades generales en los compuestos (Morrell *et al.* 2010).

En los WPC's en muchos casos la madera funciona solo como material de relleno y no como refuerzo por lo tanto no contribuye en gran medida a la fuerza y resistencia del material compuesto. Por lo tanto el efecto de la degradación por hongos en la fuerza y resistencia en los WPC's no es tan significativo como lo es en la madera maciza. Sin embargo, la determinación de la pérdida de las propiedades mecánicas de los WPC puede ayudar a validar resultados de pérdida de peso (Ibach y Clemons 2002, Clemons e Ibach 2004). Por otro lado, si la madera como relleno se sustituye como un elemento de refuerzo (que pueden actuar adheridas a la matriz de plástico) en este caso la fuerza y la resistencia sí

podrían ser más afectados por la degradación de los hongos y se consideraría un problema importante (Clemons e Ibach 2004).

La pérdida de peso de los WPC's no puede determinar con precisión la degradación en sus primeras etapas, sin embargo la pérdida de resistencia mecánica sí puede ser observada sin la pérdida de peso notable (Eaton y Hale 1993). Durante las pruebas del bloque-suelo, el material compuesto no sólo es atacado por hongos de pudrición, también se puede incurrir en daños debido a la absorción de humedad. Así por los efectos negativos de la absorción de humedad en el rendimiento de la flexión y tensión, no se utilizan las propiedades mecánicas para evaluar la resistencia de los materiales compuestos a los hongos de pudrición (Clemons e Ibach 2004).

En los materiales compuestos plástico-madera la humedad penetra por las grietas del plástico causando su deterioro y disminuyendo sus propiedades mecánicas (Morrell *et al.* 2010). Se sabe que las fuerzas de flexión y de tensión son mayormente afectadas por la absorción de humedad que por la exposición a los hongos (Schirp *et al.* 2008). En un estudio microscópico de muestras de WPC'S expuestas a humedad, secado y el ataque de hongos, reveló la presencia de relativamente pocas hifas de los hongos. Esta ausencia del ataque fúngico sugiere que el daño fue causado probablemente por la ruptura de la matriz de madera-plástico por la humedad y el secado. Es decir las pérdidas en las propiedades mecánicas están asociadas principalmente con la humedad y el secado (Morrell *et al.* 2010).

Generalmente, el incremento del tamaño de partículas mejora las propiedades mecánicas de los WPC's. Las propiedades de tensión y flexión aumentan gradualmente con el aumento de tamaño de partícula. Los módulos de elasticidad y resistencia de fuerza máxima de tensión y flexión con partículas grandes se incrementaron más en promedio que en aquellos con partículas más pequeñas (Bouafif *et al.* 2009, Gozdecki *et al.* 2011).

Las propiedades de resistencia de muestras no expuestas a hongos de compuestos plástico-madera demuestran que el módulo de elasticidad (MOE) de los materiales compuestos con respecto al plástico puro aumenta con la incorporación de la madera. Por el contrario, el módulo de ruptura (MOR) de los compuestos plástico-madera tiende a ser la más alta para el plástico puro y disminuye con el incremento de cantidad de madera (Verhey *et al.* 2003).

a. Flexión

La pérdida de las propiedades mecánicas se pueden utilizar para evaluar las muestras de WPC por descomposición, para ello se utilizan ensayos de flexión. Sin embargo la pérdida de peso es un indicador más preciso y confiable que las pruebas de resistencia a la flexión, a excepción cuando se usan altos contenidos de madera (≥ 70 por ciento) (Ibach 2010). Diversos estudios demostraron la pérdidas en las propiedades de flexión después de una exposición controlada de hongos bajo condiciones controladas (Morrell *et al.* 2010).

Lu *et al.* (2005) demostraron que los valores del módulo de almacenamiento a la flexión de los WPC son mayores con bajos porcentajes de partículas de madera y disminuyen gradualmente con el aumento del contenido de partículas de madera.

En el 2003, Stark y Rowlands elaboraron compuestos con polipropileno (60 por ciento) y madera (40 por ciento) de diferentes tamaños de partículas (35; 70; 120 y 235 mesh) y evaluaron sus propiedades mecánicas. Los resultados para la fuerza de resistencia de flexión (MOR) para los tamaños de partícula 35 y 70 mesh fueron de 38,7 y 42,6 MPa respectivamente y el módulo de flexión (MOE) fue de 2,69 y 3,15 GPa respectivamente.

Años más tarde se elaboraron compuestos con madera (50 por ciento), polietileno (44 por ciento) y agente acoplante (6 por ciento) se expusieron a hongos de pudrición por 3 meses. Se obtuvieron valores de resistencia máxima (MOR) y resistencia elástica (MOE) de 26,27 MPa y 1,49 GPa respectivamente expuesto al hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y de 28,1 MPa y 1,35 GPa respectivamente para el hongo de pudrición marrón (*Gloeophyllum trabeum*) (Schirp y Wolcott 2005).

De la misma manera Zabihzadeh *et al.* (2010) elaboraron compuestos con harina de bagazo (68 por ciento), polipropileno (30 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) que los expusieron a hongos de pudrición por un tiempo de 16 semanas. Ellos obtuvieron valores de resistencia máxima (MOR) y resistencia elástica (MOE) de 21,65 MPa y 2,64 GPa respectivamente expuestos a un hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y de 21 Mpa y 2,44 GPa respectivamente y para el hongo de pudrición marrón (*Coniophora puteana*).

En el año 2012, Cárdenas obtuvo valores de flexión en resistencia máxima y resistencia elástica de 38 MPa y 0,9 GPa. Para compuestos elaborados por inyección, con partículas de

pino (50 por ciento) y polipropileno (48 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) sin exposición a hongos de pudrición.

En ese mismo año Kociszewski *et al.* (2012) elaboraron compuestos madera-cloruro de polivinilo con tamaño de partícula cinco; 10; 18; 35 y 60 mesh y evaluaron el efecto del tamaño de partícula en las propiedades mecánicas de dichos compuestos. Los compuestos con tamaño de partícula 60 mesh, reportaron para caso de la fuerza de flexión fueron de 58,5 MPa y para el módulo de flexión de 4,9 GPa.

b. Tensión

En los WPC's las partículas de madera tienden a aumentar la rigidez de los materiales compuestos por lo tanto puede ser utilizados como indicadores de la descomposición por hongos. Por ello es deseable comparar las pérdidas peso y la rigidez en las formulaciones de WPC causadas por hongos de pudrición para determinar cuál de los dos métodos es un indicador más confiable para la descomposición por hongos (Schirp *et al.* 2008).

Lu *et al.* (2005) demostraron que los valores de la resistencia a la tensión de los WPC se incrementan ligeramente con bajos porcentajes de partículas de madera (15 y 35 por ciento) y disminuyen con el aumento del contenido de partículas de madera.

En el 2003, Stark y Rowlands elaboraron compuestos con polipropileno (60 por ciento) y madera (40 por ciento) con diferente tamaño de partícula (35; 70; 120 y 235 mesh)) de los cuales evaluaron las propiedades mecánicas. En el caso de la fuerza de resistencia de tensión para los tamaños de partícula 35 y 70 mesh los resultados fueron de 21,7 y 25,5 MPa respectivamente.

Años más tarde en el 2012, Cárdenas obtuvo valores de tensión en resistencia máxima (MOR) de 21 MPa para compuestos elaborados por inyección con partículas de pino (50 por ciento), polipropileno (48 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) sin exposición a hongos de pudrición.

En ese mismo año Kociszewski *et al.* (2012) elaboraron compuestos madera-cloruro de polivinilo con tamaño de partícula cinco; 10; 18, 35 y 60 mesh y evaluaron el efecto del tamaño de partícula en las propiedades mecánicas de dichos compuestos. Los resultados de la fuerza de tensión (MOR) para los compuestos con tamaño de partícula 60 mesh fueron de 35,2 MPa.

c. Impacto

En los WPC's la fuerza de impacto o la energía de ruptura, disminuyen con el aumento del tamaño de partícula. Debido a que las grietas viajan alrededor de las partículas de madera, la superficie de fractura aumenta con el aumento de tamaño de las partículas. Como resultado, se requiere menos energía para fracturar una muestra que contiene partículas más grandes. Asimismo el efecto es más pronunciado a medida que se aumenta la concentración de partículas (Bouafif *et al.* 2009).

En el 2003, Stark y Rowlands elaboraron compuestos con polipropileno (60 por ciento) y madera (40 por ciento) con diferentes tamaños de partícula para la evaluación de las propiedades mecánicas. Los resultados para el impacto o energía de ruptura para los tamaños de partícula 35 y 70 mesh fueron de 22,3 y 19,7 J/m respectivamente.

Años más tarde Zabihzadeh *et al.* (2010) elaboraron compuestos con harina de bagazo (68 por ciento), polipropileno (30 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento), que fueron expuestos a hongos de pudrición con un tiempo de exposición de 16 semanas y después se determinaron sus propiedades mecánicas. Se obtuvieron valores de impacto de 9,98 J/m² para los compuestos expuestos al hongo de pudrición blanca (*Trametes versicolor*) y de 10,18 J/m² para el hongo de pudrición marrón (*Coniophora puteana*).

En el 2012, Cárdenas elaboró compuestos por inyección con partículas de pino (50 por ciento), polipropileno (48 por ciento) y agente acoplante (2 por ciento) sin exposición a hongos de pudrición y obtuvo valores de impacto de 6,67 J/m².

En ese mismo año Kociszewski *et al.* (2012) elaboraron compuestos madera-cloruro de polivinilo con tamaños de partícula cinco; 10; 18; 35 y 60 mesh y evaluaron el efecto del tamaño de partícula en las propiedades mecánicas de dichos compuestos. Los resultados de la fuerza de impacto para los compuestos con tamaño de partícula 60 mesh fue de 10,6 J/m².

3.4. DETERIORO O DEGRADACIÓN BIOLÓGICA DE LOS COMPUESTOS PLÁSTICO-MADERA

La degradación es definida como algún efecto negativo en las propiedades de un material (Morrell *et al.* 2010). La mayoría de los materiales lignocelulósicos al ser de naturaleza orgánica, tienen muy poca resistencia a la degradación por agentes biológicos (Peraza 2002 y Botero 2004). Así dichos materiales al estar compuestos por celulosa y lignina, se

degradan y constituyen la base de alimentación de organismos vivos como hongos, insectos, crustáceos y aves (Peraza 2002).

El bambú tiene muy poca resistencia a la degradación por agentes biológicos y es fuente de alimento de una gran variedad de organismos, especialmente hongos e insectos, debido principalmente a la ausencia de un constituyente tóxico y a su abundancia de almidón (Botero 2004). De la misma manera, los WPC's son atacados por agentes biológicos como hongos, insectos y barrenadores de mar (Morrell *et al.* 2010).

La durabilidad natural, es la capacidad que presentan los materiales ligno-celulósicos de resistir en mayor o menor grado el ataque de agentes de destrucción en condiciones naturales de uso. El grado de durabilidad depende de varios factores, es decir puede variar en función del contenido de constituyentes tóxicos presentes en dichos materiales o de las condiciones de utilización (Vaca de Fuentes 1998).

3.4.1. HONGOS DE PUDRICIÓN

Los hongos son organismos saprofitos o parásitos, en general se desarrollan en las cavidades celulares de los materiales ligno-celulósicos. Su clasificación consta de tres grupos: los hongos xilófagos, los hongos cromógenos y los mohos (Hunt y Garrat 1962).

Los hongos xilófagos son los responsables de la pudrición de los materiales ligno-celulósicos, ya que modifican notablemente sus propiedades físicas, químicas y mecánicas (Zanni 2004). Se reconocen dos tipos de hongos de pudrición. Primero los hongos de pudrición blanca que atacan preferentemente la lignina, dejando un residuo blanquecino de celulosa donde se conserva la estructura fibrosa pero se pierde la consistencia volviéndose el material ligno-celulósico blando y rompiéndose fácilmente. Segundo, los hongos de pudrición marrón que atacan principalmente la celulosa y dejan como residuo solo lignina y pequeñas cantidades de hidratos de carbono de color parduzco y pueden desmenuzarse fácilmente en polvo (Hunt y Garrat 1962, Saccarello 2010). Así ambos tipos de hongos de pudrición, producen progresivamente cambios en las propiedades de los componentes del bambú, como en los carbohidratos y la lignina (Hidalgo 2003).

3.4.2. PRUEBAS DE DEGRADACION UTILIZANDO HONGOS DE PUDRICION.

Con diversos ensayos tanto en laboratorio como en campo se determinó que el ataque biológico de los materiales compuestos madera-plástico, es causado principalmente por los

hongos de pudrición blanca y marrón. Siendo las partículas de madera las más susceptibles al ataque de estos hongos, que causan en muchos casos pérdidas de peso. Las pruebas de degradación en laboratorio son útiles para predecir la durabilidad a largo plazo de los compuestos plástico-madera (Ibach 2010).

A pesar de que existen pruebas estándares de laboratorios para la determinación de la degradación por hongos en la madera, no existen ensayos para la degradación por hongos en los WPC's (Schirp *et al.* 2008). Sin embargo, en diversos países del mundo, se utilizan dichas pruebas de laboratorio de la resistencia de la madera a la degradación por hongos. Así en Estados Unidos se utiliza la prueba estándar Bloque-Suelo basada en la norma ASTM D2017-05, en Europa la prueba estándar Bloque-Agar malta basada en la norma EN 113 y en Japón la prueba estándar Bloque-Suelo basada en la norma JIS K 1571-2004 (Schirp *et al.* 2008 ,y Kartal *et al.* 2013).

Comparando las pruebas de laboratorio Bloque-Agar y Bloque-Suelo para la determinación de la degradación por hongos de pudrición, se conoce que el método del cultivo de Bloque-Agar malta en placas Petri tiene las ventajas por su gran sencillez, rapidez y comodidad. En cambio, la prueba de Bloque-suelo es más costosa y duradera pero es más eficaz y confiable para la determinación de la pérdida de peso (Hunt y Garrat 1962).

3.4.3. FACTORES DE DETERIORO DE LOS COMPUESTOS PLÁSTICO-MADERA

Los principales factores que influyen en el deterioro de los compuestos plástico-madera por los hongos de pudrición que causan la pérdida de peso son la proporción de los componentes, tamaño de partícula y las condiciones ambientales. Los cuales se detallan a continuación:

a. Proporción de los componentes

En los WPC's los polímeros y las fibras tienen sus propios mecanismos de degradación por separado, es decir las diferentes proporciones de madera y plástico podrían tener diferente grado de degradación (H'ng *et al.* 2011). De la misma manera Verhey y Laks (2002) mencionaron que no se encontraron resultados de pérdida de peso del plástico puro después de la exposición a un hongo de pudrición, por tanto suponen que la pérdida de peso en los WPC's es debido solo a la degradación del componente madera. Por otro lado Schirp *et al.* (2008) demostraron con estudios microscópicos que la presencia de hifas de hongos fue predominante entre los vacíos madera-plástico.

Verhey *et al.* (2001) y Pedleton *et al.* (2002) determinaron que en los WPC's, el incremento en el contenido de madera aumenta las pérdidas de peso durante las pruebas de bloque suelo, por tanto, los compuestos que contienen mayor porcentaje de madera son más susceptibles al ataque de hongos y tienen mayores pérdidas de peso.

Las propiedades de los compuestos plástico-madera dependen de la proporción de madera empleada en la composición (Mankowski y Morrell 2000, Rowell 2006 y Schirp *et al.* 2008). Es decir, a un mayor incremento del contenido de partículas, se incrementa la pérdida peso en las muestras de resistencia a la degradación. Se cumpliría que a más madera en el material compuesto, mayor es el potencial para la degradación fúngica (Kartal *et al.* 2013).

La formulación de la mezcla es importante en la determinación de la degradación por hongos en los compuestos bambú-plástico (Kartal *et al.* 2013). En diversos estudios se encontraron resultados de mayores pérdidas de peso en muestras de compuestos con mayor contenido de partícula (70 por ciento) en cambio con menores contenidos (50 por ciento) no tuvieron significativa pérdida de peso (Mankowski y Morrell 2000, Schirp y Wolcott 2005, Schirp *et al.* 2008 y Kartal *et al.* 2013). De esta manera la durabilidad de los compuestos plástico-madera se pueden mejorar al reducir la cantidad de madera en su formulación. Es decir los compuestos plástico-madera pueden ser diseñados para proporcionar alta durabilidad contra los hongos, haciendo cambios en la composición de los materiales en su formulación. (Schirp *et al.* 2008).

En la Tabla 1 se muestran investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos elaborados con diferentes proporciones de fibra lignocelulósica y sus respectivos resultados de pérdida de peso.

H'ng *et al.* (2011), según los resultados mostrados en la Tabla 1, para compuestos pino/polietileno que expusieron a dos hongos de pudrición y basándose en la norma ASTM D 2017 clasificaron los compuestos como altamente resistente. Además mencionaron que visualizaron la colonización del hongo en la superficie de los compuestos sin embargo mostraron bajos porcentajes de pérdida de peso. Concluyen que a mayores porcentajes de madera los porcentajes de pérdida de peso en los WPC's serán mayores.

Tabla 1: Investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos a base de fibra ligno-celulósica y sus respectivos resultados de pérdida de peso

Autores (Fuente)	Norma	Tiempo de exposición	Tipo de hongos	Proporción (madera/polipropileno)	Tamaño de partícula	Pérdida de peso (%)	Observaciones
Mankowski y Morrell (2000)	ASTM D 2017.	12 semanas	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	50/50	40 mesh	3,1	- Conclusión: proporción 50/50 fue levemente atacada en cambio la proporción 30/70 fue más susceptible al ataque de los hongos de pudrición.
				70/30		20,4	
			<i>Rhodonia placenta</i>	50/50		1,3	
				70/30		15,8	
			<i>Trametes versicolor</i>	50/50		2,1	
				70/30		5,9	
			<i>Xylobolus frustulatus</i>	50/50		1,2	
				70/30		4,4	
Pedleton et al. (2002)	ASTM D 2017.	12 semanas	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	50/50	40 mesh	0,23	- Conclusión: altos porcentajes de madera incrementan la pérdida de peso en los ensayos de degradación acelerada de los WPC.
				70/30		4,9	
			<i>Rhodonia placenta</i>	50/50		0,58	
				70/30		8,47	
			<i>Trametes versicolor</i>	50/50		0,46	
				70/30		4,24	
Zabihzadeh et al. (2010)		16 semanas	<i>Trametes versicolor</i> <i>Coniophora puteana</i>	70/30 (bagazo/polipropileno)	-	9	-
						10	
Hosseinihashemi et al. (2011)	ASTM D 1413-99 (2002)	16 semanas	<i>Trametes versicolor</i> <i>Coniophora puteana</i>	40/60 (bagazo/polipropileno)	-	7,15	-
H'ng et al. (2011)	ASTM D 2017	8 semanas	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	60/40	40 mesh	0,91	- Conclusión: Según la norma utilizada clasificaron los compuestos como altamente resistente.
				65/35		1,18	
				70/30		2,33	

FUENTE: elaboración propia.

b. Tamaño de partículas

Verhey y Laks (2002) determinaron en compuestos (WPC) expuestos a hongos de pudrición que los incrementos en las pérdidas de peso, se incrementan con el tamaño de partícula. Es decir que los menores tamaños de las partículas presentaron menores pérdidas de peso. Explican que este efecto es probablemente debido a la encapsulación más efectiva de las partículas pequeñas de madera y a una distribución más uniforme de estas en la matriz polimérica.

Kartal *et al.*(2013) afirman que el tamaño de partículas tienen un efecto variado en la pérdida de peso. Descubrieron que en muestras con menor tamaño de partícula las pérdidas de peso fueron generalmente más altas que con los de tamaño de partícula más grande aunque obtuvieron algunas excepciones.

La durabilidad de los compuestos plástico-madera se puede lograr reduciendo el tamaño de las partículas de madera o mediante el uso de partículas modificadas las cuales sean más compatibles con la matriz del plástico (Schirp *et al.* 2008 y Westin *et al.* 2008).

En la Tabla 2 se muestran investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos a base de fibra ligno-celulósica con diferentes proporciones y tamaños de partículas del mismo y sus respectivos resultados de pérdida de peso.

Tabla 2: Investigaciones realizadas por diversos autores de la biodegradación de compuestos a base de fibra ligno-celulósica y sus respectivos resultados de pérdida de peso

Autores (Fuente)	Norma	Tiempo de exposición	Tipo de hongos	Proporción (madera/polipropileno)	Tamaño de partícula (mesh)	Pérdida de peso (%)	Observaciones
Schirp y Wolcott (2005)	ASTM D 2017.	12 semanas	<i>Gloeophyllum trabeum</i>	50/50	40	1,17	- Conclusión: según la norma utilizada los compuestos no son susceptibles a la degradación por hongos de pudrición.
			<i>Trametes versicolor</i>			1,41	
Kartal <i>et al.</i> (2013)	JIS K 1571 (2004).	12 semanas	<i>Schizophyllum commune</i>	50/50	30	1,55	- Conclusión: Los altos contenidos de partículas y pequeños tamaños de partículas obtuvieron altas pérdidas de peso para ambos tipos de hongos de pudrición.
					60	1,71	
				70/30	30	2,64	
					60	4,7	
				50/50 (bambú /plástico)	40	2,89	
						70/30 (bambú /plástico)	
			<i>Pycnoporus coccineus</i>	50/50	30	1,31	
					60	1,85	
				70/30	30	2,07	
					60	2,87	
				50/50 (bambú /plástico)	40	3,21	
						70/30 (bambú /plástico)	
			<i>Tyromyces palustri</i>	50/50	30	4,19	
					60	4,21	
70/30	30	6,47					
	60	6,52					
50/50 (bambú /plástico)	40	5,17					
		70/30 (bambú /plástico)		8,03			
							- Conclusión: Se mostraron mayores pérdidas de peso en los compuestos elaborados con bambú que con los de madera.

FUENTE: elaboración propia.

c. Condiciones ambientales

Según Ibach (2010), los hongos de pudrición para su desarrollo y crecimiento tienen cuatro requerimientos básicos: alimento (por ejemplo madera, el cual contiene hemicelulosa, celulosa y lignina), temperatura apropiada (10 a 35 °C, con un óptimo de 24 a 32 °C), oxígeno (del aire) y humedad (debajo del punto de saturación de las fibras, cerca del 30 por ciento del contenido de humedad).

c.1. Humedad

Los hongos de pudrición para desarrollarse requieren un contenido de humedad superior al punto de saturación de las fibras (Hidalgo 2003). En el bambú dichos requerimientos de los hongos para vivir son suficiente contenido de humedad y oxígeno para su respiración (Liese 2004).

La pérdida de peso se puede utilizar como un indicador de deterioro sólo cuando las muestras han sido acondicionadas al contenido de humedad de equilibrio en las mismas condiciones de humedad relativa y de temperatura antes de cada medición (Verhey *et al.* 2003).

La disponibilidad de humedad es un requisito previo para la desintegración biológica de un material (Gnatowski 2005). La evaporación del agua en los WPC's es muy lenta debido a que el plástico inhibe el movimiento de la humedad, proporcionando de este modo una oportunidad para que se produzca la biodegradación (Schirp *et al.* 2008). Justamente los resultados de investigaciones en laboratorio y en campo indicarían que los WPC's absorben humedad hasta el punto que pueden ser degradados por hongos (Ibach 2010).

Se sabe los métodos de procesamiento de los compuestos plástico-madera influyen en la absorción de humedad, lo que los hace más o menos susceptibles a la degradación. Los compuestos extruidos absorben la mayor cantidad de humedad, los moldeados por compresión absorben menos, y los moldeados por inyección absorben mucho menos humedad lo que los haría más resistente al ataque de hongos. Así en el proceso de inyección se utilizan presiones más altas, lo que resulta en el colapso de los haces de fibras de madera, lo que hace que un material compuesto tenga densidad más alta en comparación con los fabricados por extrusión y el moldeo de compresión (Ibach 2010). Aunque cabe resaltar que estos efectos significativos de los métodos de procesamiento se pasan por alto en las pruebas de resistencia a los hongos de laboratorio de WPC (Clemons e Ibach 2004).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

1. LUGAR DE MUESTREO DE *Guadua angustifolia*

La recolección de las muestras de culmos de bambú (*Guadua angustifolia*) se realizó en el Centro poblado “El Limoncito” que se encuentra ubicado en el distrito de La Florida, en la provincia de San Miguel en el departamento de Cajamarca. Está a una altitud de 1200 m.s.n.m. y ocupa un área de 61,33 km². Limita al sur con el distrito de Niepos, al norte con el distrito de Catache, al este con el distrito de Calquis y al oeste con el distrito de Oyotun.

2. LUGAR DE ESTUDIO

El presente trabajo de investigación se llevó a cabo en las instalaciones del Laboratorio de Productos de Transformación Química de la Madera, Laboratorio de Preservado de la Madera y el Laboratorio de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera, pertenecientes al Departamento Académico de Industrias Forestales de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Nacional Agraria la Molina.

El proceso de extrusión del material compuesto bambú-plástico se realizó en las instalaciones del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) y el ensayo de impacto en el laboratorio de propiedades de la empresa Fibraforte en Lima.

3. MATERIA PRIMA DE LOS COMPUESTOS BAMBÚ-PLÁSTICO

- Parte apical de los culmos de *Guadua angustifolia*.
- Polipropileno homopolímero, con un índice de fluidez de 2,16kg/230°C: 12g/10 min.
- Agente acoplante (Anhídrido maléico de polipropileno - MAPP), con temperatura de fusión 167 °C.

4. HONGOS XILÓFAGOS

Se utilizaron cultivos aislados de los hongos *Pycnoporus sanguineus* de pudrición blanca y *Rhodonía placenta* de pudrición marrón ambos pertenecientes al laboratorio de Preservación de la Madera de la Universidad Nacional Agraria La Molina.

5. MATERIALES Y EQUIPOS

- Wincha de 10 m.
- Sierra de arco.
- Tamices ASTM con número (abertura de malla): 40 mesh (0,43 mm), 60 mesh (0,25 mm) y 80 mesh (0,18 mm) con fondo y tapa.
- Guantes reflectantes.
- Emulsión de silicona al 35 por ciento.
- Agua destilada
- Marco de acero de 21*21*0.25 cm (2 unidades) y de 12*12*0.9 cm (1 unidades).
- Láminas metálicas de 33*33*0.25 cm (4 unidades).
- Agar extracto de malta.
- Placas Petri de vidrio y descartables.
- Madera blanda para tiras de alimentación.
- Frascos de vidrio 100 ml, 315 ml y 580 ml
- Taper de plástico de 2 kg.
- Balde de plástico de 20 l.
- Vernier digital Mitutoyo de precisión 0.02 mm
- Balanza electrónica de cocina marca CAMRY de 5 kg de capacidad con 1g precisión
- Balanza analítica marca HENKEL de 250 g de capacidad de 0,1 mg de precisión

- Molino industrial de cuchillas de 1750 RPM.
- Molino de cuchillas de 2830 RPM.
- Zaranda vibratoria de 1700 RPM.
- Horno de secado artificial para madera.
- Estufa.
- Incubadora.
- Extrusora de husillo simple de 55W.
- Prensa hidráulica de Vulcanizado de caucho.
- Esterilizador de vapor de presión portátil.
- Prensa universal “Tinius Olsen” de 60000 lb de capacidad con accesorios

6. METODOLOGÍA

La metodología del presente trabajo de investigación se realizó principalmente en cuatro etapas: primero la recolección y el proceso de obtención de las partículas de bambú; segundo el proceso de extrusión, la fabricación de los tableros y obtención de las probetas del compuesto bambú-plástico; tercero el ensayo de biodegradación y la evaluación de las propiedades físico-mecánicas y cuarto la realización de las pruebas estadísticas. Las cuales se detallan a continuación:

- **Primera etapa:** Recolección y proceso de obtención de partículas de bambú

En el centro poblado “El Limoncito”, en La Florida, Cajamarca, se recolectaron las partes apicales de culmos de bambú de la especie *Guadua angustifolia* Kunth y se trasladaron a Lima. Después los culmos se acondicionaron (cortado longitudinal o latillado), molieron, tamizaron y se obtuvieron tamaños de partículas 40; 60 y 80 mesh (Fig. 7).

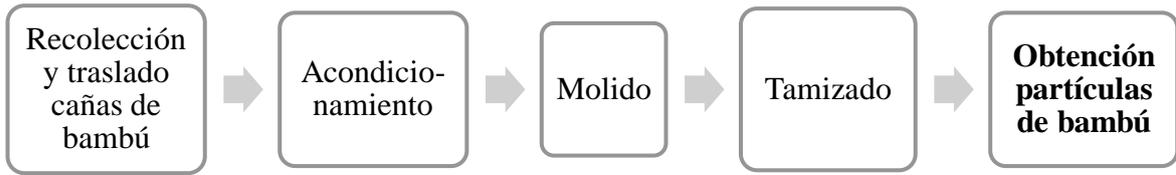


Figura 7: **Diagrama flujo de la primera etapa de la metodología**

FUENTE: elaboración propia.

- **Segunda etapa:** Proceso de extrusión, fabricación de los tableros y obtención de las probetas bambú-plástico

Se realizó el mezclado manual de las partículas de bambú (50 y 30 por ciento), el polipropileno (48, 68 por ciento) y el agente acoplante (2 por ciento). Luego las formulaciones pasaron por una máquina extrusora de husillo simple y se mezclaron con temperaturas entre 175°C a 185 °C y una velocidad del husillo de 30 rpm donde se obtuvieron los pellets del compuesto bambú-plástico. Después se fabricaron los tableros mediante el proceso moldeo por compresión en una prensa hidráulica con temperaturas en los platos de 199 °C (superior) y 177 °C (inferior), con velocidad de 0,9 cm/s y una presión máxima de moldeo de 4 MPa. Por último se cortaron los tableros con una máquina láser con dimensiones y tamaños de acuerdo a las normas utilizadas según los ensayos realizados (Fig. 8).

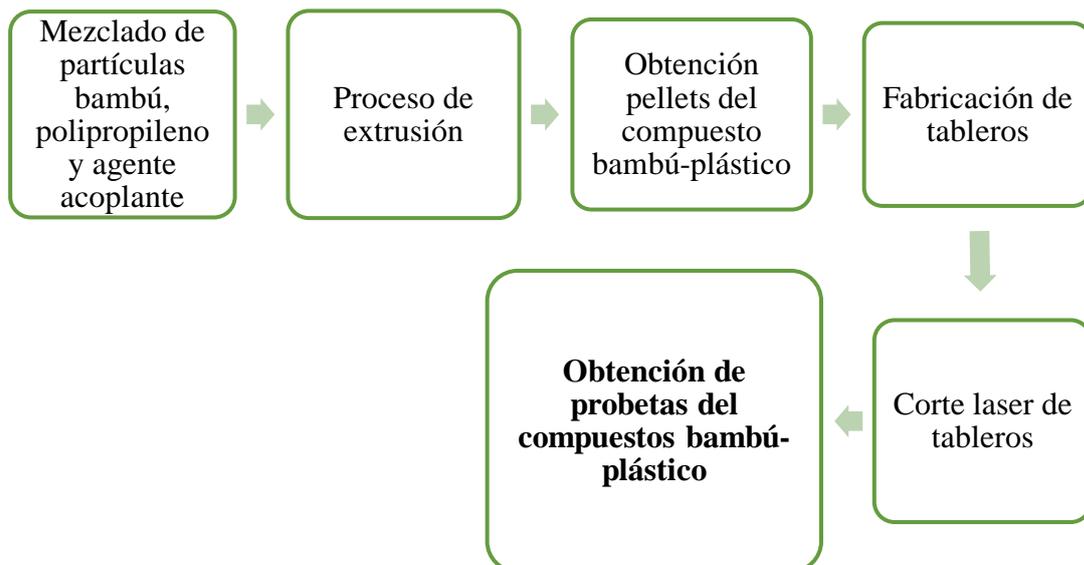


Figura 8: **Diagrama flujo de la segunda etapa de la metodología.**

FUENTE: elaboración propia.

- **Tercera etapa:** ensayo de biodegradación y evaluación de las propiedades físico-mecánicas

Las probetas del compuesto bambú-plástico fueron expuestas a hongos de pudrición mediante el ensayo de degradación biológica acorde a la norma ASTM D2017-05. Finalizado dicho ensayo se realizó la evaluación de la pérdida de peso y la evaluación de los ensayos de las propiedades físico-mecánicas. En las propiedades físicas se realizaron los ensayos de: densidad acorde a la norma ASTM D1037-99 y de absorción e hinchamiento acorde a la norma ASTM D570-98 (2010). En las propiedades mecánicas se realizaron los ensayos: de flexión según la norma ASTM D 790-03, impacto según la norma ASTM D 5420-04 y tensión según la norma ASTM D638-03 (Fig. 9).

- **Cuarta etapa:** evaluación de las pruebas estadísticas

Para procesar los datos obtenidos se utilizó el programa SAS. Las pruebas estadísticas realizadas fueron el análisis de varianza (ANVA) y la prueba de Tukey para la comparación múltiple de medias. El modelo estadístico utilizado fue el diseño por bloques completamente al azar con arreglo factorial $2 \times 2 \times 2$ (bloques, tamaño de partícula, proporción bambú/plástico), con 7 repeticiones para los ensayos de degradación biológica, densidad, absorción, hinchamiento, flexión, impacto y tensión (Fig. 9).

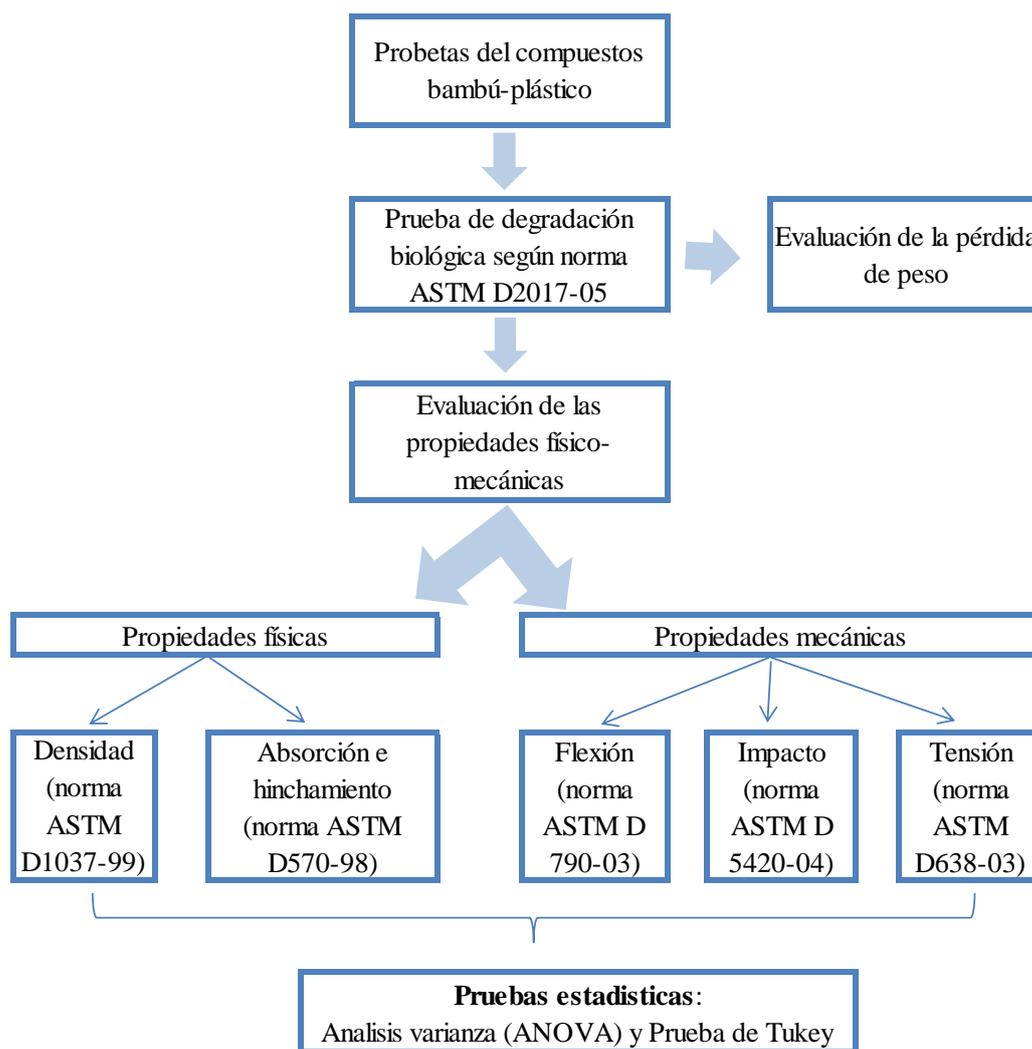


Figura 9: **Diagrama flujo de la tercera y cuarta etapa de la metodología.**

FUENTE: elaboración propia.

6.1. PROCEDIMIENTO

6.1.1. RECOLECCIÓN Y TRASLADO DE LAS CAÑAS DE BAMBÚ

Se realizó el reconocimiento de la plantación y se tomaron puntos GPS; *0709843 *9239792 y 1260 msnm. (Fig. 10). Luego se recolectaron los culmos maduros de *Guadua angustifolia* y se cortó la parte apical que es la porción que queda como residuo en la cosecha (Fig. 11). Después estos fueron trasladados a Lima y almacenados en un lugar seco y aireado del laboratorio de Productos de Transformación Química de la Madera de la Universidad Nacional Agraria La Molina (Fig. 12).



Figura 10: **Reconocimiento de la plantación y toma de puntos GPS.**

FUENTE: elaboración propia.



Figura 11: **Recolección y corte de la parte apical del culmo.**

FUENTE: elaboración propia.



Figura 12: **Traslado de los culmos de bambú a Lima.**

FUENTE: elaboración propia.

6.1.2. ACONDICIONAMIENTO DEL BAMBÚ

Los ápices de los culmos se cortaron longitudinalmente con un machete en porciones más pequeñas (latillas) y se sacó el parénquima ubicado en el interior de las cañas. Después las

latillas se secaron artificialmente en un horno de secado hasta alcanzar un contenido de humedad de 6,38 por ciento (Fig. 13).



Figura 13: **Acondicionamiento y secado de los culmos de bambú.**

FUENTE: elaboración propia.

6.1.3. OBTENCIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE BAMBÚ

Para la obtención de partículas más finas se realizaron dos molidos de las latillas secas. El primer molido se realizó en un molino industrial de cuchillas y el segundo en un molino pequeño de cuchillas (Fig. 14). Luego se clasificaron las partículas en un equipo clasificador de zarandas vibratorias (tamizadora) utilizando mallas ASTM N° 40 mesh (0,43 mm), 60 mesh (0,25 mm) y 80 mesh (0,18 mm). Después se almacenaron en bolsas de polietileno codificadas.



Figura 14: **Proceso de molienda de los culmos de bambú**

FUENTE: elaboración propia

6.1.4. MEZCLADO Y PROCESO DE EXTRUSIÓN

Se realizó el pesado y mezclado manual de las partículas de bambú, polipropileno y agente acoplante (MAPP). En los tratamientos se consideró dos tipos de hongos de pudrición (*Pycnoporus sanguineus* y *Rhodonía placenta*), dos tamaños de partícula (-40/+60 y -60/+80) y dos proporciones (50/50 y 30/70) y se obtuvo 8 tratamientos según se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: **Número de tratamiento según tipo de hongo, tamaño de partícula de bambú y proporción bambú/plástico**

N° de Tratamiento	Tipo de Hongo de pudrición	Tamaño de partícula (mesh)	Bambú (%)	Polipropileno (%)	Agente acoplante (%)
F1	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50	48	2
F2		-40/+60	30	68	2
F3		-60/+80	50	48	2
F4		-60/+80	30	68	2
F5	<i>Rhodonía placenta</i>	-40/+60	50	48	2
F6		-40/+60	30	68	2
F7		-60/+80	50	48	2
F8		-60/+80	30	68	2

FUENTE: elaboración propia

Las mezclas fueron trasladadas al Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), donde se elaboraron los hilos del compuesto bambú-plástico (mezcla extruida) por el método de

extrusión. Los tres componentes previamente mezclados se introdujeron en una máquina extrusora de husillo simple, donde se fusionaron con temperaturas entre 175°C a 185 °C en la zona de calentamiento de su cilindro y con una velocidad del husillo de 30 rpm, como se observa en la Figura 15. Posteriormente, en el Laboratorio de Transformación Química de la Madera de la UNALM, los hilos del compuesto plástico-bambú pasaron por un molino de cuchillas para obtener pellets del compuesto bambú-plástico. Luego estos se almacenaron en bolsas de polietileno para su posterior prensado.



Figura 15: **Proceso de extrusión (IPEN, Julio 2015).**

FUENTE: elaboración propia.

6.1.5. FABRICACIÓN DE LOS TABLEROS DEL COMPUESTO BAMBÚ-PLÁSTICO

El método de fabricación de los tableros del compuesto bambú-plástico fue por moldeo por compresión en una prensa hidráulica (Fig. 16). Los platos de compresión de la prensa hidráulica utilizaron temperaturas de 199°C en el plato superior y 177 °C en el plato inferior y una presión máxima de moldeo de 4 MPa (4,07 kg/cm²). Se elaboraron en total 64 tableros (8 por cada tratamiento) con dimensiones de 21 x 21 x 0.25 cm.



Figura 16: **Prensa hidráulica.**

FUENTE: elaboración propia.

En el proceso de fabricación, se pesaron 100 g de pellets (mezcla extruida) y se secó en estufa. Después se calentaron las láminas y marcos de acero en los platos de compresión de la prensa hidráulica. Estos ya calientes se retiraron y se rociaron con silicona líquida en la superficie de contacto con la mezcla, de esta manera se evitó que los tableros queden pegados en las láminas. En una de las láminas se puso el marco en el centro, luego dentro de este se esparcieron los pellets secos con una espátula, se tapó con la otra lámina y se colocó en la prensa hidráulica para el curado durante 4 minutos (Fig. 17.1 y 17.2).

Culminado el tiempo de curado, se retiraron las placas y se enfriaron con cartones humedecidos. Luego se colocó un peso encima por unos minutos para evitar deformaciones y se procedió a desmoldar el tablero. Después se secó con papel toalla y se guardó en bolsas de polietileno para su posterior corte (Fig. 17.3, 17.4 y 17.5).

Adicionalmente se elaboraron 4 tableros con dimensiones 12x12x0.9 cm para el ensayo de degradación, en este caso las temperaturas de los platos de compresión fueron de 185°C en el plato superior y 177 °C en el plato inferior, se utilizó 75 g de la mezcla extruida y el tiempo de curado fue de 25 minutos (Fig. 17.6).

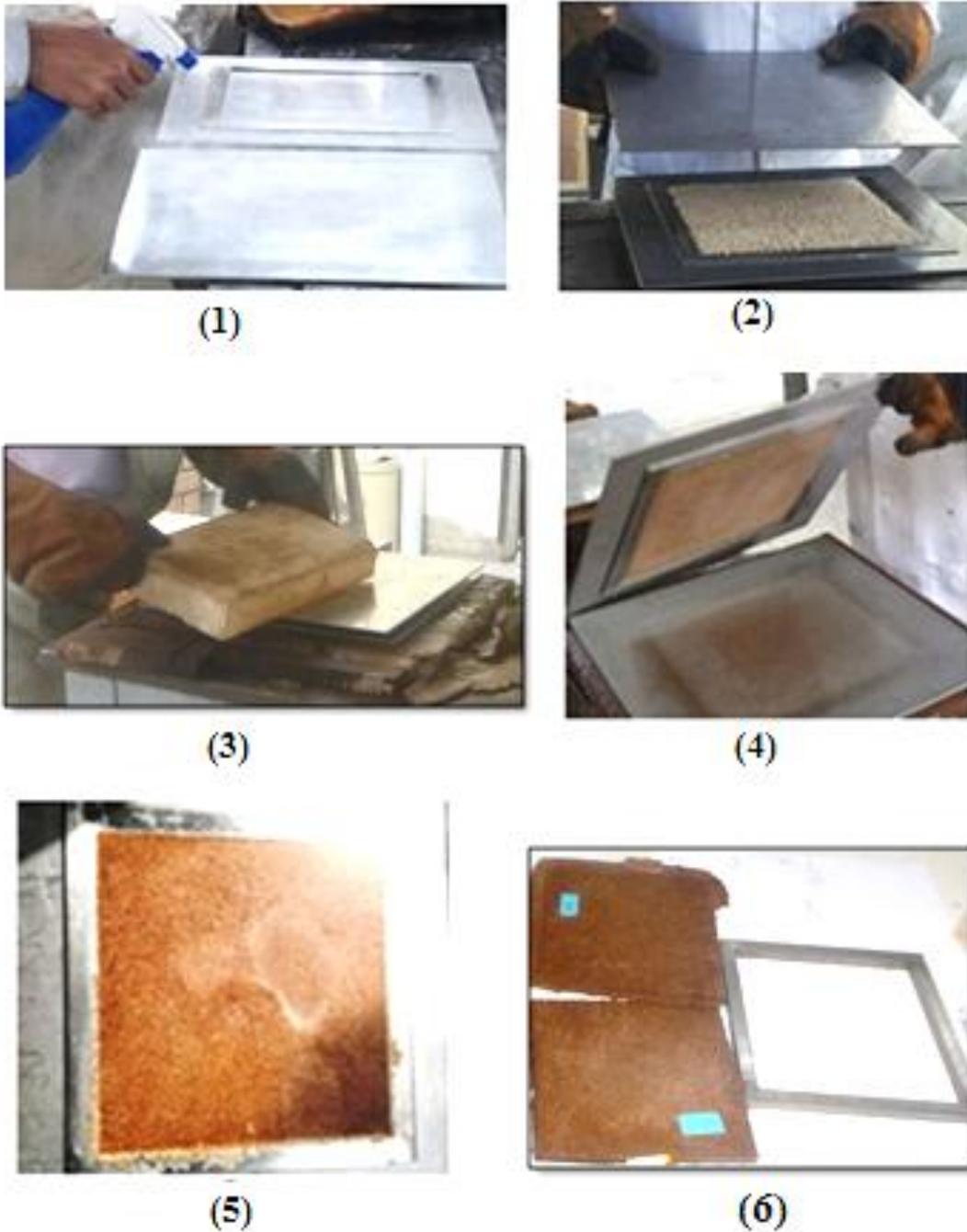


Figura 17: **Proceso de fabricación de los tableros de los compuestos bambú-plástico.**

FUENTE: elaboración propia.

Donde:

(17. 1) Esparcimiento de la silicona.

(17. 2) Pellets del compuesto en el marco de acero.

(17. 3) Enfriamiento de las placas de acero.

(17. 4) Desmoldado del tablero.

(17. 5) Tablero de 0.25 mm de espesor.

(17. 6) Tablero de 0.9 mm de espesor.

6.1.6. DIMENSIONES Y NÚMERO DE PROBETAS

Los tableros fueron cortados mediante una maquina cortadora láser que utilizó una velocidad de 0,78 mm/min y una potencia de 45 W. Las dimensiones, tamaños y el número de probetas de los compuestos bambú-plástico para la evaluación de la degradación biológica y la evaluación de las propiedades físicas y mecánicas se realizaron acorde las especificaciones mencionadas en las normas utilizadas según se detallan en la Tabla 4. Las formas de las probetas se realizaron acorde a las normas para cada prueba de ensayo y se pueden visualizar en la Figura 18.

Tabla 4: Tamaño de las probetas según el tipo de ensayo y normas utilizadas

<i>Tipo de ensayo</i>		<i>Norma</i>	<i>Tamaño (mm)</i>			<i>Repeticiones</i>	<i>Total probetas</i>
			<i>e</i>	<i>l</i>	<i>a</i>		
Degradación biológica		ASTM D2017-05	9	25	25	7	56
Físico	Densidad, absorción e hinchamiento	ASTM D570-98	2.5	76.2	25	7	56
Mecánico	Flexión	ASTM D790-03	2.5	50	13	7	56
	Impacto	ASTM D5420-04	2.5	120	65	20	160
	Tensión	ASTM D638-03	2.5	63.5	3.2	7	56

FUENTE: elaboración propia.

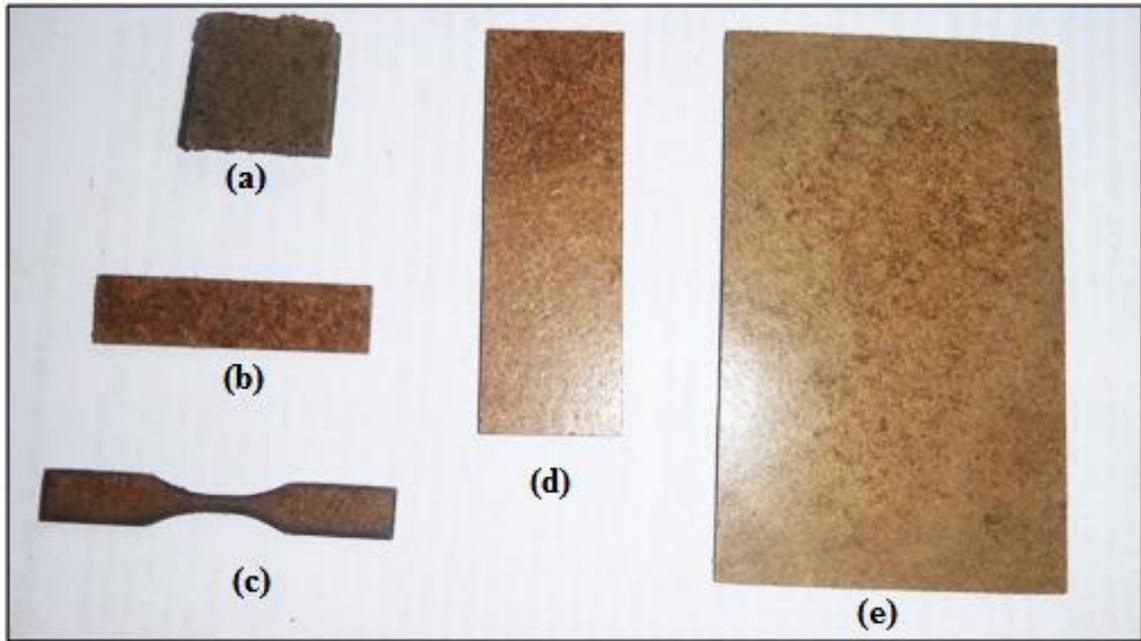


Figura 18: **Forma de las probetas de ensayo.**

FUENTE: elaboración propia.

Donde:

- (18. a) Degradación biológica.
- (18. b) Propiedad mecánica de flexión.
- (18. c) Propiedad mecánica de tensión.
- (18. d) Propiedades físicas.
- (18. e) Propiedad mecánica de impacto.

Los tres grupos de probetas bambú-plástico: degradación biológica, propiedades físicas y propiedades mecánicas según se especifica en la Tabla 4, fueron expuestos a los hongos de pudrición en forma simultánea según la norma ASTM D2017-05. Posteriormente a la exposición a los hongos de pudrición, se evaluó las variables pérdida de peso y las propiedades físico-mecánicas de las probetas.

6.1.7. ENSAYO DE LA DEGRADACIÓN BIOLÓGICA

El ensayo de la degradación biológica se llevó a cabo en el Laboratorio de Preservado de la Madera. Este ensayo se realizó acorde con la norma ASTM D2017-05. El procedimiento que se utilizó se muestra en el diagrama de flujo de la Figura 19 y se detalla a continuación:

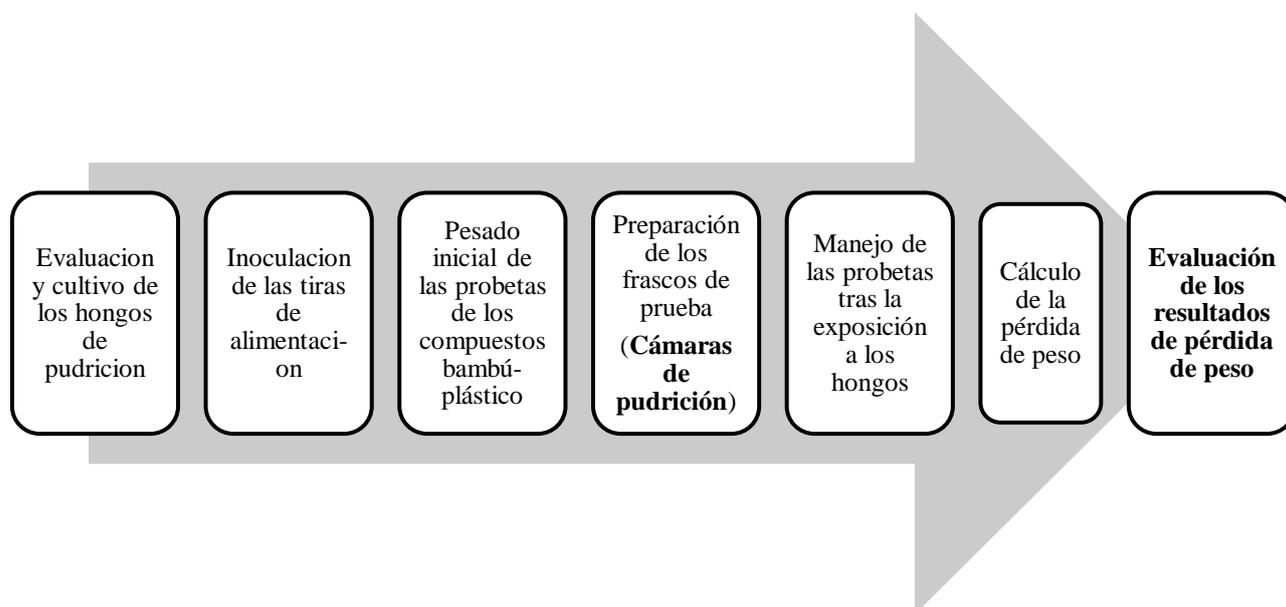


Figura 19: Diagrama de flujo del ensayo de degradación biológica.

FUENTE: Norma ASTM D2017-05.

a. Evaluación y cultivo de los hongos de pudrición

Se evaluó la viabilidad biológica de los hongos de pudrición disponibles en el laboratorio y se eligieron los hongos *Pycnoporus sanguineus* de pudrición blanca y *Rhodonía placenta* de pudrición marrón. Se cultivaron en placas Petri con medio de cultivo extracto de malta agar y se esperó tres semanas aproximadamente hasta que los hongos cubrieron completamente las placas (Fig. 20).

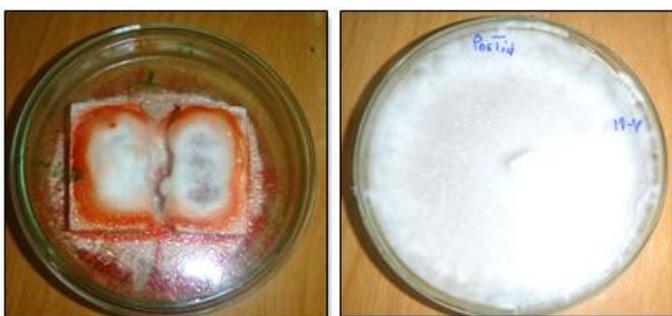


Figura 20: Hongos de pudrición: (a) *Pycnoporus sanguineus* y (b) *Rhodonía placenta*.

FUENTE: elaboración propia.

b. Inoculación de las tiras de alimentación

Se cortaron las tiras de alimentación, según lo especificado en norma ASTM 2017, utilizando madera de albura de la especie *Matisia cordata*, con dimensiones de 2cmx5cmx0.5cm. Luego se esterilizaron en estufa por 24 horas a 100 °C, se sumergieron en agua destilada por 72 horas, se esterilizaron de nuevo en autoclave de vapor a 126°C a 106 KPa durante 30 minutos y se colocaron en las placas Petri anteriormente cultivadas con los dos tipos de hongos de pudrición. Después tres semanas aproximadamente los hongos de pudrición cubrieron (colonizaron) completamente las tiras de alimentación (Fig. 21).

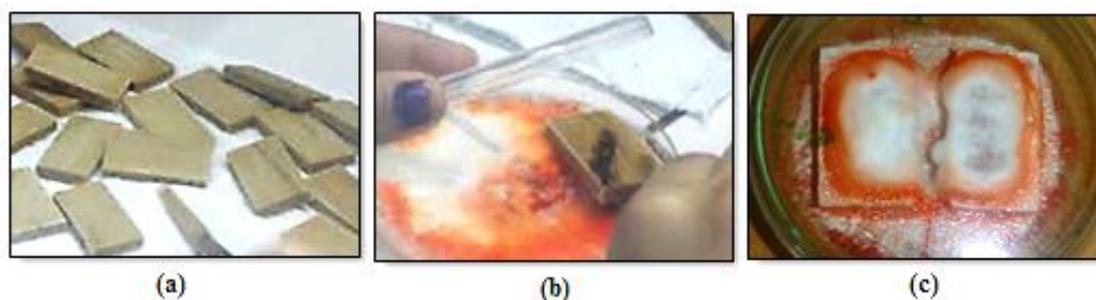


Figura 21: **Inoculación de las tiras de alimentación.**

FUENTE: elaboración propia.

Donde:

(21. a) Tiras de alimentación.

(21. b) Colocación de tiras de alimentación en placa Petri.

(21. c) Tira de alimentación inoculada con hongo de pudrición.

c. Pesado inicial e inmersión de las probetas del compuesto bambú-plástico

Las probetas de los compuestos bambú-plástico se codificaron, luego se secaron en una estufa a 103 ± 2 °C hasta peso constante. Este se consideró el peso seco inicial P_1 que fue la base para determinar la pérdida de peso, causada por la acción de los hongos durante el experimento según se visualiza en la Figura 22.



Figura 22: **Balanza analítica con pesado de probeta bambú-plástico.**

FUENTE: elaboración propia.

Luego las probetas se sumergieron en un equipo de baño maría a 50 °C hasta que alcanzaron la humedad necesaria para poder ser degradadas por los hongos de pudrición (Fig. 23).



Figura 23: **Probetas bambú-plástico sumergidas en equipo de baño maría.**

FUENTE: elaboración propia.

d. Preparación de los frascos de prueba (Cámaras de pudrición)

Se llenaron los frascos de vidrio con: suelo orgánico, agua destilada, tiras de alimentación inoculada con los hongos de pudrición y la probeta de ensayo como se ilustra en la Fig. 24.

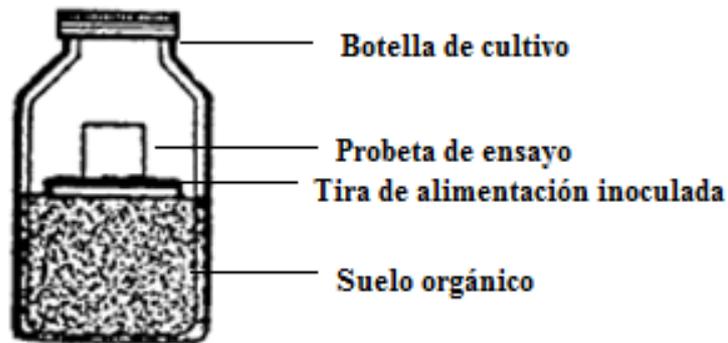


Figura 24: **Botella de ensayo de la prueba de degradación biológica.**

FUENTE: norma ASTM D2017-05.

Se agregó suelo orgánico libre de impurezas previamente tamizado y con pH entre 5 y 8. Se determinó la capacidad de retención de humedad, para lo cual se utilizó un matraz, un embudo y una bomba de vacío. Se encontró una capacidad de retención de agua de 32,74 por ciento la cual se encuentra en el rango mencionado en la norma entre 20 y 40 por ciento. Con este resultado se determinó la cantidad de agua destilada que se le agregó a los frascos (Fig. 25).



Figura 25: **Determinación de la capacidad de retención del suelo.**

FUENTE: elaboración propia.

Luego los frascos de prueba con volúmenes de 100 ml; 315 ml y 580 ml se llenaron con 90; 100 y 150 ml de agua destilada y 100 g; 120 g y 200 g de suelo orgánico respectivamente y se taparon. Estos frascos preparados y las probetas de prueba se introdujeron en el

esterilizador de vapor de presión portátil a 126°C a 106 KPa por 30 minutos, según se muestra en la Figura 26.



Figura 26: Esterilizador de vapor de presión portátil y frascos de prueba esterilizados.

FUENTE: elaboración propia.

En los frascos esterilizados se introdujeron las tiras de alimentación inoculadas con los hongos de pudrición y encima de estas las probetas esterilizadas. Se colocaron las tapas de los frascos ligeramente desenroscadas para el ingreso de oxígeno. Finalmente se colocaron los frascos preparados (cámaras de pudrición) en una estufa incubadora por 16 semanas con una temperatura de 28 °C y una humedad relativa de 50 por ciento. Según se muestra en la Figura 27.



Figura 27: **Preparación de botellas de ensayo de la prueba de degradación biológica.**

FUENTE: elaboración propia.

Donde:

(27.1) Frascos de prueba esterilizado.

(27.2) Tira de alimentación inoculada con el hongo de pudrición.

(27.3) (27.4) (27.5) Colocación de la tira de alimentación inoculada en el frasco de prueba.

(27.6) (27.7) Colocación de los frascos preparados en cámara de incubación.

e. Manejo de las probetas tras la exposición a los hongos

Finalizado el tiempo de incubación, se eliminó cuidadosamente el micelio del hongo desarrollado sobre las probetas (Figuras 28 y 29). Luego se secaron en una estufa a $103 \pm 2^\circ\text{C}$ hasta peso constante. Este se consideró el peso seco final P_2 .



Figura 28: **Eliminación del micelio del hongo *Pycnoporus sanguineus*.**

FUENTE: elaboración propia.



Figura 29: **Eliminación del micelio del hongo *Rhodonia placenta*.**

FUENTE: elaboración propia.

f. Calculo de la pérdida de peso

Con los pesos de las probetas de prueba, el primer peso P_1 que se obtuvo antes de la prueba y el segundo peso P_2 después de la exposición a los hongos, se calculó el porcentaje de la pérdida de peso. Según la fórmula mostrada a continuación:

$$PPp(\%) = \frac{(P_1 - P_2)}{P_1} \times 100$$

Dónde:

PPp: Porcentaje de pérdida de peso.

P₁: peso seco inicial antes de la exposición a los hongos.

P₂: peso seco final después de la exposición a los hongos.

Los resultados completos se muestran en el anexo 1.

g. Evaluación de los resultados

Los resultados de los porcentajes de pérdidas de peso de los compuestos bambú-plástico se compararon con los valores de la tabla de escala de evaluación de la resistencia a un hongo de la norma ASTM D2017-05 mostrado en la Tabla 5. Cabe resaltar que se hicieron las comparaciones de los resultados pero se tuvo en consideración que la tabla de la norma se utiliza para maderas y no para materiales compuestos.

Tabla 5: Escala de evaluación de la resistencia a un hongo específico.

<i>Pérdida de peso promedio (%)</i>	<i>Peso residual promedio (%)</i>	<i>Clase indicada de resistencia a un hongo de ensayo especificado</i>
0 a 10	90 a 100	Altamente resistente
11 a 24	76 a 89	Resistente
25 a 44	56 a 75	Moderadamente resistente
45 a mas	55 a menos	No resistente

FUENTE: Norma ASTM D2017-05.

6.1.8. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS

Pasado el tiempo de exposición de las probetas a los hongos de pudrición se realizaron las evaluaciones de las propiedades físico-mecánicas. Se llevó a cabo en el Laboratorio de Propiedades Físico-Mecánicas de la Madera. Las propiedades a evaluar se mencionan a continuación:

a. Propiedades Físicas

a.1. Densidad

Se aplicó la norma ASTM D1037-99 (*Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood Base Fiber and Particle Panels Materials*). Según la norma se utilizaron 7 probetas por formulación. Antes del ensayo se pesaron y se midieron los espesores, anchos y largos de las probetas. Luego se pusieron a estufa a 100°C hasta obtener peso constante.

Se aplicó la siguiente fórmula:

$$D \text{ (g/cm}^3\text{)} = (m_o/v_o) \times 100$$

Donde:

D (g/cm³): densidad anhidra.

m_o (g): masa seca de la probeta.

v_o: volumen seco.

Los resultados completos se muestran en el anexo 2.

a.2. Absorción de agua e Hinchamiento

Se aplicó la norma ASTM D570-98 (2010) (*Test Method for Water Absorption of Plastic*).

Según la norma se utilizaron 7 probetas por formulación. Antes del ensayo se midieron los espesores, anchos y largos de las probetas y se acondicionaron en estufa eléctrica a 50°C por 24 horas y así se pesaron y midieron. Después se sumergieron en agua por 2 y 24 horas así se pesaron y midieron después de cada período respectivamente.

La absorción se calculó con la siguiente fórmula:

$$A \text{ (\%)} = ((pf - pi)/pi) \times 100$$

Dónde:

A (%): Absorción de agua.

pf (g) : peso luego de inmersión en agua.

pi (g) : peso inicial (acondicionado).

El hinchamiento se calculó con la siguiente fórmula:

$$H \text{ (\%)} = ((ef - ei)/ei) \times 100$$

Donde:

H (%): Hinchamiento.

ef (mm): espesor después de inmersión en agua.

ei (mm): espesor inicial (acondicionado).

Los resultados completos se muestran en el anexo 3.

b. Propiedades Mecánicas

b.1. Flexión

Se tomó como referencia la norma ASTM D 790 – 03 (*Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*). Según la norma se utilizaron siete probetas por formulación. Antes del ensayo se midió el espesor y ancho de las probetas y se acondicionaron a 50 por ciento de humedad relativa por un mínimo de 40 horas. Los ensayos se realizaron en una máquina de ensayos universales Tinius Olsen, teniéndose en cuenta las siguientes especificaciones: la luz entre los soportes de 42,7 mm, la frecuencia de ensayo de 5,5 mm/min y la escala de lectura 0,5 libras.

Para el ensayo se ubicó el soporte debajo del cabezal móvil de la prensa y se colocó la probeta entre los dos soportes. Luego se colocó el deflectómetro y se eligió la escala de lectura para el ensayo. Durante el ensayo se realizaron las mediciones simultáneas de la carga y la deformación de la probeta hasta el momento de su carga máxima y se registraron los datos en los formatos. El tiempo de duración del ensayo por probeta fue entre 8 a 12 minutos.

Con los resultados de carga y deformación de las probetas se elaboraron las gráficas respectivas para cada probeta, así en las coordenadas cartesianas en el eje de las ordenadas se ubicó la carga (lb o kg) y en el eje de abscisas se ubicó la deformación (pulg o cm).

Los valores de resistencia fueron calculados utilizando las siguientes expresiones:

$$\mathbf{MOR} = 3PL/2ae^2$$

Donde:

MOR (MPa): Módulo de resistencia en flexión.

P (N): Carga máxima.

L(mm): Luz entre los soportes.

a (mm): Ancho de la probeta.

e (mm): Espesor de la probeta.

$$\text{MOE} = L^3 m / 4ae^3$$

Donde:

MOE (MPa): Módulo de elasticidad en flexión.

L (mm): Luz entre los soportes.

m (N/mm): Tangente carga/deformación.

a (mm): Ancho de la probeta.

e (mm): Espesor de la probeta.

Los resultados completos se muestran en el anexo 4.

b.2. Tensión

Se aplicó la norma ASTM D638-03 (Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics). Según la norma se utilizó el tamaño de la probeta de Tipo V (63.5 mm x 3.18 mm x espesor). Asimismo se ensayaron siete probetas por cada formulación. Antes del ensayo se midió el espesor y ancho de las probetas y se acondicionaron a 50 por ciento de humedad relativa por un mínimo de 40 horas. Los ensayos se realizaron en un equipo Tinius Olsen, teniendo en cuenta las siguientes especificaciones: velocidad de 1 mm/min, frecuencia de 8.4 mm/min y escala de lectura 0,5 libras.

Se ubicó la probeta en las manijas de la prensa y se reforzó las manijas para evitar que la probeta resbale durante el ensayo. Luego se colocó el deflectómetro y se eligió la frecuencia y la escala de lectura para el ensayo. Seguidamente se realizaron las mediciones simultáneas de la carga y la tensión (deformación) de la probeta hasta su carga máxima y se registraron los datos en los formatos. El tiempo de duración del ensayo por probeta fue entre 25 a 35 segundos.

Con los resultados de carga y deformación de las probetas se elaboraron las gráficas respectivas para cada probeta, así en las coordenadas cartesianas en el eje de las ordenadas se ubicó la carga (lb o kg) y en el eje de abscisas se ubicó la deformación (pulg o cm).

Los valores de resistencia fueron calculados utilizando las siguientes expresiones:

$$\text{MOR} = Q_{\text{máx.}} / A_S$$

Donde:

MOR (MPa): Módulo de resistencia en tensión.

Q_{máx.} (N): Carga máxima.

A (mm²): sección transversal.

Los resultados completos se muestran en el anexo 5.

b.3. Impacto (ASTM D 5420-04)

Se tomó como referencia la norma ASTM D 5420-04 (Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight Gardner Impact). Según la norma se utilizaron 20 probetas por cada formulación. Antes del ensayo se midió el espesor de las probetas y seguidamente se acondicionaron 50 por ciento de humedad relativa por un mínimo de 40 horas.

Para el ensayo se utilizó una máquina para impacto, con una bala de 2,010 kg y una regla de una altura de dos metros. Las probetas se colocaron en el centro de la máquina para la aplicación de la carga. Luego las probetas fueron evaluadas para saber el tipo de falla luego del impacto.

Los valores de energía por impacto fueron calculados usando la siguiente fórmula:

$$E = h \times m \times g$$

Donde:

E (J): Energía.

h (mm): altura.

m (kg): masa de la bala.

g: gravedad ($9,8 \times 10^{-3}$).

Los resultados de impacto para cada ensayo se detallan en el anexo 6.

6.2. DISEÑO EXPERIMENTAL Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO

El modelo estadístico utilizado fue el “Diseño de Bloques Completamente al Azar en arreglo factorial”. Con 2 bloques (tipos de hongo) y un arreglo factorial de 2x2 (tamaño de partículas de bambú y proporción bambú/plástico), con siete repeticiones para los ensayos de pérdida de peso, densidad, absorción, hinchamiento, tensión y flexión; en la Tabla 6 se muestra el diseño experimental de los tratamientos empleados. Para el ensayo de impacto es el mismo diseño experimental (DBCA 2x2) con variación en el número de repeticiones, que fueron 20. Las variables del análisis de experimentos son:

6.2.1. VARIABLES INDEPENDIENTES:

- Tipos de hongos.
- Tamaño de partícula de bambú.
- Proporción de mezcla (partículas de bambú/plástico).

6.2.2. VARIABLES DEPENDIENTES:

- Pérdida de peso.
- Absorción de agua.
- Hinchamiento.
- Densidad.
- Flexión.
- Impacto.
- Tensión.

Tabla 6: Diseño experimental de los tratamientos empleados en la prueba de degradación del compuesto bambú-plástico.

Tipo de hongo	Tamaño de partícula	Proporción bambú/plástico	Tratamientos	Repeticiones	Variables respuesta					
					P. degradación	Prop. físicas			Prop. mecánicas	
					Pérdida de peso	Densidad	Absorción	Hinchamiento	Flexión	Tensión
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/60	50/50	HPs T60 P50	7	x	x	x	x	x	x
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/60	30/70	HPs T60 P30	7	x	x	x	x	x	x
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	HPs T80 P50	7	x	x	x	x	x	x
<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	HPs T80 P30	7	x	x	x	x	x	x
<i>Rhodonía placenta</i>	-40/60	50/50	HPp T60 P50	7	x	x	x	x	x	x
<i>Rhodonía placenta</i>	-40/60	30/70	HPp T60 P30	7	x	x	x	x	x	x
<i>Rhodonía placenta</i>	-60/+80	50/50	HPp T80 P50	7	x	x	x	x	x	x
<i>Rhodonía placenta</i>	-60/+80	30/70	HPp T80 P30	7	x	x	x	x	x	x

FUENTE: elaboración propia.

Dónde:

- **HPs y HPp:** Los tipos de hongos de pudrición *Pycnoporus sanguineus* y *Rhodonía placenta* respectivamente.
- **T60 y T80:** los tamaños de partículas del bambú -40/+60 y -60/80 respectivamente.
- **P50 y P30:** las proporciones de bambú/plástico 50/50 y 30/70 respectivamente.

Con los datos obtenidos se realizó el análisis de variancia (ANVA) para saber si los efectos son estadísticamente significativos según el modelo estadístico, se consideró un intervalo de confianza del 95 por ciento y un margen de error de 0,05 por ciento, en algunos casos se consideró 0,01 por ciento.

El modelo estadístico fue el siguiente:

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

Dónde:

- μ es la media general,
- α_i es el efecto debido al i -ésimo nivel del factor tamaño de partícula (-40/+60 y 60/+80); β_j es el efecto debido al j -ésimo nivel del factor proporción de mezcla bambú/plástico (50/50 y 70/30); γ_k es el bloque (dos tipos de hongos).
- $(\alpha\beta)_{ij}$ representa al efecto de interacción en la combinación ij y
- ε_{ijk} es el error aleatorio que supone sigue una distribución con media cero y varianza constante σ^2 y son independientes entre sí.

Se hallaron los análisis de varianza (ANOVA) y el coeficiente de variabilidad (CV). Para la comparación múltiple de medias se aplicó la prueba de Tukey. Para procesar los datos se aplicó el programa SAS.

Los valores del análisis estadístico se presentan en los anexos 7 al 13.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. EVALUACIÓN DE LA DEGRADACIÓN BIOLÓGICA

En la Tabla 7 se muestran los valores promedios y las desviaciones estándar (en corchetes) de los porcentajes de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico y los testigos solo de bambú expuestos a dos hongos de pudrición de las formulaciones en estudio.

Tabla 7: Valores promedios y desviaciones estándar de la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico y los testigos solo de bambú expuestos a dos hongos de pudrición.

Tratamiento	Hongo de pudrición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Pérdida de peso	
				%	Desv. Estand. (s)
F1	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	2,11	0,88
F2	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	1,76	0,69
F3	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	3,34	0,94
F4	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	1,77	0,82
F5	<i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	1,80	0,87
F6	<i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	0,86	0,29
F7	<i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	2,21	0,94
F8	<i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	1,56	0,68
TBps	<i>Pycnoporus sanguineus</i>	-	100/0	25,80	9,39
TBpp	<i>Rhodonia placenta</i>	-	100/0	14,09	5,55

En la Figura 30 se muestra la variación de los valores de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación.

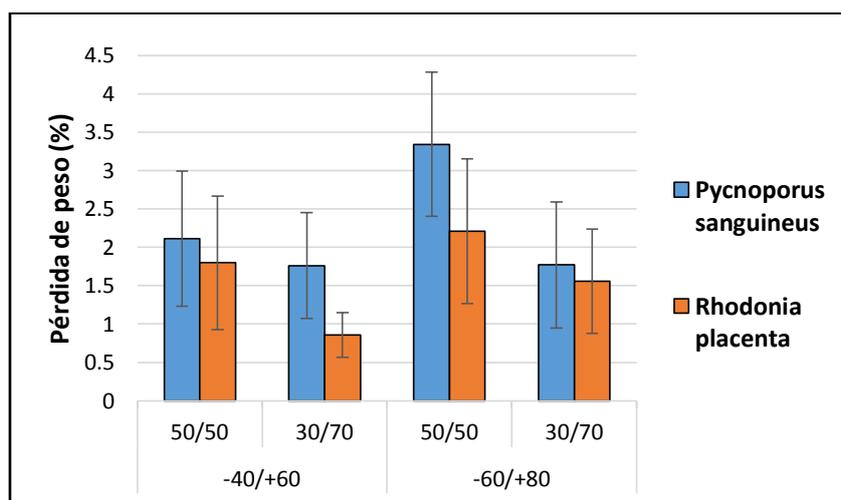


Figura 30: **Porcentaje de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico en la prueba de degradación biológica.**

Según los resultados de la Tabla 7 para la pérdida de peso para el hongo *P. sanguineus* varía entre 1,76 por ciento a 3,34 por ciento y para el hongo *R. placenta* varía entre 0,86 por ciento a 2,21 por ciento. Acorde a ello y la Figura 30, se visualiza que existen mayores porcentajes de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico expuestos al hongo *P. sanguineus* que con el hongo *R. placenta* para todas las formulaciones. Por tanto se afirma que el compuesto bambú-plástico fue degradado en mayor medida por el hongo *P. sanguineus*.

De la misma manera según la Tabla 7 y la Figura 30, con respecto a la proporción se puede notar que las mayores pérdidas de peso se presentan en las formulaciones con proporción 50/50 que con la proporción 30/70 para ambos tipos de hongos y tamaños de partícula. Con respecto al tamaño de partícula se puede notar las mayores pérdidas de peso con el tamaño de partícula -60/+80 que con el tamaño de partículas -40/+60 para ambos tipos de hongos y proporciones.

En la Figura 31 y la Tabla 7 se muestran la comparación de las pérdidas de peso de los compuestos bambú-plástico con los testigos solo de bambú. Se observa que la pérdida de peso de los testigos de bambú expuestos a ambos tipos de hongos fueron superiores en comparación con las probetas de los compuestos bambú-plástico para todas las formulaciones. Los testigos de bambú presentaron valores de pérdida de peso de 25,80 por ciento para *P. sanguineus* y de 14,09 por ciento para *R. placenta*. Según la Tabla 5 de escalas de evaluación de la resistencia a un hongo específico de la norma ASTM D2017-05,

se considera que los compuestos bambú-plástico son altamente resistentes a ambos hongos de pudrición, y a los testigos de bambú se les considera como resistentes al hongo *R. placenta* y moderadamente resistentes al hongo *P. sanguineus*.

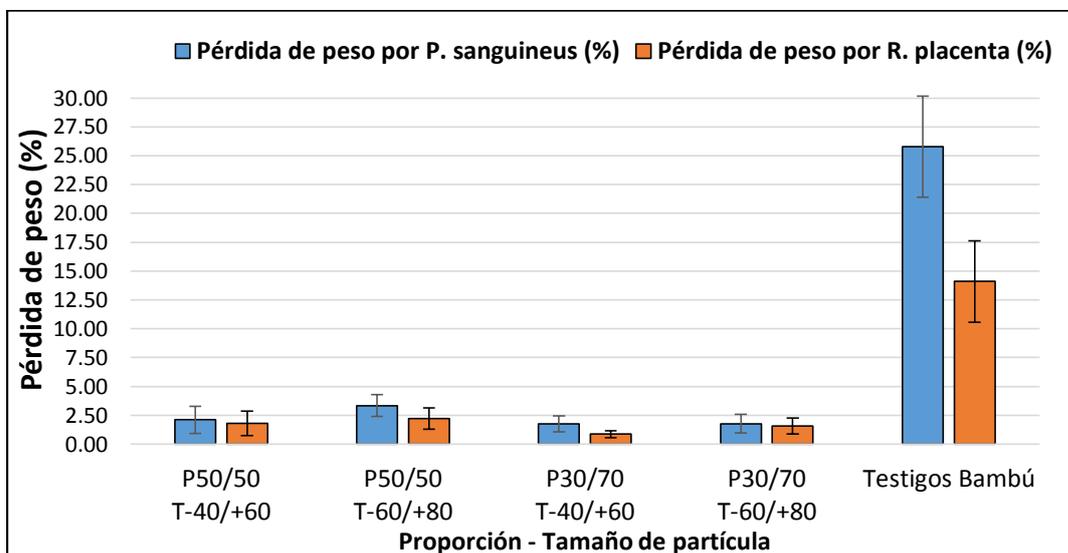


Figura 31: Comparación de porcentajes de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico y los testigos de bambú en la prueba de degradación biológica

En la Tabla 8 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico.

Tabla 8: Valores del análisis de variancia de la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación

Fuente de variabilidad	Grados de libertad (G.L.)	Durabilidad	
		p-valor	Significancia
H	1	0,0002	**
T	1	0,0176	*
P	1	0,0011	**
H*T	1	0,683	n.s.
H*P	1	0,6554	n.s.
T*P	1	0,1748	n.s.
H*T*P	1	0,1343	n.s.
Error	42	0,0022	
Total corregido	55		
C.V.		25,34	

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico,

T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.
C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados del análisis de variancia (ANVA) mostraron, en el caso del factor tipo de hongo (H) que es altamente significativo, es decir los dos tipos de hongos degradaron con diferencia significativa los compuestos bambú-plástico lo cual es validado por los resultados obtenidos ya que existieron mayores pérdidas de peso con el hongo *P. sanguineus* que con el hongo *R. placenta*. Los compuestos bambú-plástico son susceptibles a la degradación por ambos tipos de hongos de pudrición (blanca y marrón) por tener bambú en su composición, ya que el bambú posee una durabilidad baja contra la biodegradación acorde a Liese (2004) al ser una fuente importante de alimento para ambos tipos de hongos según refieren Burgos (2003) y Botero (2004). Los hongos produjeron cambios en las propiedades de los componentes del bambú, principalmente en la celulosa (50 por ciento) y la lignina (25 por ciento) según mencionaron Hidalgo (2003) y Liese (2004). El hongo *P. sanguineus* causó mayor degradación del compuesto bambú-plástico que *R. placenta*, lo cual se explica ya que *P. sanguineus* (pudrición blanca) degrada todas las sustancias del bambú (lignina y celulosa) en cambio *R. placenta* (pudrición marrón) solo degrada la celulosa del bambú acorde a lo mencionado por Liese (2004).

Del mismo modo el factor proporción (P) es altamente significativo, es decir dependiendo de las proporciones de los componente del compuestos bambú-plástico se presentaron diferencias significativas en los valores de pérdida de peso o degradación, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 50/50 (bambú/plástico) presentaron mayores pérdidas de peso que los de 30/70 (bambú/plástico). Así el nivel de degradación de los compuestos bambú-plástico depende del contenido de partículas de bambú en su formulación, es decir los compuestos con mayor proporción de partículas lignocelulósicas tuvieron mayores pérdidas de peso o degradación según lo mencionado por Mankowski y Morrell (2000), Verhey *et al.* (2001) y Pedleton *et al.* (2002), Rowell (2006), Schirp *et al.* (2008), Kartal *et al.* (2013). Por ello, se consideró que la proporción de bambú es un factor importante en la determinación de la degradación de los compuestos según lo mencionado por Kartal *et al.* (2013) y que el plástico impide la pérdida de peso (degradación) de los compuestos bambú-plástico por los hongos de pudrición.

En el caso del factor tamaño de partícula (T) resulto significativo, ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron

diferencias significativas en los valores de pérdida de peso o degradación, lo cual se validó con los resultados obtenidos de que los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 presenta mayores pérdidas de peso que con los de tamaño de partículas -40/+60. Así el nivel de degradación de los compuestos con respecto al tamaño de partícula, se explica que dependiendo del tamaño de las partículas ligno-celulósicas hubo un grado de distribución y encapsulación de las partículas en la matriz polimérica lo que repercutió en la degradación acorde a lo mencionado por Verhey y Laks (2002) pero los resultados obtenidos no concuerdan por lo mencionado por dichos autores pero si con lo mencionado por Kartal *et al.* (2013). Según los resultados se cumple que a mayor tamaño de partícula de bambú menor pérdida de peso y a menor tamaño de partícula mayor perdida de peso. Con respecto a las dobles y triple interacciones resultaron no significativas.

En la Tabla 9 se muestran las diferencias entre los valores de medias que se comprobaron mediante la prueba Tukey de la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico evaluadas para todas las formulaciones.

Tabla 9: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey para la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación

Variable	Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Pérdida de peso	Ps	3,76	B	-40/+60	3,03	A	50/50	3,70	B
	Pp	2,85	A	-60/+80	3,59	B	30/70	2,92	A

Para la variable tipo de hongo, el hongo *Pycnoporus sanguineus* (podrición blanca) presentó un mayor valor de media de pérdida de peso que el hongo *Rhodonia placenta* (podrición marrón), lo cual mostró que el compuesto bambú-plástico fue degradado en mayor medida por el hongo *Pycnoporus sanguineus*. En el caso de la variable tamaño de partícula, se observó que el tamaño de partícula -60/+80 presentó el mayor valor lo cual mostró que este tamaño es más susceptible a la degradación por ello presentaron mayores pérdidas de peso. Y por último en el caso de la variable proporción, se observó que proporción 50/50 presentó el mayor valor, lo cual mostró que al contener mayor porcentaje de bambú es más susceptible a la degradación.

En general los resultados de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico para ambos tipos de hongos de pudrición son menores que el 5 por ciento, así con el hongo *Pycnoporus sanguineus* (< 3,34 por ciento) y con el hongo *Rhodonía placenta* (< 2,21 por ciento) según se muestra en la Tabla 7. Dichos resultados se acercan a los obtenidos por otros autores como Mankowski y Morrell (2000), Pedleton *et al.* (2002), Schirp y Wolcott (2005), H'ng *et al.* (2011) y Kartal *et al.* (2013) mostrados en las Tablas 1 y 2 que elaboraron sus compuestos con madera de diferentes especies y lo expusieron a otros tipos hongos de pudrición. Pero contrasta con lo encontrado por Zabihzadeh *et al.* (2010) y Hosseinihashemi *et al.* (2011) mostrados en la Tabla 1, que obtuvieron mayores valores de pérdida de peso. Aunque cabe resaltar que dichos autores elaboraron sus compuestos con bagazo, lo que indica que dicho material lignocélusico es mas susceptible a la degradación por hongos que el bambú y la madera ya que estos últimos presentan similar grado de degradación.

En las distintas formulaciones de los compuestos bambú-plástico se cumplió que el incremento en el contenido de partículas de bambú (de 30 a 50 por ciento), incrementó la pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico para ambos tipos de hongos y tamaños de partícula (ver Tabla 7 y Figura 30). Dicha tendencia se asemejó a lo hallado por otros autores como Mankowski y Morrell (2000), Pedleton *et al.* (2002) y Kartal *et al.*(2013) mostrados en la Tabla 1 que incrementaron de igual manera el contenido de partículas (de 50 a 70 por ciento). Por lo tanto, se afirma que el incremento en la cantidad de partículas de bambú, incrementa la degradacion de los compuestos bambú-plástico después de la exposición a hongos de pudrición.

De la misma, forma los valores encontrados de los compuestos bambú-plástico para la proporción 50/50 mostrados en la Tabla 7, son similares a los encontrados por Mankowski y Morrell (2000) , Pedleton *et al.* (2002), Schirp y Wolcott (2005) y Kartal *et al.*(2013) mostrados en las Tablas 1 y 2 que utilizarón la misma proporción. Dichos autores concluyen que la proporción 50/50 en los WPC's es poco susceptible a la degradacion por hongos de pudricion. Según lo cual se afirma que los compuestos bambú-plástico con proporción 50/50 y 30/70 (bambú/plástico) son resistentes a la degradacion de ambos tipos de hongo de pudricion utilizados.

El resultados de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico (1,8 por ciento) con proporción 50/50 y tamaño de partícula -40/+60 expuestos al hongo de pudrición *Rhodonía placenta* son cercanos a los hallados por Mankowski y Morrell (2000) con 1,3 por ciento y

Pedleton *et al.* (2002) con 0,58 por ciento que utilizaron el mismo hongo y las mismas variables. Del mismo modo los resultados de pérdida de peso de los compuestos bambú-plástico (2,11 por ciento) con tamaño de partícula -40/+60 expuesto al hongo de pudrición *Pycnoporus sanguineus* son cercanos a los hallados por H'ng *et al.* (2011) con 0,91; 1,18 y 2,33 por ciento que utilizaron el mismo tipo de hongo y tamaño de partícula pero distinta proporción. Dichos autores utilizaron la norma ASTM D 2017 y de acuerdo a la tabla de evaluación (ver tabla 5) incluida en la norma, clasificaron a los compuestos como altamente resistentes, es decir, que no presentaron ningún grado de susceptibilidad a la degradación porque presentaron valores de pérdida de peso menores a 10 por ciento. Por tanto se afirma que los compuestos bambú-plástico son altamente resistentes.

Los valores de pérdida de peso del compuesto bambú-plástico con menor tamaño de partícula (-60/+80) fueron superiores que con el mayor tamaño, lo cual concuerda con lo hallado por Kartal *et al.* (2013) y difiere con lo determinado por Verhey y Laks (2002). Del mismo modo los resultados de pérdida de peso de los compuestos con tamaño de partícula -40/+60 son cercanos a los hallados por otros autores como Pedleton *et al.* (2002), Schirp y Wolcott (2005), H'ng *et al.* (2011) y Kartal *et al.* (2013) mostrados en las Tablas 1 y 2. Por tanto se afirma que la influencia del tamaño de partícula en la durabilidad de los compuestos bambú-plástico es importante pero no es determinante como si lo es la proporción.

2. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS

A continuación se detallan los resultados y discusiones de las propiedades físicas donde se evaluaron las variables de densidad, absorción de humedad e hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuestos a degradación por dos hongos de pudrición.

2.1. DENSIDAD

En la Tabla 10 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) de la densidad de los materiales de los compuestos bambú-plástico expuestos a dos hongos de pudrición y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio. Los valores promedio de densidad para las probetas de tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 0,65 y 0,69 g/cm³ y con proporción 30/70 fueron de 0,73 y 0,74 g/cm³, para tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 0,83 y 0,84 g/cm³ y con proporción 30/70 fueron de 0,88 y 0,89 g/cm³.

Tabla 10: Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y de los testigos sin ningún tratamiento (Tst).

<i>Formulación</i>	<i>Factor de Exposición</i>	<i>Tamaño de partícula (mesh)</i>	<i>Proporción (bambú/plástico)</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	0,65 [0,07]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	0,74 [0,05]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	0,83 [0,05]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	0,88 [0,04]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	0,69 [0,05]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	0,73 [0,06]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	0,84 [0,05]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	0,89 [0,02]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	0,88 [0,06]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	0,86 [0,03]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	0,89 [0,04]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	0,92 [0,04]

En la Figura 32 se muestra la variación de los valores de densidad de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación. En general se visualiza que la densidad de las probetas elaboradas con tamaño de partícula -60/+80 presentan mayores valores que los de tamaño de partícula -40/+60 evaluados para ambos tipos de hongos y ambas proporciones. Además los valores de densidad para la proporción 30/70 fueron mayores que para la proporción 50/50 ello para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula. No hubo diferencias de la densidad de los compuestos bambú-plástico con respecto a los tipos de hongos de pudrición.

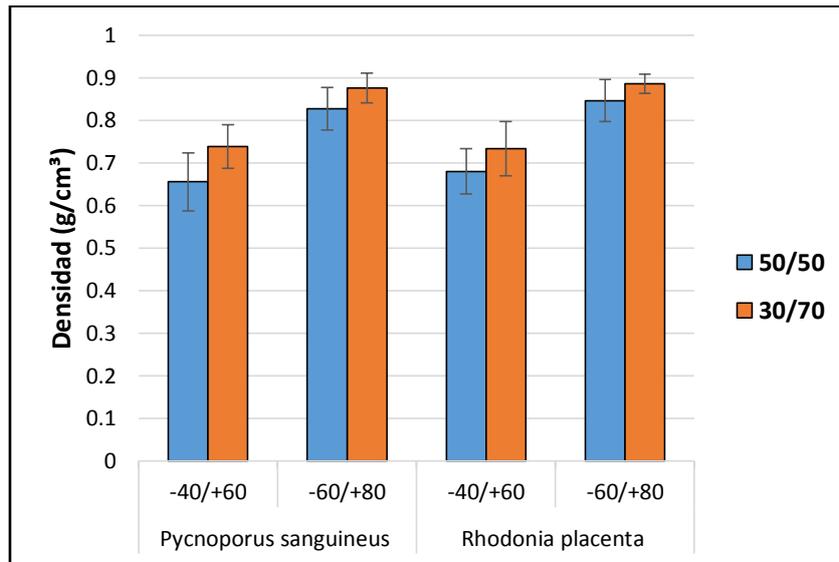


Figura 32: **Densidad de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación**

En la Figura 34 y la Tabla 10 se muestra la comparación de la densidad de los compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con los testigos del compuestos bambú-plástico no expuestos a ninguna condición. Se observa que la densidad de los testigos fue relativamente superior con respecto a las probetas expuestas. Por tanto se afirma que la degradación de las probetas de los compuestos bambú-plástico por los hongos de pudrición facilito la leve disminución de la densidad de estos.

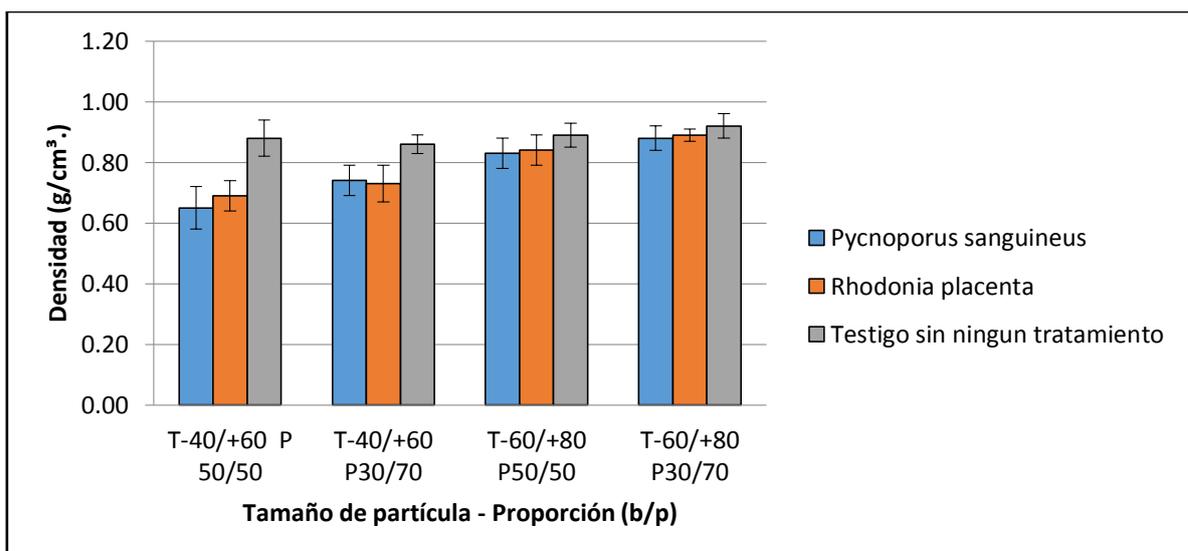


Figura 33: **Comparación de densidades de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.**

En la Tabla 11 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable densidad de los compuestos bambú-plástico.

Tabla 11: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

<i>Fuente de variabilidad</i>	<i>Grados de libertad (G.L.)</i>	<i>Densidad</i>	
		<i>p-valor</i>	<i>Significancia</i>
H	1	0,2316	n.s.
T	1	<,0001	**
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,9542	n.s.
H*P	1	0,3603	n.s.
T*P	1	0,3909	n.s.
H*T*P	1	0,4917	n.s.
Error	42	<,0001	
Total corregida	55		
C.V.			5,92

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal proporción (P) es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componentes del compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de densidad, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 30/70 (bambú/plástico) presentaron mayores valores de densidad que los de proporción 50/50 (bambú/plástico). Así la densidad en los compuestos es afectada por el aumento del contenido de partículas de bambú, es decir el aumentó en la cantidad de partículas de bambú, aumenta la porosidad y disminuye la densidad según lo referido por Klyosov (2007). Por tanto existe una relación inversamente proporcional entre la cantidad de partículas de bambú (proporción) y la densidad.

De la misma manera el factor principal tamaño de partícula (T) es altamente significativo, ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron diferencia significativas en los valores de densidad, lo cual es

validado con los resultados obtenidos de que los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 presenta mayores valores de densidad que con los de tamaño de partículas -40/+60. Así la densidad en los compuestos es afectada por el tamaño de las partículas de bambú, se sabe que dependiendo del tamaño las partículas habrá un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica. Es decir las partículas más pequeñas se encapsulan de manera más efectiva en la matriz polimérica lo que causa menos porosidad y hace que aumente la densidad de los compuestos según lo mencionado por Verhey y Laks (2002). Por otro el factor principal tipo de hongo (H), las dobles y triple interacciones resultaron no significativos.

En la Tabla 12 se muestran las diferencias entre los valores de medias de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey. En el caso de la variable tamaño de partícula, el de -60/+80 presento el valor más alto de media de la densidad con respecto a -40/+60. Asimismo en el caso de la proporción, la de 30/70 presento el mayor valor de media de la densidad con respecto a 50/50. Con respecto a tipo de hongo se observó que no hay diferencias significativas entre los valores promedios.

Tabla 12: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias mediante la prueba de Tukey para la propiedad física de densidad de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable	Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Densidad	Ps	0,77	A	-40/+60	0,70	B	50/50	0,75	B
	Pp	0,79	A	-60/+80	0,86	A	30/70	0,81	A

En las distintas formulaciones de los compuestos bambú-plástico se cumple que al incrementar el contenido de partículas de bambú (30 a 50 por ciento), se disminuye la densidad para todos los tamaños de partícula (ver Tabla 10 y Figura 32). Dicha tendencia concuerda con lo afirmado por Klyosov (2007) pero no concuerda con lo hallado por Kartal *et al.*(2013) aunque ellos aumentaron el contenido de partículas (50 a 70 por ciento) que dio como resultado un aumento de la densidad de WPC expuestos a hongos de pudrición.

Por otro lado los valores de densidad encontrados para la proporción 50/50 (<0,84 g/cm³) mostradas en la Tabla 10 para todas las formulaciones en estudio, son menores a los

encontrados por Schirp y Wolcott (2005) con 1,05 g/cm³, Cárdenas (2012) con 1,06 g/cm³ y Kartal *et al.* (2013) con 1,08 g/cm³. Según lo cual se afirma que los compuestos bambú-plástico con proporción 50/50 con respecto a los compuestos estudiados por los otros autores presentan mayor porosidad lo que repercute en los menores valores de la densidad a causa posiblemente de variables no ensayadas en el presente estudio como por ejemplo el proceso de fabricación y/o tipo de fibra utilizada.

2.2. ABSORCIÓN DE AGUA

En la Tabla 13 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) de la absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a dos hongos de pudrición y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 13: Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Absorción (%)	
				2 h	24 h
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	16,37 [3,99]	29,36 [5,91]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	6,08 [2,71]	14,28 [4,92]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	10,57 [2,29]	23,26 [4,25]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	3,21 [1,03]	7,67 [1,91]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	16,32 [4,68]	27,07 [4,42]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	6,97 [4,09]	14,01 [5,75]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	7,25 [2,55]	17,90 [4,30]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	3,21 [0,90]	7,36 [1,27]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	3,8 [0,51]	13,2 [1,18]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	1,4 [0,13]	4,8 [0,64]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	3,3 [0,48]	12,12 [1,64]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	1,7 [0,21]	4,2 [0,41]

Los valores promedios de absorción a las 24 horas para las probetas con tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 29,36 y 27,07 por ciento y con proporción 30/70 fueron de 14,28 y 14,01 por ciento; y para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 23,26 y 17,90 por ciento y con proporción 30/70 fueron de 7,67 y 7,36 por ciento.

En la Figura 34 se muestra la variación de los valores de absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación, el cual nos muestra que la absorción de las probetas elaboradas con tamaño de partícula -40/+60 presentan mayores valores que con los de tamaño de partícula -60/+80 evaluados para ambos tipos de hongos y proporciones. Además los valores de absorción para la proporción 50/50 fueron mayores que para la proporción 30/70 ello para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula.

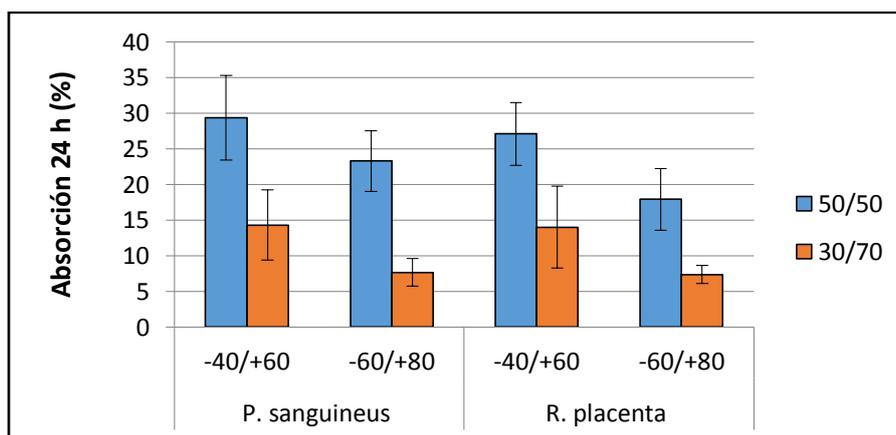


Figura 34: **Absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.**

En la Figura 35 y la Tabla 13 se muestra la comparación de la absorción a las 24 horas del compuesto bambú-plástico expuesto a hongos de pudrición con testigos del compuesto bambú-plástico no expuesto a ninguna condición. Se observa que la absorción a las 24 horas de los testigos fue inferior con respecto a las probetas expuestas. Por tanto se supone que la penetración de los hongos de pudrición en las probetas de los compuestos bambú-plástico provocó una mayor absorción de agua, a causa de las grietas y/o mayores espacios vacíos por la desunión del bambú con el plástico según lo mencionado Steckel *et al.* (2006) y Klyosov (2007).

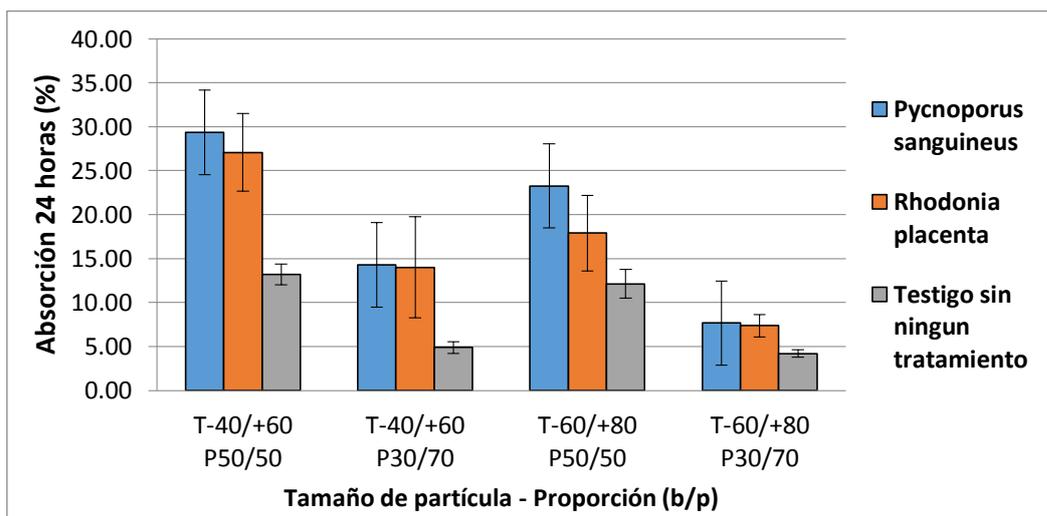


Figura 35: Comparación de la absorción a las 24 horas de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.

En la Tabla 14 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 14: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad (G.L.)	Absorción (24 horas)	
		p-valor	Significancia
H	1	0,0756	n.s.
T	1	<,0001	**
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,4961	n.s.
H*P	1	0,1255	n.s.
T*P	1	0,6604	n.s.
H*T*P	1	0,5079	n.s.
Error	42	<,0001	
Total corregida	55		
C.V.			24,04

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal tamaño de partícula (T) es altamente significativo, ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron diferencias significativas en los valores de absorción de agua, lo cual se validó con los resultados obtenidos de que los compuestos con tamaño de partícula -40/+60 presentaron mayores valores de absorción de agua que con los de tamaño de partículas -60/+80. Así la absorción de agua en los compuestos es afectada por el tamaño de las partículas de bambú, se sabe que dependiendo del tamaño las partículas habrá un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica. Es decir las partículas pequeñas se encapsulan de manera más efectiva en la matriz polimérica, lo que causa que haya menos espacios vacíos por donde circule el agua lo que reduce la absorción de agua según lo mencionado por Wang y Morrel (2004). Por otro lado con mayores tamaños de las partículas hubo más área hidrofílica expuesta a la humedad incrementando la absorción de agua según lo mencionado por Verhey y Laks (2002) y Bouafif *et al.* (2009). Por tanto se cumple una relación directa entre el tamaño de partícula y la absorción de agua.

De la misma manera el factor principal proporción (P) es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componentes del compuesto bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de absorción de agua, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 50/50 (bambú/plástico) presentan mayores valores de absorción de agua que los de proporción 30/70 (bambú/plástico). Así la alta absorción de agua en los compuestos fue afectada por el incremento del contenido de partículas de bambú, es decir el aumento de sus grupos hidroxílicos y por su naturaleza hidrofílica según lo mencionado por Westman, *et al.* (2010) e Ibach (2010). Además por la incompatibilidad entre las partículas y la matriz polimérica lo que generó espacios vacíos y grietas por donde penetra el agua acorde lo mencionado por Klyosov 2007, y Bouafif *et al.* (2009). Por tanto existe una relación directa entre la cantidad de partículas de bambú (proporción) y la absorción de agua. Por otro lado el factor principal tipo de hongo (H), las dobles y triple interacciones resultaron no significativas.

En la Tabla 15 se muestran las diferencias entre los valores de medias de la absorción a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey.

Tabla 15: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad física de absorción de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable	Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Absorción (24 horas)	Ps	18,65	A	-40/+60	21,18	B	50/50	24,40	B
	Pp	16,58	A	-60/+80	14,05	A	30/70	10,83	A

En el caso de la variable tamaño de partícula, -40/+60 presentan un valor más alto de media con respecto a -60/+80. Con respecto a la proporción, la de 50/50 presenta el mayor valor de media con respecto a 30/70. Con respecto a tipo de hongo se observó que no hay diferencias significativas entre los valores de media.

Los valores encontrados de absorción de agua para la proporción 50/50 (>17,9 por ciento) según se muestra en la Tabla 13 para ambos tamaños de partícula y expuestos a ambos tipos de hongos, fueron superiores a los encontrados por Hosseinihashemi *et al.* (2011) con 9,03 y 10,04 por ciento, Kartal *et al.*(2013) con 16,56 por ciento y Cárdenas (2012) con 5,1 por ciento, que trabajaron con proporciones y tamaños de partículas similares y lo expusieron a hongos de pudrición. Esta diferencia se debe a que en los compuestos bambú-plástico del estudio existe poca adherencia o incompatibilidad entre las partículas de bambú y el plástico lo que generó una alta cantidad de espacios vacíos acorde a lo mencionado por Bouafif *et al.* (2009), por el método de fabricación utilizado (moldeo por compresión), por donde penetraron los hongos de pudrición que causaron degradación lo cual que repercutió en los elevados valores de absorción de agua. Estos espacios vacíos se debieron a variables no estudiadas en el presente como el proceso de fabricación y/o tipo de fibra utilizada, etc.

2.3. HINCHAMIENTO

En la Tabla 16 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) del hinchamiento a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a dos hongos de pudrición y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 16: Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Hinchamiento (%)	
				2h	24h
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	1,51 [0,49]	2,16 [0,46]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	0,65 [0,36]	1,52 [0,54]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	1,03 [0,34]	2,48 [0,25]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	0,36 [0,12]	1,11 [0,34]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	1,75 [0,48]	2,49 [0,67]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	0,78 [0,29]	1,15 [0,37]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	1,63 [0,22]	2,85 [0,14]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	0,43 [0,31]	0,88 [0,59]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	1,5 [0,18]	2,0 [0,36]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	0,2 [0,23]	0,6 [0,39]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	1,5 [0,22]	2,3 [0,57]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	0,2 [0,18]	0,5 [0,31]

Los valores promedios del hinchamiento a las 24 horas para las probetas con tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 2,16 y 2,49 por ciento y con proporción 30/70 fueron de 1,52 y 1,15 por ciento; para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 2,48 y 2,85 por ciento y con proporción 30/70 fueron de 1,11 y 0,88 por ciento.

En la Figura 36 se muestra la variación de los valores de hinchamiento a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación. En general se visualiza que el hinchamiento de las probetas para la proporción 50/50 fueron superiores que para la proporción 30/70 para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula. En el caso de tamaño de partícula y tipo de hongo no existen diferencias resaltantes.

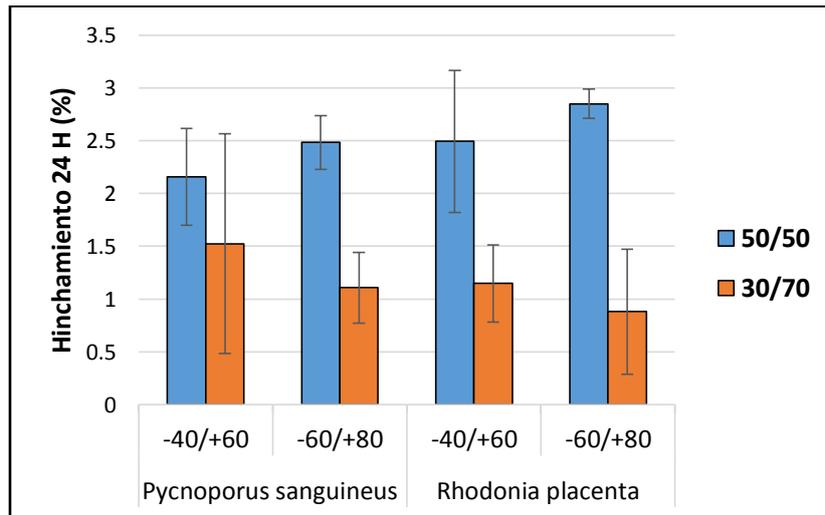


Figura 36: **Hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación**

En la Figura 37 y la Tabla 16 se muestra la comparación del hinchamiento a las 24 horas del compuesto bambú-plástico expuesto a hongos de pudrición con testigos del compuesto bambú-plástico no expuesto a ninguna condición. Se observa que los valores de hinchamiento a las 24 horas de las probetas bambú-plástico expuestas fueron mayores que los valores de las probetas de los testigos sin ningún tratamiento para todas las formulaciones. Por tanto se concluye que la degradación de los compuestos si afectó los valores de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico.

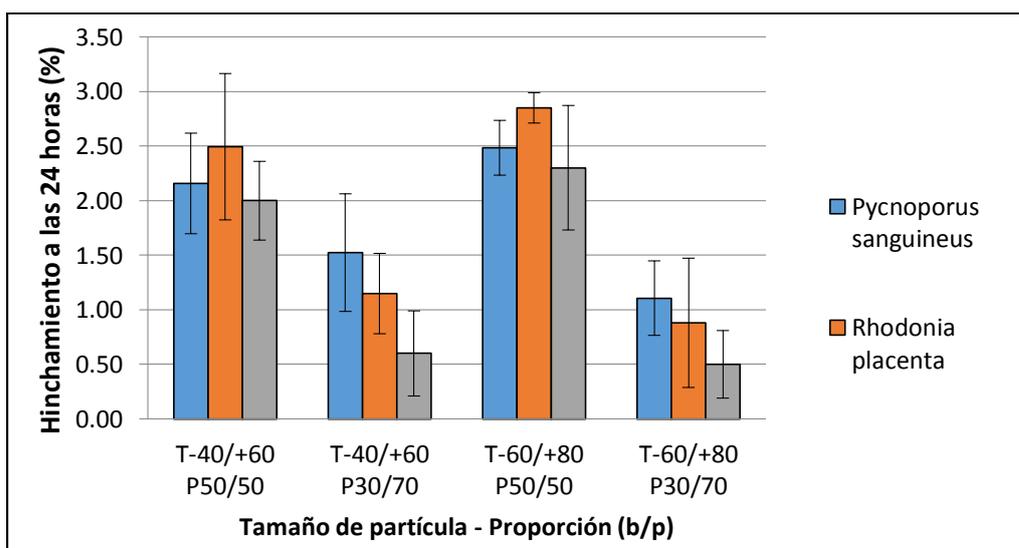


Figura 37: **Comparación del hinchamiento a las 24 horas de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.**

En la Tabla 17 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en el hinchamiento a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 17: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Grados de libertad (G.L.)	Hinchamiento (24 horas)	
		p-valor	Significancia
H	1	0,8684	n.s.
T	1	0,9957	n.s.
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,7689	n.s.
H*P	1	0,0411	*
T*P	1	0,034	*
H*T*P	1	0,8475	n.s.
Error	42	<,0001	
Total corregida	55		
C.V.			29,30

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal proporción (P) es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componente del compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de hinchamiento, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 50/50 (bambú/plástico) presentan mayores valores de hinchamiento que los de proporción 30/70 (bambú/plástico). Así el hinchamiento en los compuestos es afectado con el incremento del contenido de partículas de bambú, es decir el aumento de los grupos hidroxilo del bambú y por su naturaleza hidrofílica acorde a lo afirmado por Westman, *et al.* (2010) e Ibach (2010). Además por la incompatibilidad entre las partículas y la matriz polimérica que generó porosidad y fisuras por donde penetró el

agua según lo mencionado por Klyosov (2007), Steckel *et al.* 2006) y Bouafif *et al.* (2009) que causo el hinchamiento de las partículas de bambú dentro del compuesto.

La doble interacción entre proporción y tamaño de partícula (T*P) fue significativa, ya que los resultados de la doble interacción entre dichos factores resultaron significativas para la variable hinchamiento. En los compuestos el tamaño de partícula depende del contenido de fibra, es decir el haber utilizado una mayor cantidad de partículas y con grandes tamaños de partículas generó una mayor superficie hidrofílica expuesta a la humedad lo que incrementó el hinchamiento y ocurre lo contrario con menores porcentajes y menores tamaños de partículas según lo mencionado por Verhey y Laks (2002), Wang y Morrel (2004) y (Bouafif *et al.* 2009).

De la misma manera, la doble interacción entre proporción con tipo de hongo (H*P) fue significativa, ya que los resultados de la doble interacción entre dichos factores resultaron significativas para la variable hinchamiento. Así el grado de degradación los hongos depende del contenido de bambú en los compuestos, es decir en los compuestos con mayor cantidad de partículas de bambú hubo una mayor penetración de los hongos de pudrición lo que favoreció la desunión entre el bambú y el plástico causando una mayor porosidad y/o fisuras según lo mencionado Steckel *et al.* (2006) y Klyosov (2007) y ello provocó un mayor hinchamiento en los compuestos.

Por otro lado el efecto del tipo de hongo (H), tamaño de partícula (T), la doble interacción entre tipo de hongo y tamaño de partícula (H*T) y la triple interacción (H*T*P) resultaron no significativos.

En la Tabla 18 se muestran las diferencias entre los valores de medias del hinchamiento a las 24 horas de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey. Solo en el caso de la variable proporción hay diferencia significativa, la de 50/50 presenta el mayor valor de media con respecto a 30/70. En el caso de tipo de hongo y tamaño de partícula no existen diferencias significativas entre los valores promedios.

Tabla 18: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad física de hinchamiento de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable	Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Hinchamiento (24 horas)	Ps	1,82	A	-40/+60	1,83	A	50/50	2,50	B
	Pp	1,84	A	-60/+80	1,83	A	30/70	1,17	A

Los valores encontrados para el hinchamiento para la proporción 50/50 (<2,85 por ciento) para ambos tamaños de partícula y expuestos a hongos de pudrición según se muestra en la Tabla 16, son inferiores a los encontrados por Kartal *et al.*(2013) de 9,46 y 9,73 por ciento y Cárdenas (2012) de 10 por ciento que trabajaron con proporciones y tamaños de partículas similares y lo expusieron a hongos de pudrición. Dicha diferencia de valores se debe a que el tiempo de inmersión de las probetas del presente estudio fue de 24 horas en cambio de los estudios mencionados anteriormente fue más prolongado (30 y 200 días respectivamente). Por otro lado los valores encontrados en el presente estudio son cercanos a los encontrados por Hosseinihashemi *et al.* (2011) de 3,61 y 4,10 por ciento, esto debido a que en ambos estudio se utilizó un tiempo de inmersión de las probetas de 24 horas.

3. EVALUACIÓN DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

A continuación se detallan los resultados y discusiones de las propiedades mecánicas donde se evaluaron las variables de flexión, tensión e impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a degradación por dos hongos de pudrición.

3.1. FLEXIÓN

3.1.1. RESISTENCIA MÁXIMA EN FLEXIÓN (MOR)

En la Tabla 19 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a dos hongos de pudrición, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 19: Valores promedios y desviaciones estándar de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Flexión
				Resistencia máxima (Mpa)
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	10,41 [2,92]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	17,62 [3,34]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	13,58 [3,31]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	21,88 [3,08]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	11,87 [3,02]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	20,89 [3,95]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	13,91 [3,52]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	25,29 [1,38]
Thu	Humedad	-40/+60	50/50	12,10 [4,91]
Thu	Humedad	-40/+60	30/70	21,81 [2,12]
Thu	Humedad	-60/+80	50/50	17,05 [3,69]
Thu	Humedad	-60/+80	30/70	23,68 [1,74]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	13,78 [3,10]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	25,40 [2,27]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	22,00 [4,55]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	27,42 [4,77]

Los valores promedios de la resistencia máxima en flexión para las probetas de tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 10,41 y 11,87 MPa y con proporción 30/70 fueron de 17,62 y 20,89 MPa para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 13,58 y 13,91 MPa y con proporción 30/70 fueron de 21,88 y 25,29 MPa.

En la Figura 38 y la Tabla 19 se muestra la variación de los valores de resistencia máxima en flexión (MOR) de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación. En general se visualiza que la resistencia máxima en flexión de las probetas elaboradas con tamaño de partícula -60/+80 presentan mayores valores que los de -40/+60 evaluados para ambos tipos de hongos y tamaños de partículas. Asimismo los valores de la resistencia máxima en flexión para la proporción 30/70 fueron superiores que para la proporción 50/50 ello para ambos tipos de hongos y

ambos tamaños de partícula. Con respecto al tipo de hongo puede notarse que las probetas expuestas al hongo *R. placenta* presentan mayores valores que para el hongo *P. sanguineus* para ambos tamaños de partícula y ambas proporciones.

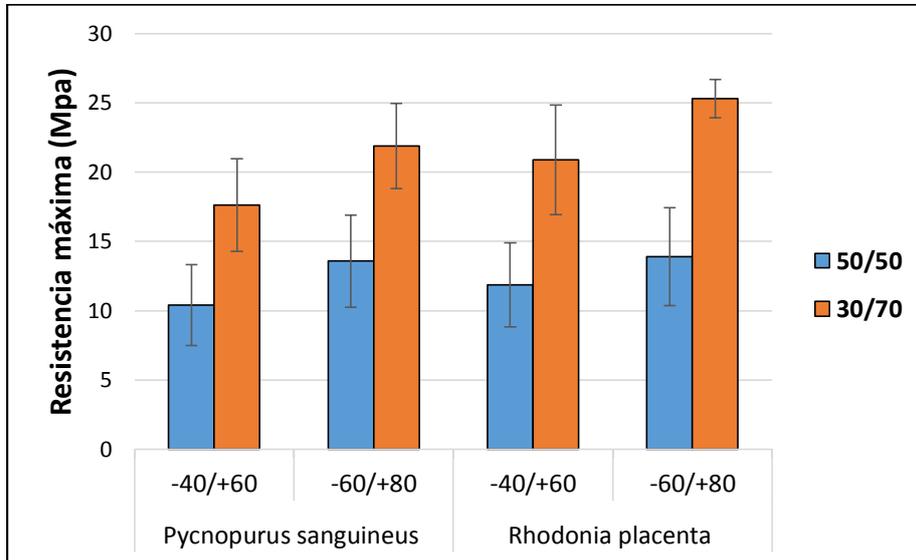


Figura 38: **Resistencia máxima de flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.**

En la Figura 39 y la Tabla 19 se muestra la comparación de la resistencia máxima en flexión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento. Se observa que los valores de resistencia máxima en flexión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuesto para ambas proporciones, tamaño de partícula y tipos de hongo de pudrición disminuyeron relativamente con respecto a los testigos expuestos a humedad además disminuyeron en mayor medida con respecto a los testigos sin ningún tratamiento. La disminución de los valores de la resistencia máxima en flexión (MOR) de los testigos sin ningún tratamiento con respecto a los testigos expuestos a la humedad muestra que los compuestos fueron afectados por la penetración de la humedad por los poros y grietas causando la disminución de dicha propiedad mecánica según lo mencionado por Schirp, *et al.* (2008) y Morrell *et al.* (2010). Además la mayor disminución de los valores de la resistencia máxima en flexión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuestos a los hongos de pudrición con respecto a los testigos sin ningún tratamiento y los testigos expuestos a humedad muestra un efecto conjunto de daños tanto por la humedad como por la degradación de los hongos de pudrición que causaron la pérdida de la resistencia máxima en flexión en las probetas según lo mencionado por Clemons e Ibach (2004).

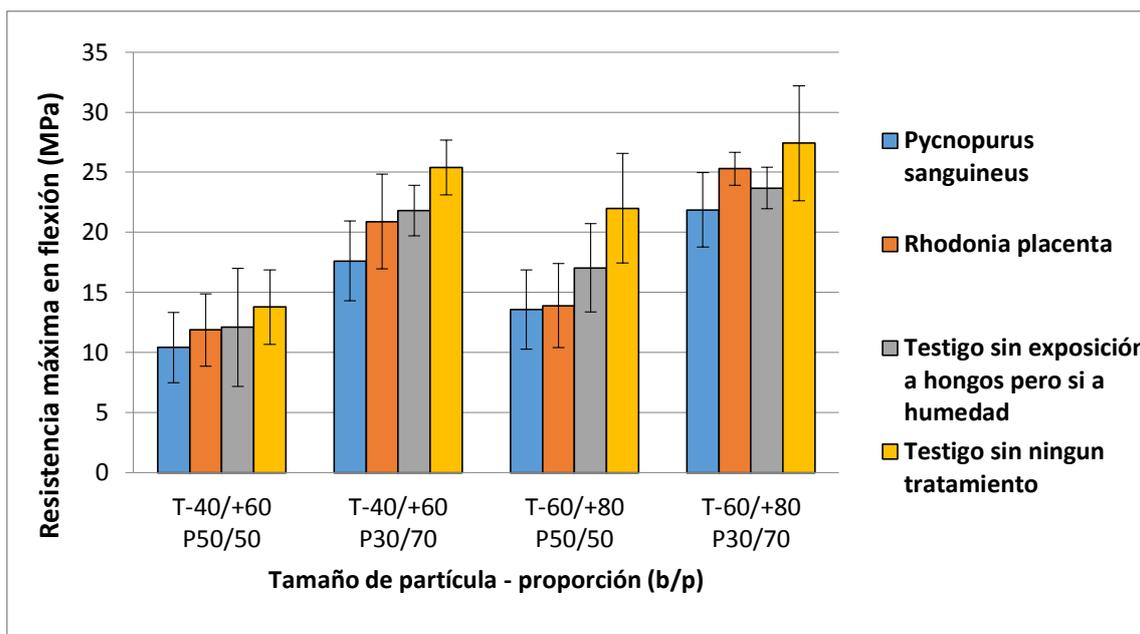


Figura 39: Comparación de la resistencia máxima en flexión (MOR) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.

En la Tabla 20 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 20: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Flexión		
	Grados de libertad (G.L.)	Resistencia máxima (Mpa)	
		p-valor	Significancia
H	1	0,0137	*
T	1	0,0001	**
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,7646	n.s.
H*P	1	0,1447	n.s.
T*P	1	0,3012	n.s.
H*T*P	1	0,6997	n.s.
Error	42	<,0001	
Total corregido	55		
C.V.			18,19

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal tipo de hongo (H) es significativo, ya que dependiendo del tipo de hongo hubo diferencias significativas en los valores de la resistencia máxima en flexión lo cual es validado por los resultados obtenidos que compuestos expuestos al hongo *R. placenta* se presentan los mayores valores que para el hongo *P. sanguineus*. Según Ibach y Clemons (2002), Clemons e Ibach (2004) e Ibach (2010) que la determinación de la pérdida de las propiedades mecánicas en los compuestos se puede utilizar para evaluar los resultados de pérdida de peso. Además hay estudio anteriores que demostraron la pérdida de las propiedades de flexión después de la exposición hongos de pudrición según lo afirmó Morrell *et al.* (2010). Acorde a ello las probetas expuestas a *P. sanguineus* que obtuvieron mayores pérdidas de peso o degradación presentaron menores valores de resistencia máxima en flexión (MOR). Es decir hay una relación inversa entre la degradación y la resistencia máxima en flexión.

El factor principal tamaño de partícula (T) es altamente significativo, ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron diferencia significativas en los valores de resistencia máxima en flexión, lo cual es validado con los resultados obtenidos que los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 presentan mayores valores que con los de -40/+60. Así la resistencia máxima en flexión en los compuestos es afectada por el tamaño de las partículas de bambú, ya que dependiendo del tamaño de las partículas habrá un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica. Es decir las partículas pequeñas son encapsuladas de manera más efectiva por la matriz polimérica según lo mencionado por Verhey y Laks (2002), con lo que aumentaron los valores de resistencia máxima en flexión. Por tanto hay una relación inversa entre el tamaño de partícula y la resistencia máxima en flexión para los compuestos bambú-plástico pero no concordaría por lo señalado por Bouafif *et al.* 2009 y Gozdecki *et al.* (2011).

El factor principal proporción (P) es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componente del compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de resistencia máxima en

flexión, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 30/70 (bambú/plástico) presentaron valores superiores que los de proporción 50/50 (bambú/plástico). Así la resistencia máxima en flexión de los compuestos está afectada por el aumento del contenido de partículas de bambú, lo que disminuye los valores de resistencia máxima (MOR) y viceversa, se cumple con lo señalado por Verhey *et al.* (2003). Por otro lado las dobles interacciones y la triple interacción resultaron no significativas.

En la Tabla 21 se muestran las diferencias entre los valores de medias de la resistencia máxima en flexión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey.

Tabla 21: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey de la resistencia máxima en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable		Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
		Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Flexión	Resistencia	Ps	15,8719	B	-40/+60	15,20	B	50/50	12,44	B
	máxima	Pp	17,9886	A	-60/+80	18,66	A	30/70	21,42	A

En el caso de la variable tipo de hongo el hongo *R. placenta* presenta los mayores valores de media es decir dicho hongo afecto en menor medida dicha variable. En el caso de la variable tamaño de partícula -60/80 presenta el mayor valor de media. En el caso de la proporción 30/70 presenta el mayor de media.

Según los valores de resistencia máxima en flexión hallados para la proporción 50/50 para ambos tamaños de partícula y ambos hongos de pudrición en el presente estudio (< 13,21 MPa) mostrado en la Tabla 19 son inferiores a los hallados por Schirp and Wolcott (2005) de 26,27 y 28,1 MPa y Zabihzadeh *et al.* (2010) de 21 y 21,65 MPa quienes hallaron los valores de resistencia máxima para materiales compuestos expuestos a hongos de pudrición con proporciones cercanas. De la misma manera dichos valores son menores a los encontrados por Stark y Rowlands (2003) de 38,7 y 42,6 MPa, Cárdenas (2012) de 38 MPa y Kociszewski *et al.* (2012) de 58,5 MPa dichos autores no expusieron sus probetas a hongos de pudrición y utilizaron proporciones similares. Estos bajos valores con respecto de los autores mencionados se debería a que las partículas de bambú están actuando como

material de relleno y no como refuerzo por lo tanto no contribuyen a incrementar la resistencia máxima de los compuestos bambú-plástico según lo mencionado por Ibach y Clemons (2002). Otra causas podría ser la pobre unión interfacial entre las partículas de bambú y la matriz polimérica lo que genero espacios vacíos y/o la mayor degradación de los compuestos por los hongos utilizados en este estudio que generaron estos bajos valores de resistencia máxima.

3.1.2. MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FLEXIÓN (MOE)

En la Tabla 22 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico expuestos a expuestos a dos hongos de pudrición, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 22: Valores promedios y desviaciones estándar del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y testigos espuestos a humedad y sin ningún tratamiento.

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Flexión
				Módulo de elasticidad (GPa)
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	0,72 [0,26]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	1,05 [0,24]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	0,94 [0,25]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	1,22 [0,19]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	0,51 [0,15]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	1,09 [0,25]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	0,97 [0,28]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	1,28 [0,16]
Thu	Humedad	-40/+60	50/50	1,18 [0,38]
Thu	Humedad	-40/+60	30/70	1,18 [0,38]
Thu	Humedad	-60/+80	50/50	1,14 [0,23]
Thu	Humedad	-60/+80	30/70	1,47 [0,11]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	0,87 [0,36]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	1,58 [0,30]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	1,70 [0,50]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	1,41 [0,21]

Los resultados de los valores promedios mostrados en la Tabla 22 muestran que el módulo de elasticidad para las probetas de tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 0,72 y 0,51GPa y con proporción 30/70 fueron de 1,05 y 1,09 GPa; para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 0,94 y 0,97 GPa y con proporción 30/70 fueron de 1,22 y 1,28 GPa para ambos hongos de pudrición respectivamente.

En la Figura 40 se muestra la variación de los valores del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuesto a biodegradación. En general se muestra que las probetas elaboradas con la proporción 30/70 presentaron mayores valores que los de la proporción 50/50 para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula. Asimismo los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 presentaron mayores valores que los de -40/+60 evaluados para ambos tipos de hongos y tamaños de partículas. Con respecto al tipo de hongo se visualiza valores similares para ambas proporciones y tamaños de partícula.

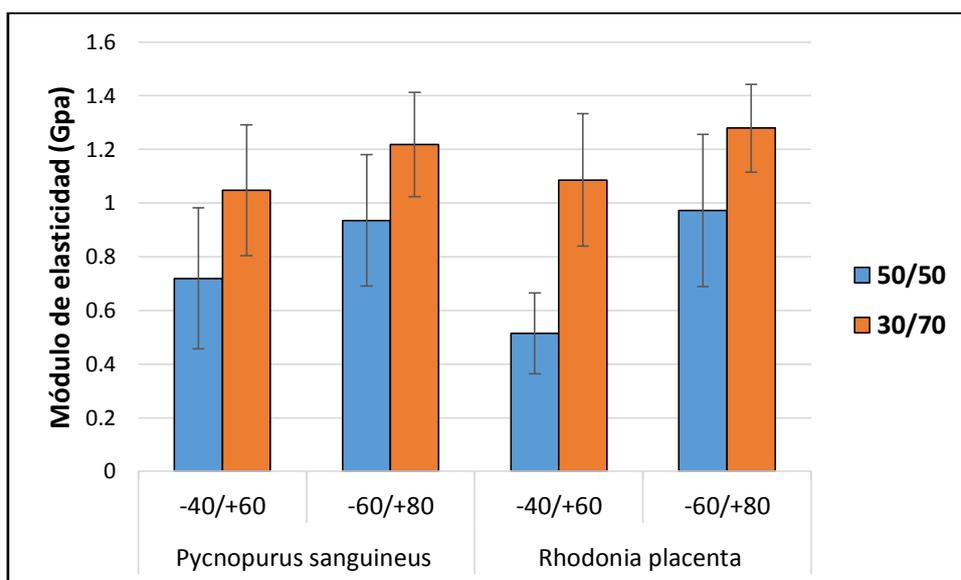


Figura 40: **Módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.**

En la Figura 41 y la Tabla 22 se muestra la comparación del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento. Se observa que los valores del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico expuesto para ambas proporciones, tamaño de partícula y tipos de hongo de pudrición es muy variada con respecto a los testigos sin ningún tratamiento. Por otro lado los valores del

módulo de elasticidad en flexión de los testigos expuestos a humedad son mayores que los del compuesto bambú-plástico. Según lo cual no se puede determinar si la humedad y/o los hongos causaron algún efecto negativo en los valores del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico.

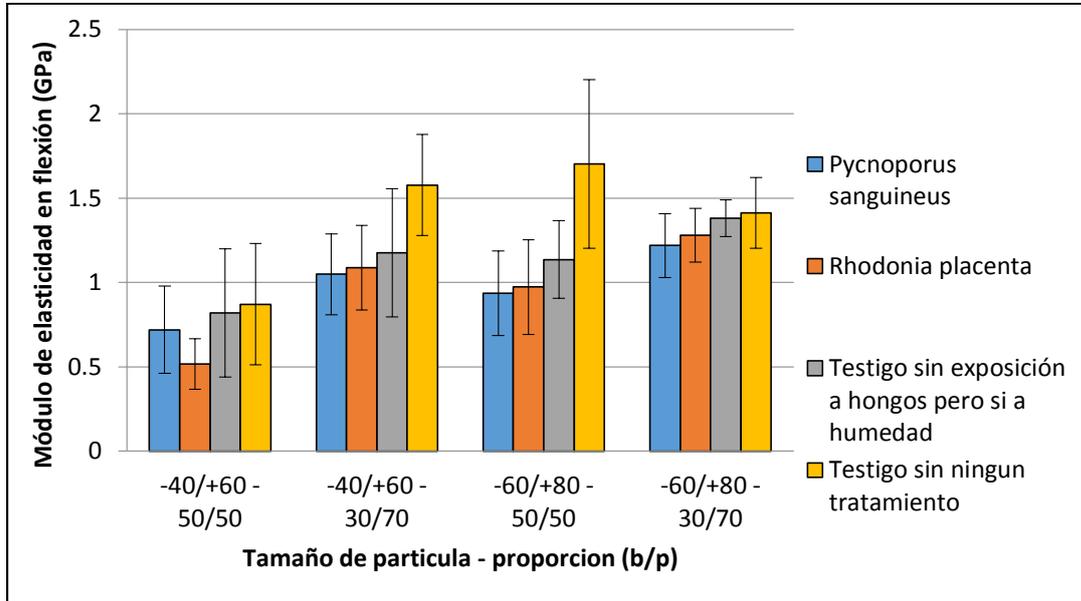


Figura 41: **Comparación módulo de elasticidad en flexión (MOE) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.**

En la Tabla 23 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 23: Valores del análisis de variancia (ANOVA) del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Flexión		
	Grados de libertad (G.L.)	Módulo de elasticidad (GPa)	
		p-valor	Significancia
H	1	0,7735	n.s.
T	1	<,0001	**
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,2688	n.s.
H*P	1	0,2632	n.s.
T*P	1	0,1963	n.s.
H*T*P	1	0,3579	n.s.
Error	42	<,0001	
Total corregido	55		
C.V.		22,74	

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal tamaño de partícula (T) es altamente significativo, ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron diferencias significativas en los valores de módulo de elasticidad en flexión, lo cual es validado con los resultados obtenidos que los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 presenta mayores valores que con los de -40/+60. Así el módulo de elasticidad en flexión en los compuestos es afectado por el tamaño de las partículas de bambú, se sabe que dependiendo del tamaño las partículas habrá un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica. Es decir las partículas pequeñas son encapsuladas de manera más efectiva por la matriz polimérica según lo mencionado por Verhey y Laks (2002), con lo que aumentaron los valores del módulo de elasticidad en flexión. Por tanto hay una relación inversa entre el tamaño de partícula y el módulo de elasticidad en flexión.

El factor principal proporción (P) es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componentes del compuesto bambú-plástico expuestos a hongos de

putrefacción presentaron diferencias significativas en los valores del módulo de elasticidad en flexión, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 30/70 (bambú/plástico) presentaron valores superiores que los de proporción 50/50 (bambú/plástico). Así el módulo de elasticidad en flexión de los compuestos está afectada por el aumento del contenido de partículas de bambú, lo que disminuye los valores de módulo de elasticidad (MOE), se cumple con lo señalado por Lu *et al.* (2005) pero no coincidió con lo afirmado por Verhey *et al.* (2003). Por otro lado el factor principal tipo de hongo (H) y las dobles interacciones y la triple interacción resultaron no significativos.

En la Tabla 24 se muestran las diferencias entre los valores de medias del módulo de elasticidad en flexión (MOE) de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey. En el caso de la variable tamaño de partícula (T) presenta un mayor valor de media para -60/80. En el caso de la variable proporción (P) obtuvo un mayor valor de media para la proporción 30/70. Con respecto a tipo de hongo se observó que no hay diferencias significativas entre los valores promedios.

Tabla 24: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey del módulo de elasticidad en flexión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable		Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
		Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Flexión	Módulo de elasticidad	Ps	0,98	A	-40/+60	0,84	B	50/50	0,79	B
		Pp	0,96	A	-60/+80	1,10	A	30/70	1,16	A

Según los valores del módulo de elasticidad en flexión hallados para la proporción 50/50 para ambos tamaños de partícula y ambos hongos de pudrición en el presente estudio (< 0,97 GPa) mostrado en la Tabla 22 son inferiores a los hallados por Schirp and Wolcott (2005) de 1,35 y 1,49 GPa y Zabihzadeh *et al.* (2010) de 2,44 y 2,64 GPa quienes hallaron los valores de resistencia máxima para materiales compuestos expuestos a hongos de pudrición con proporciones cercanas. De la misma manera dichos valores son menores a los encontrados por Stark y Rowlands (2003) de 2,69 y 3,15 GPa, Cárdenas (2012) de 0,9 GPa y Kociszewski *et al.* (2012) de 4,9 GPa dichos autores no expusieron sus probetas a hongos de pudrición y utilizaron proporciones cercanas. Estos bajos valores con respecto a los de los autores mencionados se deberían a que las partículas de bambú están actuando como material de relleno y no como refuerzo por lo tanto no contribuyen a incrementar la

resistencia máxima de los compuestos bambú-plástico según lo mencionado por Ibach y Clemons (2002). Otra causas podrían ser la pobre unión interfacial entre las partículas de bambú y la matriz polimérica lo que generó espacios vacíos a causa de factores no ensayados en este estudio (proceso de fabricación, tipo de fibra, etc.) y/o la mayor degradación de los compuestos por los hongos utilizados en este estudio que generaron estos bajos valores de módulo de elasticidad.

3.2. TENSION

En la Tabla 25 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) de la resistencia máxima en tensión de los compuestos bambú-plástico expuestos a dos hongos de pudrición, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 25: Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación, testigos expuestos a humedad (Thu) y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Tensión
				Resistencia máxima (Mpa)
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	8,03 [1,18]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	12,64 [1,98]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	10,36 [0,73]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	14,99 [2,65]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	7,70 [0,63]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	12,55 [1,47]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	12,09 [1,21]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	15,38 [1,59]
Thu	Humedad	-40/+60	50/50	8,20 [0,68]
Thu	Humedad	-40/+60	30/70	13,80 [1,87]
Thu	Humedad	-60/+80	50/50	9,30 [0,90]
Thu	Humedad	-60/+80	30/70	13,04 [1,51]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	10,62 [3,13]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	14,07 [2,35]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	13,62 [1,41]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	16,47 [3,66]

Los valores promedios de la resistencia máxima en tensión para las probetas de tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 8,03 y 7,70 MPa y con proporción 30/70 fueron de 12,64 y 12,55 MPa; para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 10,36 y 12,09 MPa y con proporción 30/70 fueron de 14,99 y 15,38 MPa.

En la Figura 42 se muestra la variación de los valores de resistencia máxima en tensión (MOE) de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación. En general se visualizó que la resistencia máxima en tensión de las probetas elaboradas con tamaño de partícula -60/+80 presentan mayores valores que los de -40/+60 evaluados para ambos tipos de hongos y tamaños de proporción. Asimismo los valores de la resistencia máxima en tensión para la proporción 30/70 fueron superiores que para la proporción 50/50 ello para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula. Con respecto al tipo de hongo puede verse que las probetas expuestas al hongo *R. placenta* presentan ligeramente mayores valores que para el hongo *P. sanguineus* para ambos tamaños de partícula y ambas proporciones.

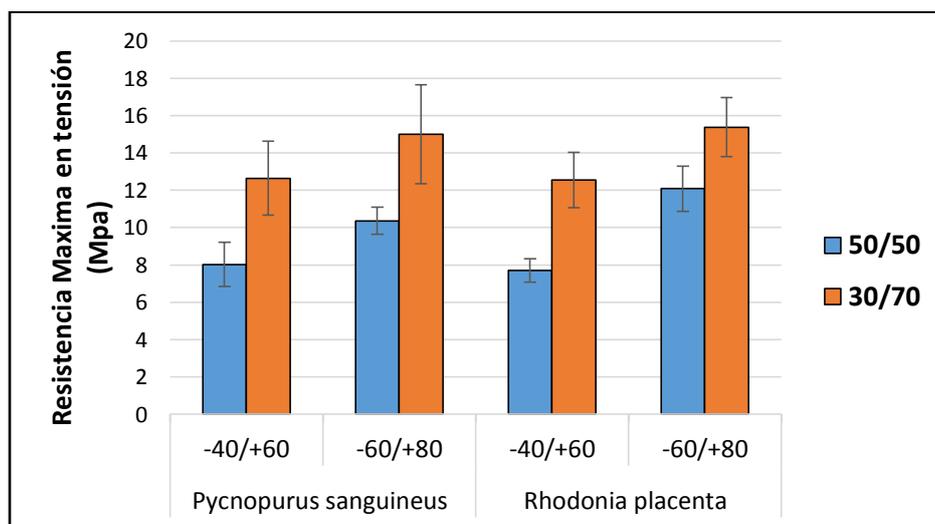


Figura 42: **Resistencia máxima en tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.**

En la Figura 43 y la Tabla 25 se muestra la comparación de la resistencia máxima en tensión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento. Se observó que los valores de resistencia máxima en tensión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuesto para ambas proporciones, tamaño de partícula y tipos de hongo de pudrición y los testigos expuestos a humedad son menores con respecto a los testigos sin ningún tratamiento. En

cambio la comparación de los valores de resistencia máxima en tensión (MOR) de los compuestos bambú-plástico con respecto a los testigos expuestos a humedad es muy variado. Dichos resultados nos muestran que en algunos casos la humedad causó mayores efectos negativos que los hongos de pudrición según lo afirmado por Schirp, *et al.* (2008) pero en otros casos lo causaría el efecto combinado de ambos factores. Es decir la posible separación de la matriz polimérica con las fibras de bambú causa grietas por donde penetra la humedad y ello permite la degradación de los hongos según lo afirmado por Morrell *et al.* (2010) repercute en la pérdida de la resistencia en tensión.

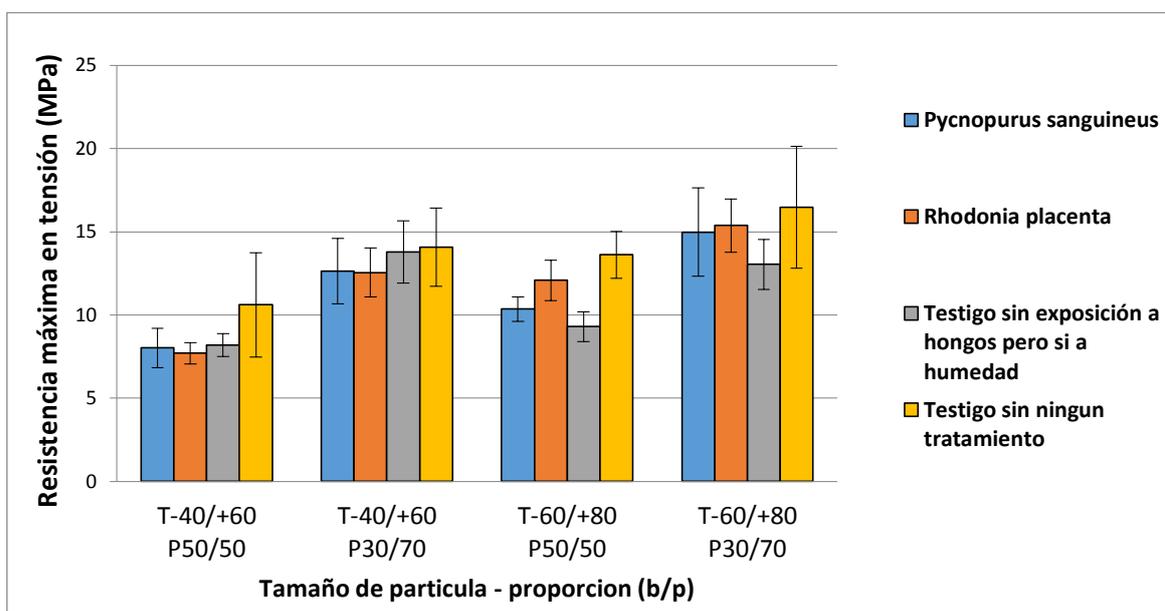


Figura 43: **Comparación de la resistencia máxima en tensión (MOR) de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición, con testigos expuestos a humedad y con testigos sin ningún tratamiento.**

En la Tabla 26 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción en la variable resistencia máxima en tensión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 26: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Tensión		
	Grados de libertad (G.L.)	Resistencia máxima (Mpa)	
		p-valor	Significancia
H	1	0,4308	n.s.
T	1	<,0001	**
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,2315	n.s.
H*P	1	0,6561	n.s.
T*P	1	0,3877	n.s.
H*T*P	1	0,3182	n.s.
Error	37	<,0001	
Total corregida	50		
C.V.			13,51

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico.

C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal tamaño de partícula (T) es altamente significativo ya que dependiendo del tamaño de partícula de bambú utilizada en el compuesto bambú-plástico se presentaron diferencias significativas en los valores de resistencia máxima en tensión, lo cual es validado con los resultados obtenidos que los compuestos con tamaño de partícula -60/+80 que presentan mayores valores que con los de -40/+60. Así la resistencia máxima en tensión en los compuestos es afectada por el tamaño de las partículas de bambú, ya que dependiendo del tamaño de estas habrá un grado de encapsulamiento en la matriz polimérica. Es decir las partículas pequeñas son encapsuladas de manera más efectiva por la matriz polimérica según lo mencionado por Verhey y Laks (2002), con lo que aumentaron los valores de resistencia máxima en tensión. Por tanto hay una relación inversa entre el tamaño de partícula y la resistencia máxima en tensión para los compuestos bambú-plástico pero no se concordaría con lo señalado por Bouafif *et al.* (2009) y Gozdecki *et al.* (2011).

De mismo modo el factor principal proporción es altamente significativo, ya que dependiendo de las proporciones de los componente del compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de resistencia máxima en tensión, lo cual se validaron con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 30/70 (bambú/plástico) presentaron valores superiores que los de proporción 50/50 (bambú/plástico). Así la resistencia máxima en flexión de los compuestos está afectada por la disminución del contenido de partículas de bambú, lo que aumenta los valores de resistencia máxima en tensión (MOR) y viceversa, según lo señalado por Lu *et al.* (2005) y Verhey *et al.* (2003). Por otro lado el factor principal tipo de hongo (H), las dobles interacciones y la triple interacción resultaron no significativos.

En la Tabla 27 se muestran las diferencias entre los valores de medias de la resistencia máxima en tensión (MOR) de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey.

Tabla 27: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de tensión de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable		Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
		Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Tensión	Resistencia máxima	Ps	5,85	A	-40/+60	5,16	B	50/50	4,82	B
		Pp	5,95	A	-60/+80	6,62	A	30/70	6,95	A

En el caso de la variable tamaño de partícula el de -60/80 presenta el mayor valor de media. En el caso de la proporción la de 30/70 presenta el mayor de media. Con respecto a tipo de hongo se observó que no hay diferencias significativas entre los valores promedios.

Según los valores resistencia máxima en tensión hallados para todas las formulaciones (<15,38MPa) mostrados en la Tabla 25 son inferiores a los hallados por Stark y Rowlands (2003) de 21,7 y 25,5 MPa; Cárdenas (2012) de 21 MPa y Kociszewski *et al.* (2012) de 35,2 MPa que no expusieron sus probetas a hongos de pudrición. Estos bajos valores con respecto a los de los autores mencionados se debio a que las partículas de bambú actuaron como material de relleno y no como refuerzo por lo tanto no contribuyen al incremento de la resistencia máxima en tensión de los compuestos bambú-plástico según lo mencionado por

Ibach y Clemons (2002). Otra causas puede ser la pobre unión interfacial entre las partículas de bambú y la matriz polimérica lo que genero espacios vacíos debido a variables no estudiadas en el presente estudio (fallas en el proceso de fabricación, el tipo de fibra, etc) lo que favoreció el ingreso de la humedad y/o la mayor degradación de los compuestos por los hongos utilizados en este estudio que generaron estos bajos valores de resistencia máxima en tensión.

3.3. IMPACTO

En la Tabla 28 se muestran los valores promedio y las desviaciones estándar (en corchetes) del impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a expuestos a dos hongos de pudrición y los testigos sin ningún tratamiento (Tst) de las formulaciones en estudio.

Tabla 28: Valores promedios y desviaciones estándar de la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación y los testigos sin ningún tratamiento (Tst).

Formulación	Factor de Exposición	Tamaño de partícula (mesh)	Proporción (bambú/plástico)	Impacto
				Energía (J)
F1	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	50/50	0,33 [0,04]
F2	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-40/+60	30/70	0,53 [0,13]
F3	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	50/50	0,34 [0,11]
F4	Hongo <i>Pycnoporus sanguineus</i>	-60/+80	30/70	0,48 [0,08]
F5	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	50/50	0,38 [0,09]
F6	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-40/+60	30/70	0,50 [0,08]
F7	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	50/50	0,34 [0,05]
F8	Hongo <i>Rhodonia placenta</i>	-60/+80	30/70	0,53 [0,07]
Tst	Ninguno	-40/+60	50/50	0,3 [0,09]
Tst	Ninguno	-40/+60	30/70	0,4 [0,05]
Tst	Ninguno	-60/+80	50/50	0,4 [0,05]
Tst	Ninguno	-60/+80	30/70	0,4 [0,07]

Los valores promedios del impacto para las probetas de tamaño de partícula -40/+60 con proporción 50/50 fueron de 0,33 y 0,38 J con proporción 30/70 fueron de 0,53 y 0,50 J; para el tamaño de partícula -60/+80 con proporción 50/50 fueron de 0,34 y con proporción 30/70 fueron de 0,48 y 0,53 J.

En la Figura 44 se muestra la variación de los valores de impacto de los compuestos bambú-plástico elaborado con diferentes formulaciones y expuestos a biodegradación. En general se

visualiza los valores de impacto de los compuestos elaborados con proporción 30/70 fueron superiores que con la proporción 50/50 para ambos tipos de hongos y ambos tamaños de partícula. Con respecto al tipo de hongo y tamaño de partícula se visualizan valores similares para ambas proporciones.

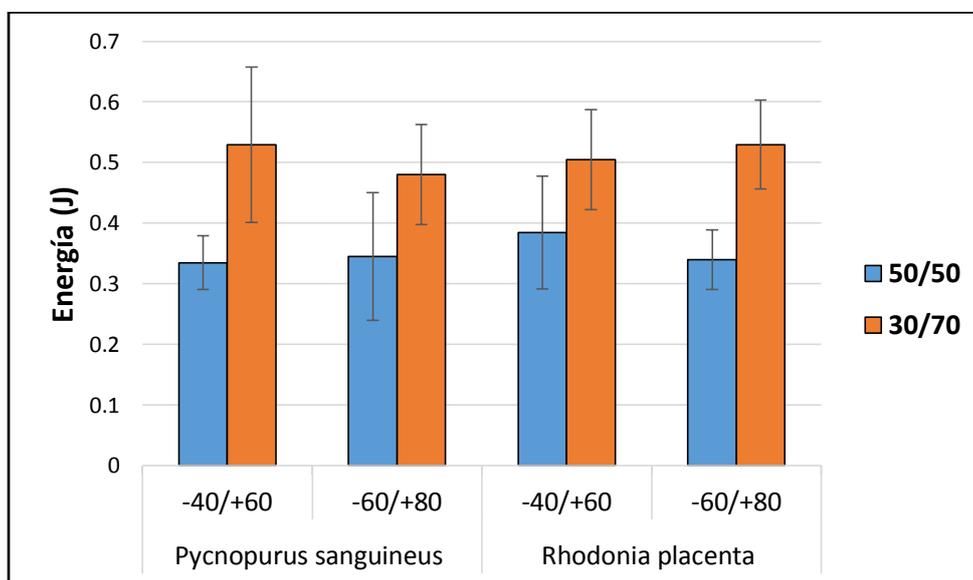


Figura 44: **Prueba de Impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación**

En la Figura 45 y la Tabla 28 se muestra la comparación del impacto del compuesto bambú-plástico expuesto a hongos de pudrición con testigos del compuesto bambú-plástico no expuesto a ninguna condición. Se observa que en la mayoría de casos los testigos presentaron menores valores de impacto que los compuestos bambú-plástico expuestos a los hongos de pudrición con excepción de la las probetas con tamaño de partícula -60/+80 y proporción 50/50. Dicha tendencia nos muestra que los hongos de pudrición no afectaron los valores de impacto de las probetas de compuestos bambú-plástico.

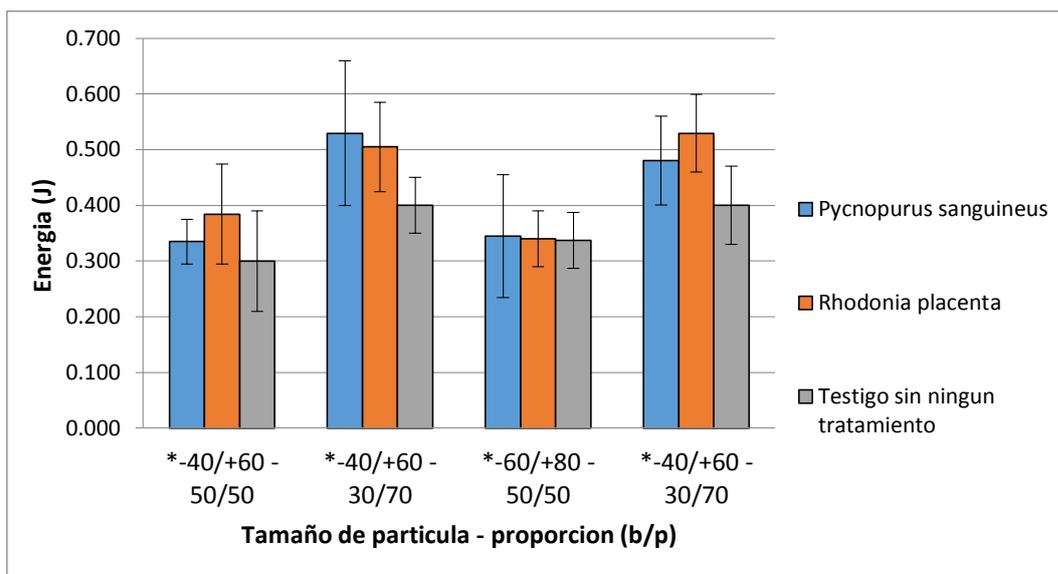


Figura 45: Comparación de impacto de compuestos bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición con testigos sin ningún tratamiento.

En la Tabla 29 se muestra el análisis estadístico de variancia (ANOVA) que se llevó a cabo para determinar la significancia de los efectos del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción para la variable impacto de los compuestos bambú-plástico expuestos a biodegradación.

Tabla 29: Valores del análisis de variancia (ANOVA) de la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Fuente de variabilidad	Impacto		
	Grados de libertad (G.L.)	p-valor	Significancia
H	1	0,4109	n.s.
T	1	0,3668	n.s.
P	1	<,0001	**
H*T	1	0,3688	n.s.
H*P	1	0,437	n.s.
T*P	1	0,7577	n.s.
H*T*P	1	0,1245	n.s.
Error	37	0,0011	
Total corregida	50		
C.V.		21,61	

Donde:

H: efecto principal del factor tipo de hongo, T: efecto principal del factor tamaño de partícula, P: efecto principal del factor proporción bambú/plástico, H*T: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y

tamaño de partícula, H*P: efecto entre la doble interacción del tipo de hongo y proporción bambú/plástico, T*P: efecto entre la doble interacción del tamaño de partícula y la proporción bambú/plástico, H*T*P: efecto entre la triple interacción del tipo de hongo, tamaño de partícula y proporción bambú/plástico. C.V.: coeficiente de variabilidad; n.s.: no significativo; *: significativo; **: muy significativo.

Los resultados de este análisis mostraron que el factor principal proporción es altamente significativo ya que dependiendo de las proporciones de los componente del compuesto bambú-plástico expuestos a hongos de pudrición presentaron diferencias significativas en los valores de impacto, lo cual se validó con los resultados obtenidos que los compuestos con proporción 30/70 (bambú/plástico) presentaron valores superiores que los de proporción 50/50 (bambú/plástico). Así el impacto está afectado por el aumento del contenido de partículas de bambú, lo que causo una mayor cantidad espacios en su estructura por la poca adhesión del plástico con las partículas del bambú, lo que trajo como consecuencia una menor disipación de la energía y por tanto menores valores de impacto. Por otro lado el factor principal tamaño de partícula (T), tipo de hongo (H), las dobles interacciones y la triple interacción resultaron no significativos.

En la Tabla 30 se muestran las diferencias entre los valores de medias del impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación que se comprobaron mediante la prueba Tukey.

Tabla 30: Determinación de valores de la comparación múltiple de medias por medio de la prueba de Tukey para la propiedad mecánica de impacto de los compuestos bambú-plástico expuesto a biodegradación.

Variable		Tipo de hongo			Tamaño de partícula			Proporción bambú/plástico		
		Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey	Nivel	Media	Tukey
Impacto	Energía	Ps	0,42	A	-40/+60	0,44	A	50/50	0,34	B
		Pp	0,42	A	-60/+80	0,41	A	30/70	0,50	A

En el caso de la proporción la de 30/70 presenta el mayor de media. Con respecto a tamaño de partícula y tipo de hongo se observó que no hay diferencias significativas entre los valores promedios.

Según los valores de impacto hallados para todas las formulaciones (< 0,53 J) mostrados en la Tabla 28 son mucho menores a los hallados por Zabihzadeh *et al.* (2010) de 9,98 y 10,18

J quienes hallaron los valores de impacto para materiales compuestos expuestos a hongos de pudrición. De la misma manera resultaron inferiores a los hallados por autores que no expusieron los compuestos a hongos de pudricion como Stark y Rowlands (2003) de 19,7 y 22,3 J, Cárdenas (2012) de 6,67 J y Kociszewski *et al.* (2012) 10,6 J. Estos bajos valores se debió a causa de la pobre unión interfacial entre las partículas de bambú y el plástico por variables no estudiadas en esta investigación (fallas en la fabricación, tipo de fibra, etc) que generó de espacios vacíos que provocó una menor disipación de la energía y no tanto por la degradación de los hongos.

V. CONCLUSIONES

- 1) Los compuestos bambú-plástico son altamente resistentes a la degradación por los hongos *Pycnoporus sanguineus* de pudrición blanca y *Rhodonía placenta* de pudrición marrón.
- 2) El plástico de polipropileno que encapsula a las partículas de bambú, le confiere mayor resistencia a la degradación al material compuesto, limitando significativamente la acción destructiva de los hongos de pudrición.
- 3) La proporción y tamaño de partículas de bambú (*Guadua angustifolia*) influye significativamente en la resistencia a la pudrición de los compuestos bambú-plástico, siendo la relación entre ellos inversa y directamente proporcional, respectivamente.
- 4) Pese a que la degradación causada por los dos hongos de pudrición es baja, la acción destructiva de *Pycnoporus sanguineus* es significativamente mayor que la acción destructiva de *Rhodonía placenta*.
- 5) La degradación causada por los hongos de pudrición en los compuestos bambú-plástico influye en las propiedades físicas de absorción e hinchamiento con una relación directamente proporcional. Asimismo, influye en la densidad con una relación inversamente proporcional.
- 6) La proporción de partículas de bambú en el material compuesto influye significativamente en las propiedades físicas de absorción e hinchamiento, con una relación directamente proporcional. Por otro lado, influye significativamente con una relación inversamente proporcional en la densidad.
- 7) El tamaño de partículas de bambú en el material compuesto influye significativamente en las propiedades físicas de densidad e hinchamiento del compuesto, con una relación inversamente proporcional. Por otro lado, influye significativamente con una relación directamente proporcional en la absorción.

- 8) La degradación causada por los hongos de pudrición y el tamaño de partículas de bambú en el material compuesto influyen significativamente en las propiedades mecánicas de flexión y tensión con una relación inversamente proporcional; sin embargo, no influyen significativamente en la propiedad mecánica de impacto.
- 9) La proporción de partículas de bambú en el material compuesto influye significativamente en las propiedades mecánicas de flexión, tensión e impacto del compuesto con una relación inversamente proporcional.

VI. RECOMENDACIONES

- Evaluar la influencia del método de fabricación en el comportamiento del compuesto bambú-plástico frente a la degradación por hongos de pudrición.
- Complementar el presente estudio de degradación biológica con estudios de exposición a insectos.
- Realizar estudios adicionales de degradación de compuestos bambú-plástico en condiciones de campo.
- Se puede reemplazar el suelo orgánico por vermiculita aserrín, musgo, etc. como medios para proporcionar humedad en las cámaras de incubación.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society for Testing and Materials. 1998. Standard Test Method for Water Absorption of Plastics. ASTM D570 -98. 4 p.
- _____. 1999. Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials. ASTM D1037-99. 30p.
- _____. 2003a. Standard Test Method for Tensile Properties for Plastics. ASTM D638-03. 15 p.
- _____. 2003b. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials ASTM D790-03. 11 p.
- _____. 2005. Standard Method of Accelerated Laboratory Test of Natural Decay Resistance of Woods. ASTM D2017-05. 5 p.
- _____. 2010. Standard Test Method for Impact Resistance of Flat, Rigid Plastic Specimen by Means of a Striker Impacted by a Falling Weight (Gardner Impact). ASTM D5420-10. 8 p.
- Bambusa Estudio. 2015. Cañas de Guadua: Morfología de la *Guadua angustifolia* Kunth. (En línea). Consultado 4 jul. 2016. Disponible en <http://bambusa.es/bambu-caracteristicas/bambu-guadua/>.
- Besednjak, A. 2005. Materiales compuestos: Procesos de fabricación de embarcaciones. ES, Ediciones UPC. 133 p.
- Botero, L. 2004. Manual de industrialización del bambú. Buenos Aires, AR. 117 p.
- Bouafif, H; Koubaa, A; Perré, P; Cloutier, A. 2009. Effects of fiber characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. Composites: Part A Applied Science and Manufacturing 40: 1975-1981.

- Bouza, R. 2008. Diseño y caracterización de nuevos materiales compuestos polipropileno y madera: estudio del viniltrimetoxilano como agente de acoplamiento. Tesis Ph.D. Coruña, ES, Universidad de Coruña. 242 p.
- Bowyer, J; Fernholz, K; Bratkovich, S; y Howe, J. 2010. Wood-Plastic Composites Lumber vs Wood Decking: A comparison of performance characteristics and environmental attributes. (En línea). Consultado 2 mar. 2015. Disponible en: http://www.dovetailinc.org/report_pdfs/2010/dovetailplasticdeck0710.pdf.
- Burgos, A. 2003. Revisión de las técnicas de preservación del bambú. Revista Forestal Latinoamericana no. 33: 11-20.
- Callister, W. 2007. Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales 2. Barcelona, ES, Reverte. 834 p.
- Cárdenas, A. 2012. Evaluación de la eficiencia como preservante antifúngico del borato de zinc y su efecto en las propiedades físicas y mecánicas de materiales compuestos de plástico y madera de pino. Tesis Mag. Sc. Guadalajara, MX, Universidad de Guadalajara. 145 p.
- Castaño, F; Moreno, J. 2004. Guadua para todos: Cultivo y aprovechamiento. Bogotá, CO. 190 p.
- Caulfield, D.F; Clemons, C; Jacobson, R.E; Rowell, R.M. 2005. Handbook of Wood Chemistry and Wood Composites: Wood-thermoplastic composites. Ed. R Rowell. Florida, US, CRC Press. 378 p.
- Clemons, C; Ibach, R. 2004. Effects of processing method and moisture history on laboratory fungal resistance of wood-HDPE composites. Forest Products Journal 54(4):50-57.
- Clemons, C. 2008. Wood-polymer composites: Raw materials for wood-polymer composites. Eds. K Niska; M Sain. Cambridge, UK, Woodhead Publishing Limited. 163 p.
- Cornish, M. 1997. El ABC de los Plásticos. Ciudad de México, MX, Universidad Iberoamericana. 138 p.
- Cruz, H. 2009. BAMBÚ-GUADUA: Guadua angustifolia Kunth, Bosques Naturales en Colombia y Plantaciones Comerciales en México. Pereira, CO, Pereira Agromod. 634 p.

- De Garmo, E; Temple-Black, J; Kohser, R. 1994. *Materiales y procesos de fabricación*. 2 ed. Barcelona, ES, Reverté. v. 2, 159 p.
- Eaton, R.A; Hale, M.D.C. 1993. *Wood: Decay, Pests and Protection*. London, UK, Chapman & Hall. 546 p.
- Forest Products Laboratory. 2010. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. General Technical Report FPL- GTR-190. Madison, US, Department of Agriculture, Forest Service. 508 p.
- Gnatowski, M. 2005. *Water Absorption and Durability of Wood Plastic Composites*. Proceedings of the 10th International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites. Madison, US. p. 90-109.
- Gozdecki, C; Zajchowski, S; Kociszewski, M; Wilczynski, A; Mirowski, J. 2011. Effect of wood particle size on mechanical properties of industrial wood particle-polyethylene composites. *Polimery* 56(5): 375-380.
- Hidalgo, O. 2003. *Bamboo: The Gift of the Gods*. Bogotá, CO. 553 p.
- H'ng, P; Lee, A; Hang, C; Lee, S; Khalina, A; Paridah, M. 2011. Biological durability of injection moulded wood plastic composite boards. *Journal of Applied Sciences* 11(2): 384-388.
- Hosseinihashemi, S; Modirzare, M; Safdari, V; Behzad K. 2011. Decay resistance, hardness, water absorption, and thickness swelling of a bagasse fiber/plastic composites. *BioResources* 6 (3): 3289-3299.
- Hunt, G; Garrat, G. 1962. *Preservación de la madera*. Madrid, ES, Salvat. 482 p.
- Ibach, R. 2010. *Encyclopedia of Science & Technology: Durability of wood-plastic composite lumber*. Nueva York, US, McGraw-Hill. pp. 113-116.
- _____; Clemons, C. 2002. Biological resistance of polyethylene composites made with chemically modified fiber or flour. *Proceedings of Sixth Pacific-Rim Bio- Based Composites Symposium*. Oregon, US. pp. 574-583.
- Kartal, N; Sema, A; Evren, T; Yilgör, N; Yoshimura, T; Tsunoda, K. 2013. Wood and Bamboo-PP Composites: Fungal and Termite Resistance, Water Absorption, and FT-IR Analyses. *BioResources* 8(1): 1222-1224.

- Kharvkine, M; Kazayawoko, S; Law, S; Balatinecz, J.J. 2000. Durability of wood flour-thermoplastic composites under extreme environmental conditions and fungal exposure. *International Journal Polymer Materials* 46(1-2): 255-269.
- Klyosov, A. 2007. *Wood-Plastic Composites*. New Jersey, US, John Wiley & Sons Inc. 673 p.
- Kociszewski, M; Gozdecki, C; Wilczynski, A; Zajchowski, S; Mirowski, J. 2012. Effect of industrial wood particle size on mechanical properties of wood-polyvinyl chloride composites. *European Journal Wood Products* no 70: 113-118.
- Lee, B; Kim, H; Yu, W. 2009. Fabrication of Long and Discontinuous Natural Fiber Reinforced Polypropylene Biocomposites and their Mechanical Properties. *Fiber and Polymers* 10(1): 83-90.
- Liese, W. 1985. Anatomy and properties of bamboo. Report of International Bamboo Workshop. Hangzhou, CN. p. 196-208.
- _____. 2004. Preservation of a bamboo culm in relation to its structure. Simposio internacional Guadua 2004. Pereyra, CO. p. 20-29.
- Londoño, X. 2000. La Guadua un gigante dormido. *Memorias de Seminario: Guadua en la reconstrucción*. Quindío, CO, Chasqui Red de Comunicaciones. pp. 3-7.
- _____; Camayo, G; Riaño, N; López, Y. 2002. Caracterización anatómica del culmo de *Guadua angustifolia* Kunth (Poaceae: Bambusoideae). *Bamboo, Science and Culture: The Journal of The American Bamboo Society*. 16(1):18-31.
- Lu, J; Wu, Q; Negulescu, I. 2005. Wood-Fiber/High-Density-Polyethylene Composites: Coupling Agent Performance. *Journal of Applied Polymer Science* no 96: 93-102.
- Mankowski, M; Morrell, J. 2000. Patterns of fungal attack in wood-plastic composites following exposure in a soil block test. *Wood Fiber Science* 32(3): 340-345.
- Morrell, J; Stark, N; Pendleton, D; McDonald, A. 2010. Tenth International Conference on Wood & Biofiber Plastic Composites and Cellulose Nanocomposites Symposium, May 11-13. Madison, US, Forest Products Society. p. 71-75.
- Morris, P.I; Cooper, P. 1998. Recycled Plastic/Wood Composite Lumber Attacked by Fungi. *Forest Products Journal* 48(1): 86-88.

- Naghypour, B. 1996. Effects of extreme environmental conditions and fungus exposure on the properties of wood-plastic composites. Mag. Sc. Thesis. Toronto, CA, University of Toronto. s.p.
- Pedleton, D; Hoffard, T; Adcock, T; Woodward, B; Wolcott, M. 2002. Durability of an extruded HDPE/wood composite. *Composites and Manufactured products* 52(6): 21-27.
- Peraza, F. 2002. Protección preventiva de la madera. Madrid, ES, AITIM. 437 p.
- Plowden, L; Brearley, M; Briggs, A. 1997. Plásticos de la A a la Z: Plásticos. Guayaquil, EC. Cromograf. 43. 62 p.
- Ramos, L. 2013. Extrusión de plásticos: Principios básicos. México D.F, MX, Limusa. 188 p.
- Rowell, R. 2006. Advances and Challenges of Wood Polymer Composites. Proceedings of the 8th Pacific Rim Bio-Based Composites Symposium: Advances and Challenges in Biocomposites. Kuala Lumpur, MY. 11 p.
- Saccarello, V. 2010. LA MADERA: Desde su conocimiento hasta su conservación. Bolivia, Gente Común. 176 p.
- Schirp, A; Wolcott, M. 2005. Influence of fungal decay and moisture absorption on mechanical properties of extruded wood-plastic composites. *Wood and Fiber Science* 37(4): 643-652.
- Schirp, A; Ibach, R; Pendleton, D; Wolcott, M. 2008. Biological Degradation of Wood-Plastic Composites (WPC) and Strategies for Improving the Resistance of WPC against Biological Decay. Eds. T Schultz; H Militz; M Freeman; B Goodell; D Nicholas. US, American Chemical Society: Division of Cellulose and Renewable Materials. p. 480-507.
- Schneider, M; Witt, A. 2004. History of wood polymer composite commercialization. *Forest Products Journal* 54(4): 19-24.
- Stark, N; Rowlands, R. 2003. Effects of wood fiber characteristics on mechanical properties of wood/polypropylene composites. *Wood and Fiber Science* 35(2): 167-174.

- Steckel, V; Clemons, C; Thoemen, H. 2006. Effects of material parameters on the diffusion and sorption properties of wood-flour/polypropylene composites. *Applied Polymer Science* 103(2): 752-763.
- Stupenengo, F. 2011. *Materiales y materias primas: Materiales compuestos*. Buenos Aires, AR, Ministerio de Educación, Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Cap. 10, 27 p.
- Takahashi, J. 2010. *Programa de Desarrollo Rural de la Asociación Peruana Del Bambú – Perú*. Lima, PE. 357 p.
- Vaca de Fuentes, R. 1998. *Técnicas para la Preservación de Maderas*. Bolivia, BOLFOR. 59 p.
- Verhey, S; Laks, P.E; Richter, D.L. 2001. Laboratory decay resistance of wood fiber thermoplastic composites. *Forest Products* 51(9): 44-49.
- Verhey, S; Laks, P. 2002. Wood particles size affects the decay resistance of wood fiber/thermoplastic composites. *Forest Products Issue no 52*: 78-81.
- Verhey, S; Laks, P; Richter, D; Keranen, E; Larkin, G. 2003. Use of field stakes to evaluate the decay resistance of wood fiber - thermoplastic composites. *Forest Products Journal* 53(5): 64-74.
- Wang, W; Morrel, J.J. 2004. Water sorption characteristics of two wood-plastic composites. *Forest Products Journal* 54(12): 209-212.
- Westin, M; Larsson-Blelid, P; Segerholm, B; Van den Oever, M. 2008. Wood Plastic Composites from modified wood: Part 3 Durability of WPCs with bioderived matrix. The International Research Group on Wood Protection. Stockholm, SE. pp. 1-17.
- Westman, M.P; Fifield, L; Simmons, K; Laddha, S; Kafentzis, T.A. 2010. *Natural Fiber Composites: A Review*. Virginia, US, Department of Energy of US. s.p.
- Wolcott, M; Englund, K. 1999. A Technology Review of Wood-Plastic Composites. 33rd International Particleboard / Composite Materials Symposium. pp. 103-111.

- Zabihzadeh, S.M; Hosseini Hashemi, S.K; Mehregan Nikoo, H; Sepidehdam, S.M.J. 2010. Influence of Fungal Decay on Physic-mechanical Properties of a Commercial Extruded Bagasse/PP Composite. *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 29(11): 1750-1756.
- Zehui, J; Zhenhua, P. 2007. *Bamboo and Rattan in the World*. Beijing, CN, China Forestry Publishing House. 360 p.
- Zanni, E. 2004. *Patología de la Madera: degradación y rehabilitación de estructuras de madera*. Córdoba, AR, Brujas. 244 p.

VIII. ANEXOS

ANEXO 1

DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA PÉRDIDA DE PESO

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₁ 1	3,29	3,15	4,27
F ₁ 2	3,79	3,70	2,53
F ₁ 3	3,17	3,08	3,11
F ₁ 4	3,76	3,58	4,86
F ₁ 5	3,54	3,36	4,95
F ₁ 6	3,23	3,14	2,67
F ₁ 7	3,69	3,59	2,51
Promedio	3,49	3,37	3,56
Desviación estándar	0,26	0,25	1,10

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₂ 1	3,01	2,92	3,18
F ₂ 2	2,66	2,59	2,68
F ₂ 3	3,00	2,91	3,00
F ₂ 4	2,68	2,56	4,39
F ₂ 5	2,65	2,58	2,79
F ₂ 6	2,90	2,79	3,64
F ₂ 7	3,01	2,90	3,58
Promedio	2,84	2,75	3,32
Desviación estándar	0,17	0,17	0,59

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₃ 1	3,29	3,16	4,09
F ₃ 2	3,73	3,51	5,93
F ₃ 3	3,41	3,25	4,86
F ₃ 4	3,21	3,05	4,84
F ₃ 5	3,53	3,34	5,53
F ₃ 6	3,60	3,45	4,20
F ₃ 7	3,83	3,66	4,53
Promedio	3,51	3,34	4,85
Desviación estándar	0,23	0,21	0,67

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₄ 1	2,94	2,82	4,13
F ₄ 2	3,27	3,17	3,06
F ₄ 3	3,00	2,86	4,65
F ₄ 4	2,83	2,77	2,11
F ₄ 5	2,91	2,80	3,57
F ₄ 6	2,92	2,85	2,28
F ₄ 7	3,07	2,96	3,42
Promedio	2,99	2,89	3,32
Desviación estándar	0,14	0,14	0,92

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₅ 1	3,09	2,97	4,03
F ₅ 2	3,32	3,20	3,59
F ₅ 3	3,12	3,04	2,80
F ₅ 4	3,84	3,68	4,28
F ₅ 5	3,14	3,09	1,63
F ₅ 6	3,41	3,32	2,44
F ₅ 7	3,38	3,31	2,10
Promedio	3,33	3,23	2,98
Desviación estándar	0,26	0,24	1,01

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₆ 1	2,86	2,80	2,16
F ₆ 2	2,87	2,80	2,53
F ₆ 3	2,70	2,64	2,34
F ₆ 4	2,70	2,64	2,27
F ₆ 5	3,13	3,07	1,95
F ₆ 6	2,99	2,91	2,63
F ₆ 7	2,59	2,54	1,97
Promedio	2,84	2,77	2,26
Desviación estándar	0,18	0,18	0,26

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₇ 1	3,11	3,03	2,43
F ₇ 2	2,80	2,72	3,17
F ₇ 3	3,11	2,98	4,17
F ₇ 4	3,30	3,23	2,09
F ₇ 5	3,32	3,17	4,53
F ₇ 6	3,75	3,62	3,62
F ₇ 7	3,51	3,37	3,86
Promedio	3,27	3,16	3,41
Desviación estándar	0,31	0,29	0,90

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Peso seco inicial (g) P_1	Peso seco final (g) P_2	Pérdida de Peso (%)
F ₈ 1	3,11	3,03	2,57
F ₈ 2	2,89	2,82	2,49
F ₈ 3	2,81	2,73	2,79
F ₈ 4	3,10	3,02	2,87
F ₈ 5	3,34	3,26	2,36
F ₈ 6	3,14	3,01	4,04
F ₈ 7	2,91	2,84	2,19
Promedio	3,04	2,96	2,76
Desviación estándar	0,18	0,18	0,61

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 2

DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F ₁ 1	76,13	25,49	25,52	25,51	2,84	2,96	3,29	2,87	2,99	5,81	3,96	0,68
F ₁ 2	75,97	25,28	25,51	25,40	2,77	2,75	2,92	2,77	2,80	5,41	4,21	0,78
F ₁ 3	75,94	25,41	25,52	25,47	3,22	3,08	3,09	3,17	3,14	6,07	3,71	0,61
F ₁ 4	75,94	25,36	25,22	25,29	2,76	2,88	3,22	2,89	2,94	5,64	3,84	0,68
F ₁ 5	75,6	25,19	25,32	25,26	3,49	3,17	3,01	3,28	3,24	6,18	3,55	0,57
F ₁ 6	75,84	25,25	25,19	25,22	2,76	2,88	3,28	3	2,98	5,70	3,44	0,60
F ₁ 7	76,15	25,62	25,63	25,63	3,27	2,95	2,75	2,91	2,97	5,795	3,6962	0,64
Promedio	<i>75,94</i>	<i>25,39</i>			<i>3,01</i>					<i>5,80</i>	<i>3,77</i>	0,65
Desviación estándar	<i>0,186</i>	<i>0,148</i>			<i>0,154</i>					<i>0,261</i>	<i>0,258</i>	0,068

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F ₂ 1	75,65	25,07	25,02	25,05	2,33	2,18	2,27	2,31	2,27	4,31	3,18	0,74
F ₂ 2	72,32	25,16	25,16	25,16	2,62	2,27	2,1	2,36	2,34	4,25	3,19	0,75
F ₂ 3	73,77	24,99	25,13	25,06	2,12	2,28	2,6	2,27	2,32	4,28	3,28	0,77
F ₂ 4	75,24	25,23	25,3	25,27	2,13	2,32	2,64	2,37	2,37	4,50	3,37	0,75
F ₂ 5	75,31	25,01	24,98	25,00	2,59	2,35	2,29	2,47	2,43	4,56	3,17	0,69
F ₂ 6	75,68	25,26	25,18	25,22	2,54	2,6	2,51	2,39	2,51	4,79	3,13	0,65
F ₂ 7	75,51	25,11	25,22	25,17	2,19	2,13	2,08	2,07	2,12	4,02	3,28	0,82
Promedio	74,78	25,13			2,34					4,39	3,23	0,74
Desviación estándar	1,269	0,099			0,085					0,249	0,084	0,052

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F ₃ 1	76	25,43	25,21	25,32	2,61	2,57	2,5	2,56	2,56	4,93	4,18	0,85
F ₃ 2	75,86	25,49	25,37	25,43	2,51	2,51	2,51	2,51	2,51	4,84	4,24	0,87
F ₃ 3	76	25,55	25,33	25,44	2,51	2,53	2,52	2,54	2,53	4,88	4,02	0,82
F ₃ 4	76,21	25,58	25,43	25,51	2,55	2,58	2,56	2,53	2,56	4,97	4,48	0,90
F ₃ 5	75,55	25,17	25,1	25,14	2,67	2,65	2,58	2,69	2,65	5,03	3,91	0,78
F ₃ 6	75,93	25,43	25,25	25,34	2,68	2,68	2,53	2,61	2,63	5,05	4,08	0,81
F ₃ 7	75,76	25,23	25,3	25,27	2,53	2,56	2,56	2,54	2,55	4,88	3,71	0,76
Promedio	75,9	25,35			2,57					4,94	4,09	0,83
Desviación estándar	0,208	0,124			0,055					0,079	0,245	0,051

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F ₄ 1	75,87	25,35	25,32	25,34	2,52	2,47	2,41	2,46	2,47	4,74	4,35	0,92
F ₄ 2	76,07	25,53	25,39	25,46	2,56	2,4	2,39	2,43	2,45	4,74	4,23	0,89
F ₄ 3	76,06	25,75	25,61	25,68	2,47	2,53	2,46	2,45	2,48	4,84	4,38	0,91
F ₄ 4	75,87	25,37	25,37	25,37	2,57	2,47	2,54	2,57	2,54	4,88	4,19	0,86
F ₄ 5	76,01	25,5	25,67	25,59	2,52	2,57	2,62	2,63	2,59	5,03	4,14	0,82
F ₄ 6	75,84	25,51	25,7	25,61	2,53	2,56	2,57	2,5	2,54	4,93	4,20	0,85
F ₄ 7	75,91	25,44	25,44	25,44	2,6	2,46	2,55	2,5	2,53	4,88	4,30	0,88
Promedio	75,95	25,50			2,51					4,86	4,26	0,88
Desviación estándar	0,097	0,129			0,054					0,104	0,088	0,033

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F51	75,77	25,33	25,27	25,30	3,07	3,07	3,25	3,13	3,13	6,00	4,09	0,68
F52	75,95	25,62	25,59	25,61	2,76	2,81	2,96	2,76	2,82	5,49	4,02	0,73
F53	75,79	25,41	25,35	25,38	3,50	3,15	3,09	3,27	3,25	6,26	4,38	0,70
F54	75,86	25,60	25,65	25,63	2,83	2,80	2,94	2,85	2,86	5,55	4,25	0,77
F55	75,60	25,34	25,50	25,42	3,09	3,10	3,37	3,26	3,21	6,16	4,18	0,68
F56	75,58	25,36	25,05	25,21	3,69	3,60	3,42	3,47	3,55	6,75	4,16	0,62
F57	76,04	25,35	25,20	25,28	3,13	3,40	3,62	3,22	3,34	6,42	4,03	0,63
Promedio	75,8	25,40			3,16					6,09	4,16	0,69
Desviación estándar	0,170	0,162			0,269					0,456	0,128	0,053

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F61	75,52	25,04	25,02	25,03	2,31	2,30	2,24	2,21	2,27	4,28	3,24	0,76
F62	75,59	25,02	24,97	25,00	2,02	2,07	2,15	2,05	2,07	3,92	3,20	0,82
F63	75,65	25,13	25,19	25,16	2,17	2,06	2,13	2,17	2,13	4,06	3,31	0,81
F64	72,62	25,00	24,98	24,99	2,32	2,55	2,69	2,42	2,50	4,53	3,22	0,71
F65	75,59	25,10	25,14	25,12	2,55	2,61	2,78	2,73	2,67	5,07	3,50	0,69
F66	75,42	25,15	25,20	25,18	2,45	2,62	2,79	2,68	2,64	5,00	3,25	0,65
F67	75,60	25,13	25,16	25,15	2,38	2,34	2,49	2,51	2,43	4,62	3,25	0,70
Promedio	75,14	25,09			2,39					4,50	3,28	0,73
Desviación estándar	1,114	0,080			0,257					0,442	0,102	0,064

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F71	76,27	25,56	25,72	25,64	2,53	2,56	2,55	2,57	2,55	4,99	4,53	0,91
F72	75,60	25,17	25,21	25,19	2,54	2,63	2,63	2,61	2,60	4,96	3,97	0,80
F73	75,60	25,24	25,19	25,22	2,70	2,73	2,70	2,64	2,69	5,13	4,05	0,79
F74	75,80	25,36	25,32	25,34	2,65	2,55	2,59	2,61	2,60	4,99	4,27	0,85
F75	76,27	25,59	25,77	25,68	2,57	2,54	2,58	2,55	2,56	5,01	4,53	0,90
F76	75,84	25,46	25,59	25,53	2,54	2,57	2,56	2,59	2,57	4,97	4,32	0,87
F77	75,99	25,30	25,55	25,43	2,57	2,59	2,60	2,65	2,60	5,03	3,96	0,79
Promedio	75,91	25,43			2,60					5,01	4,23	0,84
Desviación estándar	0,281	0,195			0,052					0,059	0,246	0,052

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Largo (mm)	Ancho (mm)			Espesor (mm)					Volumen (cm ³)	Peso seco (g)	Densidad anhidra (g/cm ³)
		a ₁	a ₂	a _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}			
F ₈ 1	75,54	25,41	25,23	25,32	2,60	2,56	2,45	2,52	2,53	4,84	4,23	0,87
F ₈ 2	76,02	25,40	25,40	25,40	2,58	2,52	2,47	2,49	2,52	4,86	4,31	0,89
F ₈ 3	75,68	25,62	25,38	25,50	2,55	2,53	2,46	2,50	2,51	4,84	4,33	0,89
F ₈ 4	76,09	25,51	25,55	25,53	2,55	2,47	2,39	2,45	2,47	4,79	4,41	0,92
F ₈ 5	75,95	25,54	25,48	25,51	2,54	2,40	2,47	2,42	2,46	4,76	4,29	0,90
F ₈ 6	75,83	25,72	25,49	25,61	2,50	2,41	2,57	2,50	2,50	4,84	4,30	0,89
F ₈ 7	76,04	25,55	25,49	25,52	2,53	2,58	2,58	2,45	2,54	4,92	4,17	0,85
Promedio	75,88	25,48			2,50					4,84	4,29	0,89
Desviación estándar	0,205	0,094			0,029					0,051	0,077	0,023

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 3

DATOS PARA LA DETERMINACIÓN DE LA ABSORCIÓN DE AGUA Y DEL HINCHAMIENTO

Código de probeta	Inicial					2 horas					24 horas					Absorción (%)		Hinchamiento (%)				
	Peso (g)	Espesor (mm)				Peso (g)	Espesor (mm)				Peso (g)	Espesor (mm)				2H	24 H	2H	24 H			
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄		e _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃		e ₄	e _{prom}	e ₁	e ₂					e ₃	e ₄	e _{prom}
F ₁ 1	4,01	2,87	2,99	3,32	2,92	3,03	4,72	2,92	3,01	3,38	2,96	3,07	5,13	2,93	3,05	3,39	3,00	3,09	17,83	28,01	1,40	2,23
F ₁ 2	4,29	2,79	2,76	2,95	2,79	2,82	4,72	2,82	2,82	3,00	2,83	2,87	5,15	2,85	2,84	3,04	2,88	2,90	10,09	20,21	1,59	2,83
F ₁ 3	3,77	3,22	3,07	3,08	3,19	3,14	4,39	3,26	3,06	3,09	3,17	3,15	4,84	3,27	3,14	3,14	3,25	3,20	16,42	28,35	0,16	1,91
F ₁ 4	3,89	2,80	2,92	3,29	2,94	2,99	4,43	2,83	2,95	3,30	2,99	3,02	4,90	2,86	2,99	3,31	3,00	3,04	13,81	25,89	1,00	1,76
F ₁ 5	3,58	3,52	3,18	3,07	3,30	3,27	4,40	3,56	3,21	3,13	3,35	3,31	4,96	3,61	3,25	3,15	3,39	3,35	23,00	38,81	1,38	2,52
F ₁ 6	3,47	2,78	2,91	3,30	2,98	2,99	4,01	2,92	3,00	3,35	2,99	3,07	4,65	2,95	3,04	3,39	3,08	3,12	15,38	33,97	2,42	4,09
F ₁ 7	3,75	3,29	2,97	2,76	2,92	2,99	4,43	3,33	2,98	2,80	2,98	3,02	4,89	3,33	3,00	2,81	3,00	3,04	18,09	30,31	1,26	1,68
Promedio	3,82	3,03				4,44	3,07				4,93	3,11				16,37	29,36	1,32	2,43			
D.E.	0,27	0,14				0,24	0,14				0,17	0,14				4,00	5,92	0,68	0,84			

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₂ 1	3,21	2,34	2,20	2,34	2,33	2,30	3,40	2,37	2,23	2,34	2,32	2,32	3,67	2,37	2,25	2,40	2,37	2,35	5,99	14,37	0,54	1,95
F ₂ 2	3,16	2,65	2,29	2,14	2,38	2,37	3,38	2,63	2,31	2,15	2,38	2,37	3,55	2,65	2,34	2,17	2,40	2,39	6,89	12,20	0,11	1,06
F ₂ 3	3,30	2,16	2,33	2,62	2,29	2,35	3,43	2,16	2,33	2,62	2,26	2,34	3,72	2,18	2,35	2,63	2,29	2,36	4,12	12,93	-0,32	0,53
F ₂ 4	3,39	2,21	2,32	2,62	2,40	2,39	3,56	2,23	2,36	2,65	2,41	2,41	3,74	2,28	2,45	2,70	2,50	2,48	5,03	10,22	1,05	3,98
F ₂ 5	3,19	2,59	2,37	2,31	2,49	2,44	3,54	2,62	2,38	2,35	2,51	2,47	3,91	2,67	2,46	2,42	2,52	2,52	10,88	22,41	1,02	3,18
F ₂ 6	3,16	2,57	2,63	2,54	2,46	2,55	3,40	2,56	2,61	2,52	2,59	2,57	3,77	2,57	2,64	2,57	2,62	2,60	7,32	19,24	0,78	1,96
F ₂ 7	3,31	2,23	2,15	2,11	2,11	2,15	3,39	2,23	2,16	2,11	2,09	2,15	3,60	2,23	2,17	2,14	2,10	2,16	2,35	8,61	-0,12	0,47
Promedio	3,25	2,36					3,44	2,37					3,71	2,41					6,08	14,28	0,44	1,87
D.E.	0,09	0,12					0,08	0,13					0,12	0,14					2,71	4,92	0,55	1,33

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₃ 1	4,26	2,65	2,60	2,54	2,60	2,60	4,66	2,64	2,63	2,57	2,62	2,62	5,13	2,71	2,66	2,60	2,68	2,66	9,37	20,48	0,67	2,50
F ₃ 2	4,29	2,55	2,56	2,54	2,54	2,55	4,77	2,60	2,58	2,60	2,58	2,59	5,29	2,62	2,62	2,61	2,60	2,61	11,39	23,40	1,67	2,55
F ₃ 3	4,07	2,53	2,55	2,55	2,55	2,55	4,59	2,54	2,59	2,56	2,59	2,57	5,13	2,60	2,64	2,59	2,60	2,61	12,90	26,15	0,98	2,46
F ₃ 4	4,56	2,57	2,59	2,58	2,56	2,58	4,87	2,59	2,61	2,60	2,59	2,60	5,24	2,64	2,63	2,65	2,64	2,64	6,93	15,11	0,87	2,52
F ₃ 5	3,95	2,60	2,64	2,59	2,71	2,64	4,29	2,74	2,72	2,70	2,79	2,74	4,90	2,78	2,78	2,74	2,83	2,78	8,56	24,15	3,89	5,60
F ₃ 6	4,12	2,72	2,69	2,55	2,66	2,66	4,63	2,74	2,73	2,58	2,68	2,68	5,23	2,81	2,76	2,62	2,73	2,73	12,46	27,01	1,04	2,82
F ₃ 7	3,76	2,58	2,58	2,59	2,56	2,58	4,22	2,59	2,61	2,62	2,59	2,60	4,75	2,63	2,63	2,64	2,62	2,63	12,35	26,54	0,97	2,04
Promedio	4,14	2,59					4,58	2,63					5,10	2,67					10,57	23,26	1,44	2,93
D.E.	0,26	0,04					0,24	0,06					0,20	0,07					2,30	4,25	1,12	1,20

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₄₁	4,38	2,54	2,47	2,49	2,47	2,49	4,52	2,53	2,48	2,48	2,50	2,50	4,65	2,56	2,55	2,49	2,54	2,54	3,29	6,12	0,20	1,71
F ₄₂	4,27	2,60	2,43	2,41	2,45	2,47	4,37	2,58	2,41	2,40	2,44	2,46	4,56	2,60	2,45	2,43	2,48	2,49	2,21	6,62	-0,61	0,71
F ₄₃	4,43	2,48	2,51	2,48	2,47	2,49	4,51	2,49	2,53	2,49	2,48	2,50	4,65	2,50	2,56	2,51	2,49	2,52	1,82	4,93	0,50	1,21
F ₄₄	4,23	2,59	2,51	2,55	2,57	2,56	4,41	2,59	2,52	2,56	2,58	2,56	4,58	2,69	2,60	2,61	2,63	2,63	4,10	8,24	0,29	3,03
F ₄₅	4,18	2,52	2,58	2,62	2,65	2,59	4,38	2,51	2,58	2,64	2,65	2,60	4,62	2,54	2,59	2,67	2,67	2,62	4,80	10,62	0,10	0,96
F ₄₆	4,25	2,55	2,60	2,60	2,49	2,56	4,38	2,54	2,55	2,57	2,49	2,54	4,64	2,58	2,60	2,62	2,54	2,59	2,98	8,95	-0,88	0,98
F ₄₇	4,34	2,62	2,47	2,61	2,51	2,55	4,48	2,62	2,47	2,61	2,51	2,55	4,69	2,64	2,50	2,62	2,56	2,58	3,25	8,22	0,00	1,08
Promedio	4,30	2,53					4,43	2,53					4,63	2,57					3,21	7,67	-0,06	1,38
D.E.	0,09	0,05					0,07	0,05					0,05	0,05					1,03	1,91	0,50	0,79

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₅ 1	4,11	3,11	3,11	3,25	3,16	3,16	5,00	3,16	3,20	3,31	3,28	3,24	5,55	3,20	3,35	3,35	3,29	3,30	21,53	34,95	2,53	4,43
F ₅ 2	4,07	2,77	2,84	2,97	2,77	2,84	4,57	2,81	2,90	3,02	2,83	2,89	4,99	2,81	2,93	3,02	2,84	2,90	12,34	22,72	1,85	2,20
F ₅ 3	4,41	3,47	3,16	3,08	3,26	3,24	5,08	3,60	3,25	3,17	3,36	3,35	5,65	3,61	3,28	3,20	3,37	3,37	15,00	27,92	3,16	3,78
F ₅ 4	4,28	2,83	2,83	2,95	2,86	2,87	4,72	2,87	2,87	3,03	2,93	2,93	5,25	2,88	2,87	3,05	2,94	2,94	10,29	22,66	2,01	2,35
F ₅ 5	4,24	3,12	3,12	3,38	3,26	3,22	5,15	3,18	3,18	3,43	3,30	3,27	5,37	3,24	3,20	3,44	3,33	3,30	21,35	26,64	1,63	2,56
F ₅ 6	4,21	3,67	3,62	3,40	3,47	3,54	5,07	3,76	3,63	3,47	3,48	3,59	5,48	3,77	3,66	3,47	3,52	3,61	20,34	30,10	1,27	1,84
F ₅ 7	4,08	3,15	3,42	3,65	3,24	3,37	4,62	3,18	3,48	3,69	3,28	3,41	5,08	3,24	3,49	3,75	3,28	3,44	13,36	24,47	1,26	2,23
Promedio	4,20	3,18					4,89	3,24					5,34	3,26					16,31	27,06	1,96	2,77
D.E.	0,12	0,25					0,24	0,25					0,24	0,26					4,68	4,42	0,69	0,96

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₆₁	3,27	2,33	2,32	2,26	2,23	2,29	3,40	2,36	2,33	2,26	2,26	2,30	3,63	2,37	2,32	2,28	2,31	2,32	3,95	11,04	0,77	1,53
F ₆₂	3,23	2,05	2,10	2,17	2,03	2,09	3,32	2,06	2,11	2,17	2,05	2,10	3,48	2,06	2,13	2,16	2,06	2,10	2,96	7,93	0,48	0,72
F ₆₃	3,33	2,19	2,10	2,14	2,15	2,15	3,43	2,23	2,11	2,16	2,17	2,17	3,64	2,21	2,11	2,19	2,18	2,17	3,10	9,44	1,05	1,28
F ₆₄	3,22	2,31	2,57	2,74	2,45	2,52	3,58	2,34	2,64	2,74	2,47	2,55	3,72	2,37	2,62	2,74	2,47	2,55	11,09	15,50	1,19	1,29
F ₆₅	3,53	2,56	2,61	2,79	2,74	2,68	3,73	2,61	2,64	2,80	2,73	2,70	3,97	2,62	2,67	2,83	2,73	2,71	5,73	12,64	0,75	1,40
F ₆₆	3,25	2,42	2,61	2,81	2,69	2,63	3,54	2,46	2,64	2,84	2,64	2,65	3,79	2,46	2,65	2,86	2,63	2,65	8,78	16,50	0,47	0,66
F ₆₇	3,25	2,41	2,40	2,56	2,47	2,46	3,68	2,45	2,47	2,57	2,52	2,50	4,07	2,63	2,65	2,67	2,62	2,59	13,16	25,03	1,73	5,18
Promedio	3,30	2,40					3,52	2,42					3,76	2,44					6,97	14,01	0,92	1,72
D.E.	0,11	0,23					0,15	0,23					0,20	0,24					4,09	5,75	0,45	1,56

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial						2 horas						24 horas						Absorción (%)		Hinchamiento (%)	
	Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					Peso (g)	Espesor (mm)					2H	24 H	2H	24 H
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄	e _{prom}				
F ₇ 1	4,60	2,52	2,57	2,56	2,58	2,56	4,82	2,57	2,63	2,59	2,62	2,60	5,22	2,59	2,63	2,63	2,66	2,63	4,79	13,42	1,76	2,74
F ₇ 2	4,01	2,55	2,65	2,63	2,61	2,61	4,44	2,60	2,73	2,67	2,65	2,66	4,94	2,60	2,75	2,71	2,70	2,69	10,61	23,06	2,01	3,07
F ₇ 3	4,12	2,71	2,72	2,71	2,65	2,70	4,43	2,76	2,77	2,74	2,68	2,74	4,97	2,77	2,79	2,79	2,74	2,77	7,75	20,69	1,48	2,78
F ₇ 4	4,33	2,64	2,56	2,60	2,61	2,60	4,61	2,70	2,61	2,63	2,63	2,64	5,07	2,73	2,66	2,67	2,66	2,68	6,60	17,12	1,54	2,98
F ₇ 5	4,60	2,57	2,56	2,62	2,55	2,58	4,79	2,60	2,56	2,63	2,57	2,59	5,17	2,65	2,63	2,66	2,64	2,65	4,13	12,36	0,58	2,72
F ₇ 6	4,39	2,55	2,57	2,58	2,59	2,57	4,67	2,60	2,61	2,61	2,63	2,61	5,10	2,63	2,64	2,64	2,67	2,65	6,37	16,08	1,55	2,82
F ₇ 7	4,01	2,58	2,59	2,61	2,66	2,61	4,44	2,61	2,65	2,66	2,67	2,65	4,92	2,63	2,64	2,67	2,68	2,66	10,49	22,56	1,44	1,72
Promedio	4,30	2,60					4,60	2,64					5,05	2,67					7,25	17,90	1,48	2,69
D.E.	0,25	0,05					0,17	0,05					0,12	0,05					2,55	4,30	0,44	0,44

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Inicial					2 horas					24 horas					Absorción (%)		Hinchamiento (%)				
	Peso (g)	Espesor (mm)				Peso (g)	Espesor (mm)				Peso (g)	Espesor (mm)				2H	24H	2H	24 H			
		e ₁	e ₂	e ₃	e ₄		e _{prom}	e ₁	e ₂	e ₃		e ₄	e _{prom}	e ₁	e ₂					e ₃	e ₄	e _{prom}
F ₈ 1	4,23	2,61	2,57	2,45	2,57	2,54	4,43	2,61	2,57	2,45	2,57	2,55	4,61	2,62	2,59	2,47	2,55	2,56	4,73	9,03	0,39	0,69
F ₈ 2	4,35	2,59	2,54	2,49	2,49	2,53	4,51	2,62	2,54	2,54	2,50	2,55	4,70	2,62	2,59	2,58	2,52	2,58	3,64	8,10	0,89	1,98
F ₈ 3	4,36	2,54	2,50	2,44	2,51	2,50	4,50	2,62	2,52	2,51	2,53	2,55	4,70	2,63	2,57	2,52	2,51	2,56	3,03	7,60	1,90	2,40
F ₈ 4	4,46	2,54	2,47	2,38	2,45	2,46	4,57	2,57	2,49	2,40	2,45	2,48	4,72	2,57	2,49	2,41	2,48	2,49	2,32	5,87	0,71	1,12
F ₈ 5	4,32	2,55	2,39	2,47	2,43	2,46	4,43	2,55	2,41	2,47	2,43	2,47	4,58	2,54	2,43	2,47	2,44	2,47	2,60	6,07	0,20	0,41
F ₈ 6	4,33	2,48	2,42	2,58	2,52	2,50	4,43	2,51	2,41	2,59	2,50	2,50	4,61	2,51	2,41	2,61	2,52	2,51	2,31	6,32	0,10	0,50
F ₈ 7	4,20	2,53	2,59	2,59	2,46	2,54	4,36	2,53	2,58	2,59	2,50	2,55	4,56	2,53	2,58	2,61	2,51	2,56	3,84	8,51	0,29	0,59
Promedio	4,32	2,50				4,46	2,52				4,64	2,53				3,21	7,36	0,64	1,10			
D.E.	0,09	0,03				0,07	0,04				0,07	0,04				0,90	1,27	0,62	0,79			

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 4

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE FLEXIÓN

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₁ 1	17,79	10,30	12,96	2,65	12,23	0,77
F ₁ 2	24,47	15,92	13,03	2,75	15,46	1,05
F ₁ 3	11,12	7,30	12,94	2,68	7,45	0,53
F ₁ 4	13,34	14,59	12,85	2,74	8,65	1,00
F ₁ 5	11,12	4,38	13,12	2,69	7,33	0,31
F ₁ 6	17,79	11,68	13,00	2,75	11,32	0,78
F ₁ 7	15,57	8,34	12,81	2,70	10,43	0,60
Promedio	15,89	10,36	12,96	2,71	10,41	0,72
D.E.	4,71	4,08	0,11	0,04	2,92	0,26

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₂ 1	26,69	14,59	12,99	2,48	21,40	1,40
F ₂ 2	26,69	17,51	12,92	2,77	17,20	1,20
F ₂ 3	24,47	10,95	12,91	2,52	19,10	1,00
F ₂ 4	22,24	12,51	12,94	2,61	16,20	1,10
F ₂ 5	28,91	11,68	12,99	2,55	21,90	1,10
F ₂ 6	24,47	13,47	12,91	2,94	14,00	0,80
F ₂ 7	26,69	14,59	12,98	3,12	13,50	0,70
Promedio	25,74	13,61	12,95	2,71	17,61	1,04
D.E.	2,17	2,20	0,04	0,24	3,34	0,24

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₃ 1	24,47	14,59	13,15	2,62	17,4	1,2
F ₃ 2	20,02	13,47	13,05	2,62	14,3	1,1
F ₃ 3	22,24	14,59	13,2	2,63	15,6	1,2
F ₃ 4	17,79	12,51	13,08	2,86	10,7	0,8
F ₃ 5	13,34	9,22	13,12	2,92	7,6	0,5
F ₃ 6	20,02	10,95	12,95	2,62	14,5	0,9
F ₃ 7	20,02	8,76	13,08	2,56	15	0,8
Promedio	19,70	12,01	13,09	2,69	13,59	0,93
D.E.	3,50	2,42	0,08	0,14	3,32	0,26

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₄ 1	31,14	12,51	12,99	2,45	25,6	1,3
F ₄ 2	26,69	12,51	13,00	2,52	20,7	1,2
F ₄ 3	31,14	15,92	12,98	2,52	24,2	1,5
F ₄ 4	28,91	10,95	13,10	2,52	22,3	1,0
F ₄ 5	31,14	15,92	13,03	2,55	23,5	1,4
F ₄ 6	26,69	12,51	13,10	2,53	20,4	1,2
F ₄ 7	20,02	9,73	13,01	2,46	16,3	1,0
Promedio	27,96	12,86	13,03	2,51	21,88	1,22
D.E.	4,03	2,33	0,05	0,04	3,08	0,19

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₅ 1	15,57	3,65	13,03	2,73	10,0	0,2
F ₅ 2	26,69	9,73	13,02	2,68	17,9	0,7
F ₅ 3	17,79	6,04	12,82	2,60	12,8	0,5
F ₅ 4	15,57	7,01	12,96	2,80	9,6	0,4
F ₅ 5	15,57	6,04	12,82	2,43	12,8	0,6
F ₅ 6	13,34	6,49	13,00	2,64	9,2	0,5
F ₅ 7	17,79	10,30	13,04	2,80	10,9	0,7
Promedio	17,48	7,04	12,95	2,67	11,87	0,51
D.E.	4,34	2,30	0,10	0,13	3,02	0,15

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₆ 1	24,47	15,92	12,9	3,11	12,5	0,8
F ₆ 2	33,36	15,45	13,12	2,75	21,6	1,1
F ₆ 3	35,59	12,51	12,71	2,92	21,1	0,8
F ₆ 4	28,91	12,51	12,92	2,61	21	1,1
F ₆ 5	35,59	19,46	12,93	2,71	24	1,5
F ₆ 6	31,14	15,92	13,08	2,66	21,5	1,3
F ₆ 7	35,59	14,59	13,05	2,67	24,6	1,1
Promedio	32,09	15,19	12,96	2,78	20,90	1,10
D.E.	4,23	2,38	0,14	0,18	3,97	0,25

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₇ 1	22,24	13,47	12,86	2,56	17,0	1,2
F ₇ 2	22,24	15,92	13,07	2,67	15,3	1,3
F ₇ 3	22,24	11,68	13,04	2,62	15,9	1,0
F ₇ 4	22,24	15,92	13,10	2,66	15,4	1,3
F ₇ 5	22,24	10,30	13,01	2,61	16,1	0,9
F ₇ 6	15,57	9,73	13,03	2,86	9,3	0,6
F ₇ 7	13,34	9,22	12,89	2,82	8,3	0,6
Promedio	20,02	12,32	13,00	2,69	13,91	0,97
D.E.	3,85	2,83	0,09	0,11	3,52	0,28

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	m (N/mm)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Resistencia máxima (MPa)	Módulo de elasticidad (GPa)
F ₈ 1	35,59	12,51	12,92	2,56	27,0	1,1
F ₈ 2	33,36	14,59	12,90	2,50	26,5	1,4
F ₈ 3	33,36	14,59	12,96	2,52	26,0	1,4
F ₈ 4	33,36	14,59	12,96	2,52	26,0	1,4
F ₈ 5	31,14	15,92	12,72	2,55	24,1	1,5
F ₈ 6	28,91	11,68	12,64	2,49	23,7	1,2
F ₈ 7	31,14	11,42	12,89	2,55	23,8	1,0
Promedio	32,41	13,62	12,86	2,53	25,29	1,28
D.E.	2,17	1,73	0,12	0,03	1,38	0,16

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 5

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE TENSIÓN

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₁ 1	84,52	3,12	2,80	8,75	9,66
F ₁ 2	71,17	3,28	2,98	9,77	7,28
F ₁ 3	80,07	3,02	3,08	9,30	8,61
F ₁ 4	66,72	3,32	3,04	10,09	6,61
F ₁ 5	75,62	3,18	2,99	9,50	7,96
F ₁ 6	75,62	3,18	2,98	9,48	8,03
F ₁ 7	7,03	0,12	0,11	0,51	1,18
Promedio	65,82	2,75	2,57	8,20	7,05
D.E.	26,55	1,16	1,09	3,42	2,76

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₂ 1	133,45	3,43	2,66	9,14	14,61
F ₂ 2	102,31	3,40	2,79	9,50	10,77
F ₂ 3	129,00	3,72	2,63	9,78	13,19
F ₂ 4	97,86	3,49	2,81	9,82	9,97
F ₂ 5	111,21	3,15	2,70	8,52	13,06
F ₂ 6	111,21	3,37	2,86	9,64	11,54
F ₂ 7	146,79	3,43	2,79	9,57	15,34
Promedio	118,83	3,43	2,75	9,42	12,64
D.E.	17,92	0,17	0,09	0,46	1,98

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₃ 1	84,52	3,25	2,55	8,29	10,20
F ₃ 2	84,52	3,25	2,54	8,27	10,22
F ₃ 3	88,96	3,20	2,64	8,46	10,52
F ₃ 4	84,52	3,22	2,60	8,38	10,08
F ₃ 5	97,86	3,29	2,55	8,38	11,68
F ₃ 6	80,07	3,19	2,65	8,46	9,46
F ₃ 7	86,76	3,18	2,58	8,35	10,39
Promedio	86,74	3,23	2,59	8,37	10,36
D.E.	5,60	0,04	0,05	0,08	0,73

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₄ 1	84,52	3,15	2,53	7,97	10,6
F ₄ 2	146,79	3,23	2,45	7,91	18,5
F ₄ 3	120,10	3,17	2,59	8,21	14,6
F ₄ 4	133,45	3,16	2,53	8,01	16,7
F ₄ 5	115,65	3,19	2,48	7,92	14,6
F ₄ 6	115,65	3,12	2,49	7,78	14,9
F ₄ 7	119,35	3,14	2,49	7,99	15,0
Promedio	119,36	3,17	2,51	7,97	14,99
D.E.	19,12	0,04	0,05	0,13	2,65

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₅ 1	75,62	3,20	2,88	9,21	8,2
F ₅ 2	71,17	3,11	3,07	9,55	7,5
F ₅ 3	71,17	3,23	2,90	9,36	7,6
F ₅ 4	66,72	3,12	3,06	9,55	7,0
F ₅ 5	66,72	3,25	2,96	9,63	6,9
F ₅ 6	84,52	3,27	3,04	9,95	8,5
F ₅ 7	80,07	3,13	3,10	9,71	8,2
Promedio	73,71	3,19	3,00	9,56	7,70
D.E.	6,73	0,07	0,09	0,24	0,63

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₆ 1	88,96	3,09	2,62	8,11	10,97
F ₆ 2	110,45	3,27	2,71	8,80	12,55
F ₆ 3	120,10	3,43	2,80	9,60	12,51
F ₆ 4	102,31	3,20	2,69	8,61	11,89
F ₆ 5	102,31	3,32	2,72	9,04	11,32
F ₆ 6	129,00	3,34	2,73	9,13	14,13
F ₆ 7	120,10	3,13	2,65	8,28	14,50
Promedio	110,46	3,25	2,70	8,80	12,55
D.E.	13,69	0,12	0,06	0,52	1,47

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₇ 1	80,07	2,65	2,62	6,95	11,5
F ₇ 2	93,41	2,60	2,77	7,21	13,0
F ₇ 3	102,31	2,61	2,78	7,26	14,1
F ₇ 4	84,52	2,63	2,72	7,16	11,8
F ₇ 5	84,52	2,64	2,81	7,41	11,4
F ₇ 6	75,62	2,66	2,74	7,30	10,4
F ₇ 7	88,96	2,61	2,73	7,13	12,5
Promedio	87,06	2,63	2,74	7,20	12,09
D.E.	8,84	0,02	0,06	0,14	1,21

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Carga máxima (P) (N)	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Sección (mm²)	Resistencia máxima (MPa)
F ₈ 1	115,65	3,42	2,49	8,50	13,6
F ₈ 2	120,10	3,33	2,56	8,54	14,1
F ₈ 3	120,10	3,25	2,48	8,06	14,9
F ₈ 4	133,45	3,36	2,51	8,44	15,8
F ₈ 5	155,69	3,26	2,58	8,41	18,5
F ₈ 6	120,10	3,09	2,52	7,78	15,4
F ₈ 7	133,45	3,28	2,66	8,71	15,3
Promedio	128,36	3,28	2,54	8,35	15,38
D.E.	13,93	0,10	0,06	0,32	1,59

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 6

DATOS PARA DETERMINAR EL ENSAYO DE IMPACTO

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₁ 1	2,58	22,4	22,8	0,015	0,30	-
F ₁ 2	2,43	22,4	22,7	0,015	0,39	Falló
F ₁ 3	2,77	22,4	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 4	2,49	22,6	22,6	0,018	0,35	Falló
F ₁ 5	2,79	22,6	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 6	2,76	22,4	22,9	0,018	0,35	Falló
F ₁ 7	2,49	22,6	22,8	0,015	0,30	-
F ₁ 8	2,38	22,6	22,8	0,020	0,39	-
F ₁ 9	2,41	22,4	22,6	0,015	0,30	-
F ₁ 10	2,39	22,4	23,2	0,020	0,39	-
F ₁ 11	2,40	22,5	23,1	0,015	0,30	Falló
F ₁ 12	2,79	22,6	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 13	2,50	22,6	22,8	0,015	0,30	-
F ₁ 14	2,42	22,6	22,8	0,018	0,35	Falló
F ₁ 15	2,85	22,6	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 16	2,90	22,6	23,3	0,020	0,39	-
F ₁ 17	2,79	22,4	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 18	2,36	22,3	23,2	0,015	0,30	-
F ₁ 19	2,46	22,5	22,8	0,020	0,39	-
F ₁ 20	2,77	22,4	23,2	0,015	0,30	-
Promedio	2,59	22,5	23,0	0,017	0,33	Falló
D.E.	0,19	0,11	0,24	0,0021	0,04	Falló

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₂ 1	2,62	22,6	22,8	0,03	0,49	-
F ₂ 2	2,61	22,6	23,2	0,02	0,39	-
F ₂ 3	2,97	22,4	23,2	0,02	0,39	-
F ₂ 4	3,08	22,3	22,7	0,03	0,49	Falló
F ₂ 5	3,26	22,2	22,6	0,04	0,79	Falló
F ₂ 6	3,43	22,1	24,9	0,03	0,59	Falló
F ₂ 7	3,61	22,0	24,4	0,03	0,59	-
F ₂ 8	3,78	21,9	24,8	0,03	0,49	-
F ₂ 9	2,60	22,0	22,8	0,03	0,59	-
F ₂ 10	2,61	22,0	23,2	0,02	0,39	-
F ₂ 11	2,95	22,3	23,2	0,03	0,49	-
F ₂ 12	3,08	22,6	24,4	0,03	0,55	-
F ₂ 13	2,61	22,6	24,8	0,03	0,59	Falló
F ₂ 14	2,95	22,4	22,8	0,03	0,49	-
F ₂ 15	2,68	22,3	23,2	0,03	0,59	-
F ₂ 16	2,98	22,2	23,2	0,03	0,49	-
F ₂ 17	2,99	22,1	24,9	0,03	0,55	-
F ₂ 18	3,01	22,0	22,8	0,03	0,49	-
F ₂ 19	3,02	21,9	23,1	0,03	0,49	-
F ₂ 20	2,64	22,0	24,7	0,03	0,59	-
Promedio	2,97	22,2	23,6	0,03	0,53	
D.E.	0,34	0,23	0,87	0,00	0,09	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₃ 1	2,53	22,4	22,8	0,01	0,20	-
F ₃ 2	2,45	22,4	22,8	0,02	0,39	Falló
F ₃ 3	2,49	22,5	23,2	0,02	0,39	-
F ₃ 4	2,51	22,6	23,0	0,01	0,20	-
F ₃ 5	2,53	22,6	22,6	0,02	0,39	Falló
F ₃ 6	2,55	22,7	22,6	0,02	0,39	-
F ₃ 7	2,57	22,7	23,0	0,01	0,20	-
F ₃ 8	2,60	22,8	23,2	0,02	0,30	Falló
F ₃ 9	2,62	22,9	22,6	0,02	0,39	Falló
F ₃ 10	2,64	22,9	22,8	0,03	0,49	Falló
F ₃ 11	2,53	22,4	22,8	0,02	0,30	-
F ₃ 12	2,45	22,4	23,2	0,01	0,20	-
F ₃ 13	2,49	22,5	23,0	0,02	0,39	-
F ₃ 14	2,51	22,6	23,2	0,03	0,49	-
F ₃ 15	2,57	22,6	22,6	0,02	0,39	-
F ₃ 16	2,60	22,7	23,0	0,03	0,49	Falló
F ₃ 17	2,45	22,5	23,2	0,02	0,39	-
F ₃ 18	2,53	22,6	22,6	0,02	0,39	-
F ₃ 19	2,53	22,6	22,9	0,02	0,36	
F ₃ 20	0,58	6,96	5,26	0,01	0,13	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₄₁	2,34	22,4	23,0	0,02	0,39	-
F ₄₂	2,62	22,4	23,0	0,02	0,39	-
F ₄₃	2,62	22,4	23,2	0,03	0,49	-
F ₄₄	2,64	22,4	23,0	0,03	0,59	-
F ₄₅	2,54	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₄₆	2,74	22,4	22,8	0,03	0,49	Falló
F ₄₇	2,80	22,2	22,8	0,03	0,59	-
F ₄₈	2,61	22,6	22,8	0,03	0,49	-
F ₄₉	2,62	22,4	23,2	0,03	0,49	-
F ₄₁₀	2,64	22,4	23,0	0,03	0,59	-
F ₄₁₁	2,54	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₄₁₂	2,74	22,2	22,8	0,03	0,49	Falló
F ₄₁₃	2,80	22,4	22,8	0,03	0,49	-
F ₄₁₄	2,61	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₄₁₅	2,50	22,4	22,8	0,03	0,59	-
F ₄₁₆	2,51	22,2	22,8	0,03	0,49	-
F ₄₁₇	2,60	22,6	23,2	0,02	0,39	-
F ₄₁₈	2,52	22,4	23,0	0,02	0,39	-
F ₄₁₉	2,52	22,4	22,8	0,03	0,59	-
F ₄₂₀	2,62	22,6	22,8	0,03	0,49	-
Promedio	2,61	22,4	22,9	0,02	0,48	
D.E.	0,11	0,11	0,15	0,00	0,08	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₅ 1	2,51	22,2	22,7	0,03	0,59	Falló
F ₅ 2	2,45	22,6	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 3	3,19	22,6	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 4	3,21	22,4	22,7	0,02	0,35	-
F ₅ 5	3,53	22,2	22,8	0,02	0,35	-
F ₅ 6	3,33	22,4	22,8	0,02	0,30	-
F ₅ 7	3,20	22,4	22,6	0,02	0,30	-
F ₅ 8	2,55	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 9	3,19	22,2	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 10	3,21	22,6	22,6	0,02	0,35	-
F ₅ 11	3,53	22,6	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 12	3,33	22,4	22,8	0,02	0,39	Falló
F ₅ 13	2,65	22,2	22,7	0,02	0,30	-
F ₅ 14	2,66	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 15	2,55	22,2	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 16	2,54	22,4	22,7	0,02	0,35	Falló
F ₅ 17	2,61	22,4	22,8	0,02	0,39	Falló
F ₅ 18	2,50	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 19	3,10	22,2	22,8	0,02	0,39	-
F ₅ 20	2,54	22,4	22,8	0,02	0,39	-
Promedio	2,92	22,4	22,8	0,02	0,38	
D.E.	0,39	0,14	0,07	0,00	0,06	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₆ 1	2,55	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 2	2,54	22,2	22,6	0,03	0,49	Falló
F ₆ 3	2,47	22,4	22,6	0,03	0,49	-
F ₆ 4	2,52	22,2	22,8	0,03	0,59	Falló
F ₆ 5	2,76	22,4	22,8	0,03	0,49	-
F ₆ 6	2,52	22,6	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 7	2,57	22,6	22,8	0,03	0,59	-
F ₆ 8	2,47	22,2	22,8	0,03	0,59	-
F ₆ 9	2,47	22,4	22,6	0,03	0,49	-
F ₆ 10	2,52	22,6	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 11	2,76	22,5	22,8	0,03	0,59	-
F ₆ 12	2,52	22,6	22,8	0,03	0,49	-
F ₆ 13	2,51	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 14	2,5	22,6	22,8	0,03	0,49	Falló
F ₆ 15	2,54	22,6	22,6	0,03	0,59	-
F ₆ 16	2,6	22,6	22,8	0,03	0,59	-
F ₆ 17	2,44	22,4	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 18	2,51	22,2	22,8	0,03	0,59	-
F ₆ 19	2,62	22,5	22,8	0,02	0,39	-
F ₆ 20	2,45	22,6	22,6	0,03	0,49	-
Promedio	<i>2,54</i>	<i>22,45</i>	<i>22,75</i>	<i>0,03</i>	0,50	
D.E.	<i>0,09</i>	<i>0,15</i>	<i>0,09</i>	<i>0,00</i>	0,08	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₇ 1	2,44	22,2	22,4	0,02	0,30	-
F ₇ 2	2,41	22,4	22,8	0,02	0,30	Falló
F ₇ 3	2,34	22,2	22,8	0,02	0,35	Falló
F ₇ 4	2,40	22,2	22,5	0,02	0,30	-
F ₇ 5	2,37	22,4	22,4	0,02	0,39	-
F ₇ 6	2,56	22,2	22,4	0,03	0,59	-
F ₇ 7	2,45	22,2	22,6	0,02	0,39	Falló
F ₇ 8	2,43	22,4	22,8	0,02	0,30	Falló
F ₇ 9	2,35	22,5	22,4	0,02	0,39	-
F ₇ 10	2,51	22,2	22,8	0,02	0,30	-
F ₇ 11	2,62	22,2	22,8	0,02	0,30	-
F ₇ 12	2,41	22,4	22,4	0,02	0,39	-
F ₇ 13	2,34	22,2	22,8	0,02	0,30	Falló
F ₇ 14	2,40	22,2	22,4	0,02	0,30	Falló
F ₇ 15	2,37	22,2	22,5	0,02	0,30	Falló
F ₇ 16	2,56	22,2	22,8	0,02	0,39	-
F ₇ 17	2,33	22,4	22,6	0,02	0,30	-
F ₇ 18	2,50	22,5	22,8	0,02	0,30	-
F ₇ 19	2,61	22,4	22,7	0,02	0,39	-
F ₇ 20	2,65	22,2	22,6	0,02	0,30	-
Promedio	2,45	22,3	22,6	0,02	0,34	
D.E.	0,10	0,11	0,18	0,00	0,07	

FUENTE: elaboración propia.

Código de probeta	Espesor (mm)	CONDICIONES NORMALES (23°C)				Observación
		Temperatura Inicial (°C)	Temperatura Final (°C)	Altura (m)	Energía (J)	
F ₈ 1	2,97	22,6	23,2	0,03	0,59	-
F ₈ 2	3,25	22,8	23,0	0,03	0,49	-
F ₈ 3	2,55	22,4	23,0	0,03	0,59	-
F ₈ 4	2,60	22,6	23,1	0,03	0,59	Falló
F ₈ 5	2,66	22,4	23,0	0,02	0,39	-
F ₈ 6	2,61	22,6	23,2	0,03	0,49	-
F ₈ 7	3,04	22,6	23,3	0,03	0,49	Falló
F ₈ 8	2,51	22,8	23,0	0,03	0,49	-
F ₈ 9	2,53	22,6	23,2	0,03	0,59	-
F ₈ 10	2,55	22,4	23,0	0,03	0,59	-
F ₈ 11	2,54	22,6	23,1	0,02	0,39	-
F ₈ 12	2,60	22,4	23,1	0,03	0,59	-
F ₈ 13	2,66	22,6	23,0	0,02	0,39	-
F ₈ 14	2,61	22,6	23,2	0,03	0,59	-
F ₈ 15	3,04	22,8	23,0	0,03	0,49	-
F ₈ 16	2,54	22,4	23,2	0,03	0,59	-
F ₈ 17	2,55	22,6	23,1	0,03	0,59	-
F ₈ 18	2,60	22,6	23,1	0,03	0,59	Falló
F ₈ 19	2,67	22,4	23,1	0,03	0,59	-
F ₈ 20	3,05	22,6	23,2	0,02	0,39	-
Promedio	2,71	22,6	23,1	0,03	0,53	
D.E.	0,23	0,13	0,1	0,00	0,08	

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 7

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE PERDIDA DE PESO

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Pérdida de Peso		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	29,03603	2,23354038	3,18	0,0022
Error	42	29,5252	0,70298087		
Total corregido	55	58,56122			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Pérdida de peso
0,495823	25,34417	0,83844	3,308214

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	11,57521	11,57520714	16,47	0,0002
T	1	4,290179	4,29017857	6,1	0,0176
P	1	8,62715	8,62715	12,27	0,0011
B	6	1,304546	0,2174244	0,31	0,9286
H*T	1	0,118864	0,11886429	0,17	0,683
H*P	1	0,142007	0,14200714	0,2	0,6554
T*P	1	1,339207	1,33920714	1,91	0,1748
H*T*P	1	1,638864	1,63886429	2,33	0,1343

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Pérdida de peso			
Alfa	0,05		
Grados de libertad del error	42		
Error Cuadrático Medio	0,702981		
Valor crítico de Studentized Rango	2,85404		
Diferencia Mínima Significativa	0,4522		
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	3,7629	28	PS
B	2,8536	28	PP
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	3,585	28	T6080
B	3,0314	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	12,6261	28	P5050
B	4,8668	28	P3070

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 8

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE ABSORCIÓN 24 HORAS

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Absorción 24 horas		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	3581,444964	275,495766	15,36	<,0001
Error	42	753,128607	17,931634		
Total corregido	55	4334,573571			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Absorción 24 horas
0,826251	24,04058	4,234576	17,61429

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	59,534064	59,534064	3,32	0,0756
T	1	712,429779	712,429779	39,73	<,0001
P	1	2576,943114	2576,943114	143,71	<,0001
B	6	168,752021	28,125337	1,57	0,1803
H*T	1	8,455314	8,455314	0,47	0,4961
H*P	1	43,825207	43,825207	2,44	0,1255
T*P	1	3,510007	3,510007	0,2	0,6604
H*T*P	1	7,995457	7,995457	0,45	0,5079

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Absorción 24 horas			
Alfa	0,05		
Grados de libertad del error	35		
Error Cuadrático Medio	9,283525		
Valor crítico de Studentized Rango	2,87103		
Diferencia Mínima Significativa	1,7856		
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	18,645	28	PS
A	16,583	28	PP
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	21,181	28	T6080
B	14,048	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	2,7046	28	P5050
B	1,52	28	P3070

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 9

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE HINCHAMIENTO 24 HORAS

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Hinchamiento 24 horas		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	12	26,03365833	2,16947153	7,54	<,0001
Error	35	10,06693333	0,28762667		
Total corregido	47	36,10059167			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Hinchamiento 24 horas
0,721142	29,29980	0,536308	1,830417

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	0,00800833	0,00800833	0,03	0,8684
T	1	0,00000833	0,00000833	0	0,9957
P	1	21,2268	21,2268	73,8	<,0001
B	6	2,06836667	0,41367333	1,44	0,235
H*T	1	0,02520833	0,02520833	0,09	0,7689
H*P	1	1,29363333	1,29363333	4,5	0,0411
T*P	1	1,40083333	1,40083333	4,87	0,034
H*T*P	1	0,0108	0,0108	0,04	0,8475

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Hinchamiento 24 horas			
Alfa		0,05	
Grados de libertad del error		35	
Error Cuadrático Medio		0,287627	
Valor crítico de Studentized Rango		2,87103	
Diferencia Mínima Significativa		0,3143	
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	1,8433	28	PP
A	1,8175	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	1,8308	28	T6080
A	1,83	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	2,4954	28	P5050
B	1,1654	28	P3070

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 10

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE DENSIDAD

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Densidad		
Clase			
	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	0,43157857	0,03319835	15,53	<,0001
Error	42	0,08979286	0,00213793		
Total corregido	55	0,52137143			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Densidad
0,827776	5,92249	0,046238	0,780714

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	0,00315	0,00315	1,47	0,2316
T	1	0,33945714	0,33945714	158,78	<,0001
P	1	0,04457857	0,04457857	20,85	<,0001
B	6	0,03992143	0,00665357	3,11	0,013
H*T	1	0,00000714	0,00000714	0	0,9542
H*P	1	0,00182857	0,00182857	0,86	0,3603
T*P	1	0,00160714	0,00160714	0,75	0,3909
H*T*P	1	0,00102857	0,00102857	0,48	0,4917

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Densidad			
Alfa	0,05		
Grados de libertad del error	42		
Error Cuadrático Medio	0,002138		
Valor crítico de Studentized Rango	2,85404		
Diferencia Mínima Significativa	0,0249		
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	0,78821	28	PP
A	0,77321	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	0,85857	28	T6080
B	0,70286	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	0,80893	28	P3070
B	0,7525	28	P5050

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 11

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE FLEXIÓN

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Resistencia máxima en Flexión (MOR)		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	1469,149	113,011442	11,92	<,0001
Error	42	398,2268	9,481589		
Total corregido	55	1867,376			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coeficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Resistencia máxima en Flexión (MOR)
0,786745	18,18768	3,079219	16,93025

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	62,72248	62,722478	6,62	0,0137
T	1	167,8585	167,858538	17,7	0,0001
P	1	1128,391	1128,390953	119,01	<,0001
B	6	76,55643	12,759405	1,35	0,2588
H*T	1	0,861552	0,861552	0,09	0,7646
H*P	1	20,94021	20,940206	2,21	0,1447
T*P	1	10,38883	10,388829	1,1	0,3012
H*T*P	1	1,429763	1,429763	0,15	0,6997

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Resistencia máxima en Flexión (MOR)			
Alfa		0,05	
Grados de libertad del error		42	
Error Cuadrático Medio		9,481589	
Valor crítico de Studentized Rango		2,85404	
Diferencia Mínima Significativa		1,6608	
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	17,9886	28	PP
B	15,8719	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	18,6616	28	T6080
B	15,1989	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	21,4191	28	P3070
B	12,4414	28	P5050

FUENTE: elaboración propia.

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Módulo de elasticidad en Flexión (MOE)		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	3,5963652	0,27664348	5,67	<,0001
Error	42	2,05030393	0,04881676		
Total corregido	55	5,64666913			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Módulo de elasticidad en Flexión (MOE)
0,6369	22,73976	0,220945	0,971625

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	0,00409716	0,00409716	0,08	0,7735
T	1	0,94094788	0,94094788	19,28	<,0001
P	1	1,94221502	1,94221502	39,79	<,0001
B	6	0,4586615	0,07644358	1,57	0,181
H*T	1	0,06131445	0,06131445	1,26	0,2688
H*P	1	0,06277902	0,06277902	1,29	0,2632
T*P	1	0,08416502	0,08416502	1,72	0,1963
H*T*P	1	0,04218516	0,04218516	0,86	0,3579

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Módulo de elasticidad en Flexión (MOE)			
Alfa	0,05		
Grados de libertad del error	42		
Error Cuadrático Medio	0,048817		
Valor crítico de Studentized Rango	2,85404		
Diferencia Mínima Significativa	0,1192		
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	0,98018	28	PP
A	0,96307	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	1,10125	28	T6080
B	0,842	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	1,15786	28	P3070
B	0,78539	28	P5050

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 12

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE TENSIÓN

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Resistencia máxima en Tensión (MOR)		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	7	1 2 3 4 5 6 7	
Numero de observaciones : 56			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	92,5305643	7,1177357	11,19	<,0001
Error	37	23,542769	0,6362911		
Total corregido	50	116,0733333			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coeficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Resistencia máxima en Tensión (MOR)
0,797173	13,51234	0,797679	5,903333

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	0,40379596	0,40379596	0,63	0,4308
T	1	27,80740938	27,80740938	43,7	<,0001
P	1	59,29634399	59,29634399	93,19	<,0001
B	6	2,40078714	0,40013119	0,63	0,7061
H*T	1	0,94168014	0,94168014	1,48	0,2315
H*P	1	0,12825855	0,12825855	0,2	0,6561
T*P	1	0,48609026	0,48609026	0,76	0,3877
H*T*P	1	0,65141396	0,65141396	1,02	0,3182

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Resistencia máxima en Tensión (MOR)			
Alfa		0,05	
Grados de libertad del error		37	
Error Cuadrático Medio		0,636291	
Valor crítico de Studentized Rango		2,8655	
Diferencia Mínima Significativa		0,4534	
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	5,9541	28	PP
A	5,8463	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	6,6215	28	T6080
B	5,1564	28	T4060
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	6,9485	28	P3070
B	4,8164	28	P5050

FUENTE: elaboración propia.

ANEXO 13

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA VARIABLE IMPACTO

Procedimiento:	ANOVA		
Variable dependiente:	Impacto		
Clase	Nivel	Valores	
Tipo de hongo (H)	2	PP	PS
Tamaño de partícula (T)	2	T4060	T6080
Proporción (P)	2	P3070	P5050
Bloqueo	20	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20	
Numero de observaciones : 160			

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
Modelo	13	0,38628354	0,02971412	3,6	<,0001
Error	37	0,30559881	0,00825943		
Total corregido	50	0,69188235			

FUENTE: elaboración propia.

R cuadrado	Coefficiente de variabilidad	RMSE	Promedio de Resistencia Impacto
0,558308	21,60816	0,090881	0,420588

FUENTE: elaboración propia.

Fuente	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	Valor F	Pr > F
H	1	0,00571446	0,00571446	0,69	0,4109
T	1	0,0068957	0,0068957	0,83	0,3668
P	1	0,31053376	0,31053376	37,6	<,0001
B	19	0,02768833	0,00461472	0,56	0,7601
H*T	1	0,0068383	0,0068383	0,83	0,3688
H*P	1	0,00510047	0,00510047	0,62	0,437
T*P	1	0,00079762	0,00079762	0,1	0,7577
H*T*P	1	0,02040188	0,02040188	2,47	0,1245

FUENTE: elaboración propia.

Prueba ANOVA del Procedimiento Tukey's Studentized Rango (HSD) para Impacto			
Alfa	0,05		
Grados de libertad del error	37		
Error Cuadrático Medio	0,008259		
Valor crítico de Studentized Rango	2,8655		
Diferencia Mínima Significativa	0,0517		
Tipo de hongo			
Agrupamiento Tukey	Media	N	H
A	0,42481	28	PP
A	0,41583	28	PS
Tamaño de partícula			
Agrupamiento Tukey	Media	N	T
A	0,4352	28	T4060
B	0,40654	28	T6080
Proporción			
Agrupamiento Tukey	Media	N	P
A	0,49769	28	P3070
B	0,3404	28	P5050

FUENTE: elaboración propia.