



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE
LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO**

Ana Gabriela Coyoy Paz

Asesorado por el Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Guatemala, febrero de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE
LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

ANA GABRIELA COYOY PAZ

ASESORADO POR EL ING. JORGE EMILIO GODÍNEZ LEMUS

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, FEBRERO DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Dra. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
EXAMINADOR	Ing. Mario José Mérida Meré
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha julio de 2013.



Ana Gabriela Coyoy Paz



Guatemala, 30 de octubre de 2014

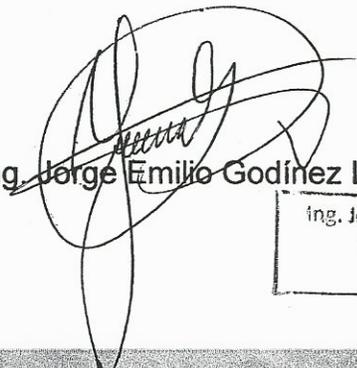
Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Por medio de la presente me dirijo a usted para informarle que la estudiante, Ana Gabriela Coyoy Paz, con carné 2009-15395, me ha presentado para revisión el informe final del trabajo de graduación, titulado "Formulación de un material fibro-reforzado a base de la mezcla de cáscara de coco y polímero reciclado", al cual doy mi APROBACIÓN.

Sin otro particular, me suscribo.

Atentamente


Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus

Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
INGENIERO QUÍMICO
Colegiado 874



Guatemala, 25 de noviembre de 2014
Ref. EIQ.TG-IF.066.2014

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **090-2013** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Ana Gabriela Coyoy Paz**.
Identificada con número de carné: **2009-15395**.
Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

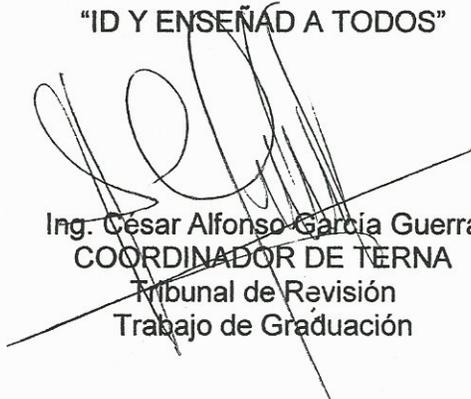
Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBRO-REFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Jorge Emilio Godínez Lemus**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"


Ing. Cesar Alfonso Garcia Guerra
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

Universidad de San
Carlos de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Unidad de Lingüística

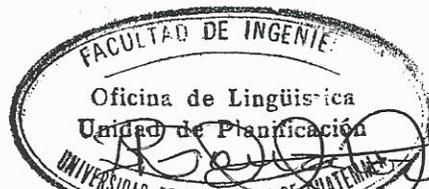
Guatemala, 2 de febrero de 2015
Ling.2/15

Ingeniero Víctor Manuel Monzón Valdez
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería, USAC

Señor director:

Por este medio hago de su conocimiento que la Unidad de Lingüística hace una modificación al título del trabajo de graduación del estudiante **Ana Gabriela Coyoy Paz**, con número de carné: **2009-15395** el cual fue aprobado de acuerdo al protocolo como: **FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBRO-REFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO.**

La Unidad modifica el título del trabajo en virtud de que el mismo no está bien redactado y propone la siguiente forma: **FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO.**



Licenciada **Rosa Arrieta González** Domínguez
Coordinadora de la Unidad de Lingüística



Ref.EIQ.TG.013.2015

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación de la estudiante, **ANA GABRIELA COYOY PAZ** titulado: **"FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, febrero 2015

Cc: Archivo
VMMV/ale



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **FORMULACIÓN DE UN MATERIAL FIBROREFORZADO A BASE DE LA MEZCLA DE CÁSCARA DE COCO Y POLÍMERO RECICLADO**, presentado por la estudiante universitaria: **Ana Gabriela Coyoy Paz**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
DECANO

Guatemala, febrero de 2015



ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por guiar mi vida, ser mi fuerza y mi fortaleza, tanto en lo personal como en lo profesional.
María Auxiliadora	Por ser mi apoyo, mi ejemplo, y por su intercesión en todas las bendiciones recibidas.
Mis padres	María Teresa Paz y Mario Horacio Coyoy, por su constante apoyo, y contribución a mis logros.
Mis hermanos	Antonio y Carlos Coyoy Paz. Por el apoyo, amor y confianza en cada uno de mis logros.
Mi abuela	Rosita Paz. Por ser parte importante en mi vida, estando presente en cada paso, con su amor y apoyo incondicional a mí y a mi madre.
Mi sobrino	Adrián Emilio Coyoy Cano. Por ser luz en mi vida, llenándola de alegría.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Por darme la oportunidad de crecer dentro de sus aulas, brindándome el aprendizaje necesario.
Facultad de Ingeniería	Por ser una importante influencia en mi carrera, apoyada por los buenos profesores y por darme la primera oportunidad de empleo.
Mi familia	Por estar ahí en los buenos momentos y apoyarme en las dificultades, desvelos y tristezas, dándome palabras de aliento.
Mis abuelos	Porque cada uno aportó una enseñanza significativa en mi vida, mostrándome situaciones diversas que sirvieron de motivación.
Mis amigos	Por escucharme y compartir cada uno de los momentos importantes o difíciles en mi vida, siendo un gran apoyo, guardando sinceridad y honestidad, hacia mi persona, brindándome su valiosa amistad incondicional, colaborando juntos en todo.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XIII
OBJETIVOS.....	XV
Hipótesis	XVI
INTRODUCCIÓN	XVII
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	7
2.1. Qué es una matriz fibroreforzada o WPC.....	7
2.1.1. Características de los compuestos reforzados con fibras	8
2.2. Fibras naturales.....	9
2.2.1. Fibra de coco	9
2.3. Producción de coco en Guatemala.....	11
2.3.1. Fuentes de producción	12
2.4. Polipropileno como aglutinante.....	14
2.4.1. Polipropileno reciclado.....	15
3. DISEÑO METODOLÓGICO	17
3.1. Variables.....	17
3.2. Delimitación del campo de estudio	18
3.3. Recursos humanos disponibles.....	19

3.4.	Recursos materiales disponibles.....	19
3.4.1.	Materia prima	20
3.4.2.	Equipo	20
3.4.2.1.	Equipo auxiliar	20
3.4.2.2.	Equipo de medición	20
3.4.2.3.	Accesorios para formulación	21
3.4.3.	Cristalería, reactivos e instrumentación	21
3.4.3.1.	Cristalería	21
3.4.3.2.	Reactivos.....	21
3.4.3.3.	Instrumentación.....	21
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	22
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información.....	23
3.6.1.	Procesamiento de la materia prima.....	23
3.6.2.	Caracterización de la materia prima.....	23
3.6.2.1.	Determinación de la temperatura de fusión, degradación e inflamación de materia prima	24
3.6.2.2.	Determinación del porcentaje de humedad de materia prima.....	25
3.6.2.3.	Densidad de la materia prima.....	25
3.6.2.4.	Determinación de la capacidad de absorción de la fibra de coco.....	25
3.6.3.	Proceso de fabricación de la madera plástica	26
3.6.4.	Análisis fisicomecánico de la matriz formulada	27
3.6.4.1.	Procedimiento para la determinación de densidad del material formulado	27
3.6.4.2.	Procedimiento para determinar la capacidad máxima de flexión	28

3.6.4.3.	Procedimiento para la determinación de dureza del material formulado	28
3.6.4.4.	Procedimiento para determinación de temperatura de inflamación del material formulado	29
3.6.4.5.	Procedimiento para determinación de capacidad máxima de absorción del material formulado	30
3.6.4.6.	Procedimiento para determinación del porcentaje de humedad del material formulado	31
3.6.5.	Análisis químico del agua residual (prueba de absorción).....	31
3.6.6.	Análisis fisicomecánicos del Durpanel.....	33
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	34
3.7.1.	Ordenamiento de la información.....	34
3.7.2.	Procesamiento de la información.....	34
3.7.2.1.	Determinación de densidad	35
3.7.2.2.	Determinación del esfuerzo máximo de flexión	35
3.7.2.3.	Capacidad de absorción	36
3.8.	Análisis estadístico	37
3.8.1.	Media aritmética	37
3.8.2.	Análisis de varianza	37
4.	RESULTADOS	41
4.1.	Fibra de coco como desecho.....	41
4.2.	Caracterización de la materia prima	42

4.2.1.	Análisis químico del agua residual del coco	43
4.3.	Proceso de preparación de la materia prima previo a su transformación	43
4.4.	Propiedades fisicomecánicas de las probetas de madera plástica	46
4.4.1.	Densidad	46
4.4.2.	Módulo de ruptura	47
4.4.3.	Dureza	49
4.4.4.	Temperatura de inflamación	50
4.4.5.	Capacidad de absorción	52
4.4.5.1.	Análisis químico del agua residual de las formulaciones	53
4.4.6.	Porcentaje de humedad	54
4.5.	Comparación del material fibroreforzado con Durpanel	55
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	57
	CONCLUSIONES	63
	RECOMENDACIONES	65
	BIBLIOGRAFÍA	67
	APÉNDICES	71
	ANEXOS	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Producción anual de coco en Guatemala.....	13
2.	Desecho de fibra de coco no aprovechado en el kilómetro 61 autopista a Palín, Escuintla	41
3.	Proceso de preparación de fibra de coco.....	44
4.	Densidad del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición	46
5.	Módulo de ruptura del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición	48
6.	Dureza de Janka del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición	49
7.	Temperatura de inflamación del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición.....	51
8.	Capacidad de absorción del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición.....	52
9.	Porcentaje de humedad del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición	54

TABLAS

I.	Composición aproximada del coco	12
II.	Área requerida y resultados de cultivo de coco anual en Guatemala ...	13
III.	VARIABLES DE PROCESO.	17
IV.	Sistema de distribución de datos para cada prueba fisicomecánica.....	38
V.	Análisis de varianza del efecto de la variación de parámetros sobre la prueba fisicomecánica a analizar	40
VI.	Análisis de varianza del efecto del día de venta o de los puestos de venta sobre la cantidad de fibra de coco desechada	42
VII.	Caracterización de la fibra de coco y el aglutinante polipropileno reciclado	42
VIII.	Análisis químico del agua residual del coco	43
IX.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la densidad	47
X.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre el módulo de ruptura.....	48
XI.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la dureza de Janka	50
XII.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la temperatura de inflamación	51
XIII.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la capacidad de absorción	53

XIV.	Análisis químico del agua residual de las formulaciones de material fibroreforzado a 275 °C	53
XV.	Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre el porcentaje de humedad.....	55
XVI.	Resultados de las pruebas fisicomecánicas del material fibroreforzado formulado a 275 °C con 80 % PP y tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y del material Durpanel	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A₁₋₃	Ancho
P	Carga o esfuerzo de ruptura
cm	Centímetro
C₁₋₃	Corrida
ρ	Densidad
D₁₋₃	Diámetro
d	Distancia
°C	Grado Centígrado
g	Gramo
G₁₋₃	Grosor
Kg	Kilogramo
PSI	Libra fuerza por pulgada cuadrada
μS	Microsiemens
ml	Mililitro
mm	Milímetro
min.	Minuto
R	Módulo de ruptura
NAP	No aplica
ppm	Partes por millón
po	Peso inicial
pf	Peso final
M₁₋₃	Peso de materia prima
% Abs	Porcentaje de absorción

%H	Porcentaje de humedad
%PP	Porcentaje de polipropileno
P_{40t1-3}	Probeta con 40 % PP y tres variaciones de tiempo
P_{60t1-3}	Probeta con 60 % PP y tres variaciones de tiempo
P_{80t1-3}	Probeta con 80 % PP y tres variaciones de tiempo
T	Temperatura
T_{deg}	Temperatura de degradación
T_{inf}	Temperatura de inflamación
T_f	Temperatura de fusión
TDS	Total de sólidos disueltos

GLOSARIO

Aglutinante	Sustancia utilizada para mantener la firmeza de un aglomerado adhiriendo las partículas de una mezcla por medio de presión y/o endurecimiento.
Capacidad de absorción	Cantidad de máxima de agua capaz de ser absorbida por algún material en función de su peso inicial.
Carga de compactación	Presión establecida y utilizada para compactar un cuerpo o mezclas de material.
Densidad	Propiedad intensiva referida a la cantidad de materia en un determinado volumen.
Dureza de Janka	Máxima presión requerida para introducir la mitad del diámetro de un balón de 11,4 mm dentro de una probeta de aglomerado.
Módulo de ruptura	Esfuerzo máximo de flexión que es capaz de soportar una probeta de cualquier material.
Polipropileno	Polímero termoplástico obtenido de la polimerización del propeno, es parcialmente cristalino.

Porcentaje de humedad	Cantidad de agua contenida en un material representada como porcentaje peso/peso en función del peso inicial.
Probeta	Prueba de madera plástica con determinadas dimensiones de diámetro, grosor y con propiedades fisicoquímicas y mecánicas específicas.
Tamiz	Cedazo con aberturas de tamaño específico que se utiliza para separar partículas de diferente tamaño mediante una numeración determinada.
Temperatura de Inflamación	Temperatura mínima en condiciones normales de presión a la cual se desprende suficiente cantidad de vapores para producir la inflamación mediante un foco de ignición externo.
WPC	Abreviatura de “Wood Plastic Composites”. Material ecológico compuesto por mezcla de materia celulósica y materiales termoplásticos.

RESUMEN

El objetivo del trabajo de investigación fue formular una alternativa a la elaboración de los aglomerados de madera, a partir de una mezcla controlada de fibra de coco de distintos tamaños de partícula o fibra y polipropileno reciclado, ambos considerados desecho; tomando en cuenta la evaluación de la matriz fibroreforzada en función del porcentaje de coco-polipropileno utilizado, con una determinada temperatura, realizando tres variaciones de tiempo para la probeta dentro del horno. Por lo cual se caracterizó la materia prima: coco y polipropileno, y se realizó determinado número de probetas para evaluar las propiedades físicas, químicas y mecánicas.

Se inició con la preparación del coco como materia prima, disminuyendo el tamaño y grosor de la cáscara entera, se procedió a secar, para realizar molienda adecuada. Se definió el tamaño de partícula a utilizar de ambos materiales, su temperatura de inflamación o degradación según corresponde, la temperatura de fusión del polímero, el porcentaje de humedad y capacidad de absorción del coco y finalmente la densidad real de ambos.

Para la elaboración de las probetas se definió una temperatura específica con la cual se intercambié el calor de manera adecuada y a su vez no afectara ninguna de las dos materias primas, se determinaron tres porcentajes distintos de composición en función del polímero siendo: 40, 60 y 80 por ciento, además se realizó una mezcla controlada de coco molido según el tamaño de la fibra y partícula, utilizando la materia retenida por el tamiz Núm. 8, Núm. 30 y la materia no retenida por este último siendo su tamaño: fibras de

aproximadamente 44,31 mm y partícula de 2,36 mm, fibras de 8,69 mm con tamaño de partícula 0,54 mm, por último partículas menores a 0,54 mm.

Las probetas correspondientes a dichas mezclas se sometieron a 275 °C durante 1 hora, con una carga de compactación de 10 toneladas y 2 minutos de prensado. Posteriormente se realizaron las pruebas de densidad, esfuerzo máximo de flexión, capacidad de absorción, porcentaje de humedad, temperatura de inflamación y dureza por medio del método de Janka. Posteriormente, se realizó un análisis químico al agua utilizada para la prueba de capacidad de absorción, para observar si el coco tratado disuelve fácilmente algunos componentes. Con dichos resultados se determinó la mejor formulación del material fibroreforzado, así como su comportamiento en función del porcentaje de polipropileno y del tiempo sometido a la temperatura mencionada, comparándola a su vez con Durpanel (material actualmente en el mercado).

Dicho trabajo de investigación se realizó en el Laboratorio de la Sección de Tecnología de la Madera, de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

OBJETIVOS

General

Formular un material fibroreforzado a partir de la mezcla de materiales desechados, como la cáscara de coco y polipropileno, que pueda ser utilizado como alternativa a los aglomerados de madera.

Específicos

1. Establecer la cantidad de desecho de fibra de coco, generada en el km. 61 autopista a Palín, Escuintla; para su posterior disponibilidad en la formulación de un material fibroreforzado.
2. Identificar las propiedades físicas y químicas de la cáscara de coco y polipropileno reciclado, previo al proceso de fabricación del material fibroreforzado.
3. Determinar el proceso de preparación de la materia prima, cáscara de coco y polipropileno para su posterior transformación.
4. Evaluar las propiedades fisicoquímicas y mecánicas del material formulado, en función de la proporción fibra de coco/polipropileno y el tiempo de proceso dentro del horno de convección forzada, siendo estas: densidad, esfuerzo máximo de flexión, dureza, temperatura de inflamación, capacidad de absorción y porcentaje de humedad.

5. Comparar la mejor formulación de las matrices fibroreforzadas evaluadas con un aglomerado actualmente en el mercado, tomando como base las propiedades fisicoquímicas y mecánicas: densidad, esfuerzo máximo de flexión, dureza, temperatura de inflamación, capacidad de absorción y porcentaje de humedad.

Hipótesis

La formulación de la matriz fibroreforzada a partir de fibra larga de coco y polipropileno reciclado será una alternativa física, química y mecánicamente viable, en comparación con algún producto actualmente en el mercado, tomando como parámetros de evaluación: la densidad, esfuerzo máximo de flexión, dureza, temperatura de inflamación, capacidad de absorción y porcentaje de humedad.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad se ha intentado avanzar con la formulación de nuevos productos aprovechando los desechos generados por la población, con características nuevas que puedan ser utilizadas como alternativas a productos ya existentes. En esta investigación se utilizó la cáscara de coco desechada en 17 ventas destinadas a dicha fruta tropical, en la autopista a Palín, Escuintla en el km. 61 frente a la Ceiba, y el polipropileno reciclado de una empresa dedicada a su distribución.

Existen varios proyectos de investigación en los cuales se utiliza la cáscara de coco como combustible, abono, para carbón activado, entre otros, mientras que el polímero mencionado se utiliza para la construcción de viviendas, fabricación de macetas, cajones, y otros. Las investigaciones más recientes han buscado distintas opciones para crear aglomerados a base de madera, conocidos como Wood Plastic Composites (WPC), los cuales son sustitutos de la madera natural, con propiedades que les permiten tener mayor durabilidad, resistencia a la humedad y menor atracción de vectores, a su vez mitigan el negativo impacto ambiental.

Hay dos tipos de madera plástica o WPC: 100 por ciento de plástico reciclado/virgen, en el cual se utiliza polietileno de alta densidad junto con otros materiales termoplásticos, teniendo mayores ventajas ya que no se pudre, no hay atracción de vectores y resistente al estar en contacto directo con el ambiente, su dureza y otras propiedades dependen en parte, de la cantidad de procesos que ha sufrido con anterioridad; también se fabrican con plástico relleno de madera o fibras, dicha mezcla se ha investigado en países como

Chile, España, Estados Unidos, entre otros, con los cuales se determinó que el producto es ambientalmente viable, ya que utiliza dos tipos de desecho no aprovechado aunque no tiene la misma vida útil que el material hecho con 100 por ciento de plástico. Además es posible su fabricación por medio de métodos de: inyección, extrusión y compresión, siendo este último el utilizado para la presente investigación.

Actualmente en el país no se distribuye ningún material fibroreforzado, por lo que en esta investigación se pretende aprovechar la cáscara de coco y el polipropileno reciclado, para formular dicho material examinando sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, utilizando para estas últimas, las Normas ASTM D1037, dirigidas a paneles aglomerados, utilizando un horno de convección forzada a una temperatura específica y la prensa hidráulica como principales equipos.

1. ANTECEDENTES

Hay diversos estudios dedicados al aprovechamiento de desechos o reutilización de materiales, con los cuales se pretenden generar nuevos productos o bien productos que tengan las características necesarias, para convertirse en alternativas a productos que ya existen en el mercado. La ciencia ha tratado de avanzar, tomando en cuenta métodos y materiales que sean amigables con el medio ambiente, por ejemplo la cáscara de coco desde años atrás se ha considerado para implementar proyectos de investigación, sobre su capacidad para ser utilizada como combustible y otra como abono.

En el 2007, en la Universidad Autónoma de Madrid, se presenta una breve descripción del carbón activado y una propuesta de planta piloto, teniendo como base un horno rotatorio, además de un molino y una cámara de enfriamiento. “Dicha planta piloto se realizó con materiales fabricados en el país, con un costo accesible, y una capacidad de producción de media tonelada¹”.

Hay proyectos que hoy en día realizan estudiantes y profesionales enfocados en una tecnología limpia, preservando a su vez la naturaleza, por tanto en el 2011, tres estudiantes de la Universidad de Norbert Wiener realizaron un trabajo titulado “Carbón ecológico de la cáscara de coco”, en el cual además de la cáscara de coco utilizaron otros productos adicionales como la papa y la yuca, para producir un carbón más eficiente y menos contaminante.

¹ LUNA, Donaciano. *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*, [en línea] <www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf> [Consulta: 28 de julio de 2013].

En la Universidad de San Carlos de Guatemala, estudiantes de la Escuela de Ingeniería Química aprovechan el exocarpo del coco para la extracción y caracterización fisicoquímica de un tinte natural, aprovechando así el desecho de fuentes comerciales del país, con lo cual se pretendió evaluar la factibilidad de su uso como materia prima en la industria textil mediante tratamientos de lixiviación por reflujo constante², o bien utilizando el método de lixiviación por maceración dinámica, logrando determinar la diferencia de emplear distintos tipos de fibra³.

Las investigaciones mencionadas son las más frecuentes hoy en día. Pero al aumentar las necesidades del ser humano y la tecnología a su vez, se han buscado distintas opciones para emplear materiales naturales, una de ellas y las más recientes son los compuestos hechos a base de madera conocidos como “Wood Plastic Composites”, el cual, es el único material unido creado a base de plástico que podría ser reciclado o virgen y madera, con funciones similares a la madera pura, pero la ventaja es que se han requerido menos requisitos de mantenimiento y con un peso inferior a la relación de resistencia.

² MÉRIDA, Mario. *Extracción y caracterización fisicoquímica del tinte natural obtenido del exocarpo del coco (cocos nucifera), como aprovechamiento del desecho de fuentes comerciales*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008.

³ GÓMEZ. José Enríquez. *Obtención a nivel laboratorio del tinte natural del exocarpo del coco (cocos nucifera L.) mediante lixiviación por maceración dinámica utilizando muestra seca y fresca*. Trabajo de graduación de Ingeniería Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011.

En la actualidad, la industria de estos compuestos ha ido evolucionando rápidamente, de acuerdo a Wood Plastic Composites Technology Trends, apoyados por Han, Gardner y Song, en el 2008, después de treinta años desde que se introdujo su uso, se ha convertido en un material disponible en varias formas y a servicios de hogares individuales. En su mayoría los WPC, se emplean para el revestimiento a gran escala, para techos, construcción estructural y productos de oficina entre otros. En Norteamérica más de 80 fabricantes contribuyen con billones de dólares a la industria.

El WPC es utilizado en $\frac{3}{4}$ partes para construcción, en un 10 por ciento de su totalidad de producción para fines industriales, el 8 por ciento en industrias automotrices, y el 7 por ciento restante para otros usos. Según las necesidades de cada país y su contaminación, como lo registra Wood-Plastic Extrusion Composite Overview, dirigido por el Dr. Douglas J. Gardner en el 2008.

En Europa el WPC se ha vuelto muy popular en la industria automotriz, en el hogar, tomando en cuenta muebles, escritorios, macetas y mangos para herramientas; estudios muestran que en cinco años, dicho mercado creció en un 280 por ciento. En Estados Unidos se eleva con una tasa anual del 14 por ciento. También esta clase de productos se introdujeron en el mercado asiático, casi diez años después que en Norteamérica y Europa, pero fue más popular y frecuente su uso que en estos dos últimos continentes. “Por otra parte la industria china solo ha crecido en un 30 por ciento desde su introducción por tener menor calidad que los competidores ya mencionados⁴”.

⁴ EVA Tech. *History of Wood Plastic Composite (WPC)*. [en línea] <<http://www.eva-last.co.za/request-information.html>> [Consulta: de 15 mayo de 2013].

De acuerdo a lo descrito anteriormente estos compuestos tienen un crecimiento rápido en el mercado, estos son materiales puramente de ingeniería.

Se han realizado diferentes estudios para la formulación de materiales fibro-reforzados, tomando en cuenta madera y como agente aglutinante algún tipo de polímero, evaluando propiedades físicas, químicas y mecánicas del producto, las cuales incluyen diferentes tópicos de interés en la Ingeniería Química. Entre estos estudios se encuentra la evaluación de la temperatura y tiempo dependiente del comportamiento de la madera plástica según su composición, lo cual fue presentado como trabajo de graduación para el grado de Master en Ingeniería Civil, por parte de Andrew Joseph Schildmeyer en la Universidad del Estado de Washington, agosto de 2006.

Otro estudio se basó en la comprensión del desgaste en la química de compuestos de madera plástica y la determinación de la relación entre sus cambios químicos y propiedades físicas, dicho proyecto fue denominado “Research in Progress”, el cual se basó en el impacto medio ambiental que algunos compuestos o productos presentan continuamente, así como el bajo rendimiento que la madera maciza presenta. Por tanto, “se buscó un material con resistencia alta a la interperie con largo plazo y durabilidad en aplicaciones exteriores⁵”

Según el proyecto anterior, varios estudios se han llevado a cabo sobre la degradación de los WPC, incluyendo biodegradación (hongos y bacterias), la degradación mecánica, y foto degradación, siendo esta última la más frecuente

⁵ MCDONALD, Armando. *Coalición para el avance de estructuras de madera*. [En línea] <www.fpl.fs.fed.us/documnts/rips/fplrip-4706-003-wood-plastics-composites.pdf> [Consulta: 5 de mayo de 2013].

en presencia de humedad. Para llevarlo a cabo se prepararon muestras con exposición acelerada, al aire libre y se evaluó el tiempo de color/cambios químicos debido a meteorización, para poder establecer una correlación de cambios de color en función del tiempo.

Actualmente en Guatemala existe una empresa en el departamento de Escuintla, que tiene una iniciativa ambiental, ya que utiliza los residuos del coco como materia prima para regenerar suelos y recuperar la capa vegetativa de las laderas, que estén en riesgo de deslave y suelos afectados por inundaciones. La parte utilizable del coco que es fundamental para este tipo de producto, son las fibras que fundamentan la recuperación y regeneración, de extensiones de suelos que son afectados por altos niveles de erosión, humedad y uso desmedido. Los residuos de fibras los procesan y fabrica un material conocido como geotextil, que se adapta a la superficie del suelo y lo recubre con el fin de restaurar la calidad de los mismos, controlando la erosión.

Estos geotextiles biodegradables, facilitan el crecimiento de la vegetación en terrenos áridos, degradados, erosionados e inclinados. Este tipo de material retiene la humedad. En Guatemala se han realizado otra clase de estudios, relacionados con la fibra de coco, la cual sirve como base para la formación de algún nuevo producto.

En la Universidad de San Carlos de Guatemala, se han realizado investigaciones en las cuales se aprovechen residuos de fibras o partículas de madera, cabe mencionar que en julio del 2008, en un trabajo de graduación, en el cual se elaboraron varias matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de la estopa del coco y se determinaron sus propiedades físicas y mecánicas, con el fin de combinar las mejores propiedades de los componentes y disminuir los defectos de los mismos. Para lo cual se utilizó como materia

prima la fibra orgánica de la estopa de coco y polietilenos, determinando desde un principio la compatibilidad de la mezcla, realizándole al finalizar pruebas de absorción de agua y tracción⁶, dando con estos resultados la conclusión final de factibilidad.

Por otra parte se presentó la evaluación experimental de matrices fibroreforzadas con desechos del fruto del coco (*Cocos Nucífera L.*) y paneles para la construcción de una vivienda económica, en el 2009. Con el apoyo del Centro de Investigaciones de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, buscando un material de mejor ductilidad, incrementando esfuerzos a la tensión y resistencia a fallas⁷, se mezcló con cemento. Y para evaluar los resultados de la matriz se construyeron muros representativos en tamaño natural, para determinar el comportamiento de la estructura.

Pero en septiembre de 2008, se presentó la caracterización física, mecánica y química de fibras de desecho del fruto del coco, para la utilización de matrices fibroreforzadas, como trabajo de graduación hecho por Oscar David Toj Atz en la Universidad de San Carlos de Guatemala, para obtener el título de licenciatura en Ingeniería Civil. Trabajo en el cual se recopiló las principales características físicas, mecánicas y químicas de la cáscara, además se sugirió una aplicación en matrices fibroreforzadas.

⁶ PÉREZ ESCOBAR, Milton Adolfo. *Elaboración de matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de la estopa del coco y determinación de sus propiedades físicas y mecánicas*. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Civil, 2008.

⁷ QUIÑONEZ DE LA CRUZ, Francisco. *Evaluación experimental de matrices fibro-reforzadas con desechos del fruto del coco, y de paneles para construcción de vivienda económica*. FODECYT. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Qué es una matriz fibroreforzada o WPC

Estos compuestos mejoran la resistencia, carga de rotura, la rigidez, la relación resistencia/peso, por la introducción de fibras fuertes, rígidas y frágiles, en una matriz más blanda y dúctil. El material de la matriz transmite los esfuerzos a las fibras y proporciona tenacidad y ductilidad al compuesto, mientras las fibras soportan la mayor parte de la fuerza o tensión aplicada.

Una característica de estos compuestos respecto a los endurecidos por dispersión, es que la resistencia del compuesto aumenta tanto a temperatura ambiente como a elevadas temperaturas.

Se suelen emplear una gran cantidad de materiales reforzados. Desde la antigüedad se conoce el refuerzo de la paja en el adobe y hoy está extendido el refuerzo de acero en estructuras, así como el refuerzo de fibras de vidrio sobre polímeros, fibras de boro o carbono, de propiedades excepcionales de resistencia o diminutos mono cristales cerámicos denominados *whiskers* desarrollados para este objetivo.

Los materiales de refuerzo presentan morfologías muy variadas con orientaciones características. Las fibras cortas suelen tener una orientación aleatoria, para fibras continuas se produce la orientación anisotrópica deliberada. Las fibras pueden disponerse como telas o tejidos o ser producidas en forma de fibras largas. También se puede cambiar la orientación en las capas alternadas de fibras largas.

Se trata de un increíble tipo útil y popular de material, gracias a su alto rendimiento en una gran variedad de aplicaciones y de peso ligero al cociente de la fuerza. Los compuestos se utilizan en industrias como la aeroespacial, la automoción y la construcción principalmente.

Los WPC pueden variar de un fabricante a otro. Sin embargo, son una combinación de madera y plástico para crear un material de larga duración. Tienen peso más ligero que la mayoría de otros materiales adecuados para la misma aplicación. Pueden funcionar eficazmente, incluso en climas extremos. WPC se puede utilizar para una variedad de aplicaciones al aire libre, tradicionalmente creado a partir de madera. Muy a menudo WPC se utiliza en la industria automotriz, de puertas y ventanas de perfil y las industrias cubiertas.

2.1.1. Características de los compuestos reforzados con fibras

Existe una gran cantidad de factores que deben tenerse en cuenta a la hora de seleccionar y diseñar con materiales compuestos reforzados con fibras.

- Relación de aspecto:
Las fibras continuas, que proporcionan mayores resistencias, son a menudo difíciles de introducir en el material y producir el mismo, mientras que las discontinuas son más fáciles, mayor relación de aspecto, produciendo también alta resistencia.
- Fracción volumétrica de fibras:
Una mayor fracción volumétrica de fibras aumenta la resistencia, situándose el límite superior en el 80 por ciento, por la posibilidad de rodear las fibras con el material que hace de matriz.
- Orientación de las fibras:

Las fibras unidireccionales presentan resistencia máxima cuando la carga aplicada es paralela a las fibras, sin embargo, las propiedades son muy anisotrópicas. Por ello, se suelen usar fibras dispuestas en forma de tejido, capas cruzadas, sacrificando la máxima resistencia con propiedades uniformes en el compuesto.

- **Propiedades de las fibras:**

El material de las fibras debe ser fuerte, rígido, ligero y tener elevada temperatura de fusión. Se prefieren materiales con elevados módulos y resistencia específicos.

2.2. Fibras naturales

Se llama fibra natural a los filamentos, hebras o pelo, cuyo origen está en la naturaleza, y que pueden hilarse para dar lugar a otros filamentos, hilos o cuerdas. Las fibras que no provienen de la naturaleza se denominan “fibras químicas”, ya sean artificiales o sintéticas.

Los hilos obtenidos con las fibras, a su vez, pueden tejerse para producir un tejido textil o apelmazarse para producir un no tejido. La única fibra natural que es capaz de formar un hilo es la seda; el resto de las fibras se deben teñir e hilar para poder ser utilizadas posteriormente en la fabricación de textiles. Además, las fibras naturales se utilizan para reforzar compuestos.

2.2.1. Fibra de coco

La fibra de coco es un excelente sustrato para el desarrollo radicular; de hecho, es posible plantar directamente en ella sin necesidad de emplear tratamientos o agentes especiales para la plantación. A diferencia de otros tipos

de medio de cultivo, la fibra de coco mantiene una elevada capacidad de aireación incluso cuando está completamente saturada.

La fibra de coco dispone de una capacidad de amortiguación (efecto *buffer* o tampón) que permite a las plantas superar sin consecuencias cortos períodos de deficiencias nutricionales y/o hídricas. La posibilidad de elegir una granulometría u otra de fibra de coco Pelemix, permite al productor diseñar el medio de cultivo más adecuado a sus necesidades concretas de cultivo, hecho que redundará en unos mejores resultados en las cosechas.

- Características
 - Buen equilibrio entre retención de agua y capacidad de aireación. Evita las enfermedades fungosas en las raíces como consecuencia del exceso de humedad.
 - El pH de este producto es un pH estable y controlado, oscila entre 5,5 y 6,5, rango que resulta apropiado para la mayoría de las plantas.
 - Capacidad de retención del agua. En el cultivo intensivo este valor resulta de interés frente a sustratos como la perlita o la lana de roca, cuya escasa retención hídrica puede comprometer seriamente el cultivo en caso de fallo del sistema de riego.
 - Buena mojabilidad. El sustrato de coco al contrario que las turbas absorbe muy rápidamente el agua cuando está seco.
 - Capacidad de intercambio catiónico. Es capaz de retener nutrientes y liberarlos progresivamente, evitando las pérdidas por lixiviación. Ejerce un poder amortiguador contra los errores de abonado.
 - Producto ecológico y renovable. Su extracción y posterior eliminación no representa ningún tipo de impacto medioambiental.

- Relación calidad/precio. Muy competitivo frente a otros sustratos.

2.3. Producción de coco en Guatemala

El coco está cubierto de fibras, de 20 a 30 centímetros de longitud y un peso aproximado de 2,5 kilogramos. Los cocos están formados por un cáscara externa amarillenta, correosa y fibrosa de 4 o 5 centímetros de espesor con forma de pelos fuertemente adheridos a la nuez, llamada comúnmente (mesocarpio) y otra más dura (endocarpio) que dispone de tres orificios próximos en disposición triangular, situados en el apéndice, dos cerrados y el otro frente del embrión⁸.

La pulpa blanca es comestible, contiene en su cavidad central un líquido azucarado conocido como “agua de coco” y que en cantidad aproximada de 300 gramos se encuentra encerrada en el interior del fruto. La pulpa del coco, lavada, pasteurizada, blanqueada y desmenuzada, se utiliza en panadería, pastelería y elaboración de chocolate.

A continuación se muestra la cantidad aproximada de peso de las partes del coco:

⁸ Econosul. *Superficie cultivada, rendimiento y producción por productos*. [en línea] <www.econosul.com/PDF/Guatemala/Produccion.pdf> [Consulta: 3 de mayo de 2013].

Tabla I. **Composición aproximada del coco**

Parte del coco	Peso (kg)
Jugo	0,300
Endoesperma	0,045
Endocarpio	0,800
Mesocarpio	0,950
Otros	0,405
Peso total	2,500

Fuente: elaboración propia, tomando como base datos de Econosul / Proy. FODECYT 075-06.

2.3.1. Fuentes de producción

Los cocos por tratarse de frutas tropicales se obtienen en gran cantidad en las áreas costeras de Guatemala, la producción no está tecnificada y en su mayoría las familias los siembran para ser utilizados como sombra o como cercos de potreros, llegando a tener entre 10 y 20 cocoteros. La mayor concentración de venta de este fruto se da en el mercado La Terminal de la zona 4 de la ciudad capital; su utilidad principal es para la elaboración de helados y un bajo porcentaje se vende como bebida, generalmente en época de calor⁹.

Existen intermediarios que se dedican a recolectar el fruto llegando a cada región en donde compran el coco por bultos, de familia en familia; las regiones donde normalmente realizan las compras son las siguientes:

⁹ INFOAGRO. *Coco, cocos, cocotero, palma de coco*". [en línea] <<http://articulos.infojardin.com/Frutales/fichas/coco-cocos-cocotero-cocoteros.html>> [Consulta: 24 de abril de 2013].

- La Gomera, La Nueva Concepción, Tecojate, El Chontal, Puerto de San José, El Semillero, Tiquisate, todos ubicados en Escuintla.
- San Antonio, Suchitepequez
- Chiquimulilla, Santa Rosa
- Puerto Barrios, Izabal

Tabla II. **Área requerida y resultados de cultivo de coco anual en Guatemala**

Guatemala Cocos	Año								
	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Superficie cultivada (Ha)	4,100	4,100	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500	4,500
Rendimiento (Hg/Ha)	39,024	31,707	40,000	35,556	35,556	35,556	35,556	35,556	35,556
Producción (Mt)	16,000	13,000	18,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000	16,000

Fuente: base datos de Econosul y Proyecto FODECYT 075-06.

Figura 1. **Producción anual de coco en Guatemala**



Fuente: base datos de Econosul y Proyecto FODECYT 075-06.

2.4. Polipropileno como aglutinante

Este polímero es un termoplástico con alta estabilidad térmica, es decir, puede utilizarse con temperaturas constantes de 100 °C; es un material resistente a temperaturas de 140 °C, siendo capaz de esterilizarse con estas condiciones.

La ventaja de utilizar este material, es que tiene buena resistencia al contacto con ácidos o álcalis, tiene excelentes propiedades dieléctricas, es ligero y con bajo coeficiente de absorción de humedad¹⁰. Por tanto es posible aplicarlo en tanques y depósitos para productos químicos, prótesis, mobiliario y componentes para bombas, entre otros.

Su estructura básicamente es un polímero vinílico, con cierta semejanza al polietileno¹¹, aunque el monómero de este último es el etileno, y el monómero del polipropileno es propileno. Si el polímero se fabricara de manera industrial sería de tipo lineal, con tres isómeros: isotáctica, sindiotáctica, atáctica, diferenciándose cada una de los arreglos de los grupos metilo.

Este polímero puede funcionar como plástico o como fibra, teniendo como procesos de fabricación, el proceso en solución, proceso en suspensión y proceso en fase gas.

¹⁰ Tecnología de los plásticos. *Materiales plásticos* [en línea] <www.tecnologiadelosplasticos.com/2011/06/polipropileno.html> [Consulta: 15 de mayo de 2013].

¹¹ Reciclaje de plásticos. *Propiedades de plásticos*. [en línea] <[www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/\(6\)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/(6)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf)> [Consulta: 7 de junio de 2013].

2.4.1. Polipropileno reciclado

Los envases de polipropileno hoy en día son la fuente con mayor potencial para el reciclaje del sector comercial; por tanto el reciclaje de plásticos es viable colectarlo y reprocesarlo.

Es el más ligero de los plásticos principales usados para embalaje, con gravedad específica de 0,905; su alta cristalinidad imparte alta resistencia a la tracción, rigidez y dureza. Los productos moldeados usualmente tienen alto brillo y tienen alta resistencia a estropearse.

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables se encuentran definidas de acuerdo la etapa del proceso de transformación del material, tomando en cuenta las pruebas preliminares.

Tabla III. **Variables de proceso**

Variable	Dependiente	Independiente	Constante	Inconstante
Preparación de la muestra				
Tamaño de fibra/partícula (coco)	x		x	
Porcentaje de PP		x		x
% Humedad (coco)	x		x	
Temp. de inflamación (coco)		x	x	
Temp. de degradación (PP)		x	x	
Densidad de PP		x	x	
Densidad de coco	x		x	
Capacidad de absorción (coco)		x	x	
Masa total de ensayo	x		x	
Producto terminado				
Carga de compactación		x	x	
Tiempo de prensado		x	x	
Tiempo de transferencia de calor	x			x
Densidad	x			x
Capacidad de absorción	x			x

Continuación de la tabla III.

Variable	Dependiente	Independiente	Constante	Inconstante
Producto terminado				
Esfuerzo máximo de flexión	x			x
Dureza	x			x
% Humedad	x			x
Punto de inflamación	x			x

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

Con esta investigación se pretende aprovechar los materiales considerados desecho, siendo estos el coco y polipropileno, para formular un tipo de madera plástica que sirva como alternativa a los aglomerados de madera. La fibra de coco fue recolectada en el kilómetro 61 de la autopista a Palín en el departamento de Escuintla, en 17 puestos destinados a la venta de esta fruta tropical, los cuales no le dan ningún uso, ni la venden a alguna entidad particular para su posterior transformación. El polipropileno reciclado se obtuvo de una empresa dedicada al reciclaje y venta de polímeros desechados, los cuales son distribuidos como partículas de tamaño definido y/o *pellets*.

Para cada probeta se realizó distinta mezcla utilizando 40, 60 y 80 de porcentaje en masa del polipropileno reciclado. Asimismo, se preparó el tamaño de partícula de la fibra de coco molida utilizando la masa retenida por el tamiz Núm. 8, la masa retenida por el tamiz Núm. 30 y las partículas que dejó pasar este último material correspondiente a un tamaño menor a 0,540 milímetros.

Para tener las probetas con las características adecuadas se utilizó el molino de martillos, el horno de convección forzada y la prensa hidráulica pertenecientes al Laboratorio de la Sección de Tecnología de la Madera, del Centro de Investigaciones de Ingeniería.

3.3. Recursos humanos disponibles

Para el desarrollo de la investigación se contó con el personal a cargo del Laboratorio de la Sección de Tecnología de la Madera, del Centro de Investigaciones de Ingeniería, incluyendo la experimentación y desarrollo de pruebas físicas y mecánicas, por otra parte se contó con el apoyo de un ingeniero a cargo de análisis de calidad de agua, quien proporcionó el equipo para los análisis químicos resultantes de la prueba de capacidad de absorción del coco y del producto terminado.

Dicha investigación fue realizada y asesorada por:

- Investigadora: Ana Gabriela Coyoy Paz
- Asesor de Investigación: Ing. Qco. Jorge Emilio Godínez

3.4. Recursos materiales disponibles

Los recursos físicos correspondientes al desarrollo de la parte experimental y de las pruebas físicas, químicas y mecánicas se clasifican en: materia prima, equipo, cristalería, reactivos e instrumentación.

3.4.1. Materia prima

Se utilizó el mesocarpio del coco desechado en 17 ventas destinadas a dicha fruta tropical, ubicados en el kilómetro 61 de la autopista a Palín, en el departamento de Escuintla y se compró cantidad suficiente de polipropileno reciclado, de una empresa dedicada a la distribución de polímeros reciclados y vírgenes, en presentación de pequeñas partículas y *pellets*, siendo esta última presentación la utilizada para la investigación.

3.4.2. Equipo

A continuación se presenta el equipo necesario para la toma de datos.

3.4.2.1. Equipo auxiliar

- Molino de martillos
- Horno de convección forzada
- Horno mufla para banco
- Plancha de calentamiento

3.4.2.2. Equipo de medición

- Balanza analítica
- Balanza de humedad
- Espectrofotómetro marca HANNA serie MG2010
- Tamices Núm. 8 y Núm. 30
- Termómetro infrarrojo

3.4.2.3. Accesorios para formulación

- Molde de hierro negro de $4 \frac{5}{32}$ pulgadas de diámetro

3.4.3. Cristalería, reactivos e instrumentación

Para el desarrollo de la investigación se necesitó de cristalería, reactivos e instrumentos como auxiliares para llegar al resultado final, esperado para la evaluación del material fibroreforzado. Lo cual es detallado a continuación:

3.4.3.1. Cristalería

- Probeta de 25 ml
- Pipeta volumétrica 25 ml
- Beacker de 500 ml
- Embudo
- Erlenmeyer
- Crisol
- Balon de Le´chatelier

3.4.3.2. Reactivos

- Equipo de muestreo de Taylor®
- Keroseno

3.4.3.3. Instrumentación

- Pinzas
- Vernier

- Multiparamétrico serie 6PFCII
- Papel aluminio
- Guantes de cuero

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

Se utilizará una técnica cualitativa para las pruebas preliminares en un inicio del proceso de fabricación de las probetas, ya que se observará que la mezcla entre los distintos tamaños de fibra y los *pellets* del polipropileno sea homogénea, además al establecer el tiempo y la temperatura dentro del horno de convección se determinará si el material formulado no se degradó, si el *pellet* llegó a su punto de fusión y si las fibras o partículas de coco transfirieron adecuadamente el calor en toda la extensión de la probeta. Por otra parte se utilizará una técnica cuantitativa, en la cual se registrarán los datos ya expuestos en la sección 3.1, de acuerdo al tamiz escogido para los distintos tamaños de fibra y partícula del mesocarpio molido del coco, la temperatura establecida, tiempo dentro del horno y presión de compactación.

Por otra parte se realizarán mediciones exactas de las pruebas físicas y mecánicas, de acuerdo a los resultados obtenidos de cada formulación y se procederá a realizar una comparación, entre los parámetros del material formulado y los de un producto ya en el mercado a base de madera. Para dicho análisis se establecerán tres porcentajes de polipropileno distintos para cada formulación realizando a su vez tres variaciones de tiempo. Como apoyo se utilizarán los métodos de pruebas detalladas en la Norma ASTM D 1037 para aglomerados.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Posterior a las pruebas preliminares se inició la recolección y documentación de datos, para su posterior ordenamiento, en cada una de las etapas de la investigación, siendo estas: caracterización de materia prima, formulación del material fibroreforzado y en la evaluación de las propiedades físicas, químicas y mecánicas del aglomerado formulado. Además de los datos del material Durpanel, con el cual se comparará la formulación realizada.

3.6.1. Procesamiento de la materia prima

El mesocarpio del coco se disminuyó de tamaño para su posterior secado a 120° Celsius en un horno de convección; debido a la cantidad de materia prima el secado se realizó por grupos; constantemente se verificó el porcentaje de humedad de la materia prima ya que luego se procesaría en el molino de martillos, con el fin de reducir el tamaño de fibra, si el porcentaje de humedad era mayor a 6 por ciento la misma fibra obstruía su paso por el molino y este no funcionaba de manera adecuada, por lo que la reducción de tamaño no era satisfactoria; la fibra procesada se recogió en costales adecuados para evitar pérdida de la misma.

3.6.2. Caracterización de la materia prima

La fibra y partículas de la cáscara se clasificaron por tamaño utilizando únicamente la fibra y partícula retenida por el tamiz Núm. 8, la fibra y partícula retenida por el tamiz Núm. 30 y finalmente las partículas que deja pasar el último tamiz mencionado. De acuerdo a la clasificación anterior se determinó el tamaño de partícula que se utilizaría, incluyendo el tamaño de los *pellets* de

polipropileno, en la formulación. De acuerdo al porcentaje que se utilizaría en cada probeta se determinó lo siguiente:

3.6.2.1. Determinación de la temperatura de fusión, degradación e inflamación de materia prima

Se determinó la temperatura de fusión y degradación del plástico y la temperatura de inflamación del coco según se detalla a continuación:

- Colocar en un crisol 1 gramo aproximadamente de polipropileno y en otro crisol 1 gramo (tomando en cuenta los porcentajes según el tamaño de partícula) de mesocarpio de coco molido.
- Calentar la plancha, en el caso del polímero, 10° Celsius debajo de la temperatura de fusión registrada para polipropileno virgen, en el caso del mesocarpio del coco iniciar a partir de 200° Celsius.
- En ambos crisoles se va controlando la temperatura por medio de un termómetro infrarrojo.
- En el caso del polímero aumentar 2° Celsius por cada minuto y reportar la temperatura a la cual el plástico inicia a perder la forma de *pellet* para fusionarse.
- Reportar la temperatura a la cual el polímero empieza a generar vapores, dando pie a la degradación del polímero.
- En el caso del mesocarpio del coco, aumentar la temperatura de la plancha 2° Celsius por cada minuto según sea el cambio de la materia gradualmente, y reportar la temperatura a la cual se quema o carboniza dicha fibra.

3.6.2.2. Determinación del porcentaje de humedad de materia prima

El coco absorbe fácilmente el agua del ambiente, por tanto se utilizó 1 gramo de mesocarpio de coco molido y se colocó en la balanza de humedad ubicada en el Laboratorio de la Sección de Tecnología de la Madera, con lo cual se reportó el dato indicado por dicha balanza en un tiempo específico.

3.6.2.3. Densidad de la materia prima

La densidad del polipropileno reciclado y del mesocarpio de coco molido es menor a la del agua a temperatura estándar, por lo cual se utilizó keroseno y un balón de Le´chatelier de la siguiente manera:

- Pesar dos gramos de cada materia prima
- Introducir en balones separados, lentamente la masa
- Observar el cambio en el volumen inicial que ocupaba el keroseno
- Reportar la densidad en base a la masa pesada y el cambio de volumen

3.6.2.4. Determinación de la capacidad de absorción de la fibra de coco

Se utilizó una balanza analítica para pesar 5 gramos de mesocarpio de coco molido, utilizando los porcentajes de tamaño de fibra o partícula definidos en la sección 3.6.3, utilizando el siguiente procedimiento:

- Pesar 5 gramos de mesocarpio de coco molido.
- Agregarlos a un *beacker* lleno de agua.
- Dejar el coco dentro del *beacker* durante 24 horas como mínimo.

- Observar si la cantidad total de coco se sumergió de manera notable, de lo contrario dejarlo durante más tiempo.
- Filtrar la mezcla y pesar el mesocarpio de coco.
- Reportar con un porcentaje el aumento en peso de la materia prima.

3.6.3. Proceso de fabricación de la madera plástica

De acuerdo a la transferencia de calor de las fibras de coco hacia el polímero para llegar a su temperatura de fusión, se estableció el porcentaje de cada tamaño de fibra de coco a utilizar, además del porcentaje en peso de polipropileno en la formulación, luego se estableció una temperatura de 275 °C, evitando la degradación del plástico y la carbonización de la fibra.

Con base en el molde de hierro negro de 4 5/32 pulgadas de diámetro, se eligió la cantidad total de formulación y se definió la cantidad exacta de aluminio a usar, para evitar la pérdida de materia durante el calentamiento. Para ello se utilizó la balanza analítica, el horno de convección y se eligió 10 toneladas de presión para la compactación. Las muestras pesadas correspondían a tres corridas de cada formulación con porcentaje de 40, 60 y 80 de polipropileno. Y 27 por ciento de la fibra con tamaño de 44,31 milímetro (mm) de largo aproximadamente, con partículas de 2,36 mm, 33 por ciento de la fibra con tamaño de 8,69 mm de largo y partículas de 0,54 mm aproximadamente, finalmente se utilizó 40 por ciento con partículas menores a 0,54 mm.

Para cada variación de porcentaje de polipropileno se ensayó la formulación con tres tiempos distintos, dentro del horno para el calentamiento de la muestra.

3.6.4. Análisis fisicomecánico de la matriz formulada

A continuación se detallan las pruebas realizadas a las matrices fibroreforzadas formuladas con mesocarpio molido de coco y *pellet* de polipropileno, tomando como base los procedimientos de evaluación de propiedades detallados en la Norma ASTM D1037 para tableros aglomerados, adecuándolos a un tamaño específico de muestra de acuerdo al molde utilizado de hierro negro con diámetro de $4\frac{5}{32}$ pulgadas.

3.6.4.1. Procedimiento para la determinación de densidad del material formulado

La densidad se determinó tomando como base la sección 126 y 127 de la norma descrita anteriormente, midiendo adecuadamente cada probeta y determinando su peso, como se describe a continuación:

- Eliminar residuos o material que no pertenezca directamente a la probeta.
- Utilizar el Vernier digital para especificar las medidas de la probeta en cuatro puntos distintos.
- Determinar el volumen con la media aritmética de las cuatro medidas realizadas, para cada sección de la probeta.
- Limpiar adecuadamente la balanza y posteriormente se tara.
- Se pesa la probeta de madera plástica formulada.
- Calcular la densidad de acuerdo a las mediciones realizadas.

3.6.4.2. Procedimiento para determinar la capacidad máxima de flexión

Para determinar la resistencia máxima a la ruptura que tiene el material fibroreforzado formulado, se tomó como base de la sección 11 a la 20 de la norma mencionada, utilizando el equipo para este propósito, ubicado en el Laboratorio de la sección de Tecnología de la Madera, tal y como se describe a continuación:

- Cortar adecuadamente las piezas a ensayar con $4 \frac{5}{32}$ de largo y $1 \frac{31}{32}$ pulgadas de ancho.
- Ajustar las piezas a una distancia equidistante de los apoyos.
- Verificar que la carga a aplicar sea en el punto medio.
- Aplicar la carga de manera constante a velocidad moderada, hasta que dicha carga provoque ruptura.
- Observar la fuerza aplicada en dicho momento y reportar.

3.6.4.3. Procedimiento para la determinación de dureza del material formulado

Para determinar la resistencia al uso cotidiano, de la madera plástica formulada, se tomó como base de las secciones 68 a la 73 de la Norma ASTM, utilizando la probeta entera fabricada, con diámetro aproximado de $4 \frac{5}{32}$ pulgadas y con grosor ligeramente variado, según se indica a continuación:

- Ubicar la mesa de soporte en un lugar adecuado y con suficiente espacio para manipular el equipo y las probetas.

- Armar adecuadamente el equipo colocando el marco, las placas y la probeta para poder aplicar la presión con un gato hidráulico, cuidando que este último esté lo más vertical posible.
- Colocar el balín de Janka donde corresponda.
- Aplicar presión gradualmente según el comportamiento de la probeta.
- Determinar la distancia introducida del balín de Janka dentro de la probeta.
- Dejar de aplicar presión cuando la probeta falle o cuando el balín haya ingresado con una distancia igual o mayor a la mitad de su diámetro.
- Reportar la presión utilizada, en el momento que suceda lo descrito en el paso anterior.

3.6.4.4. Procedimiento para determinación de temperatura de inflamación del material formulado

Para llevar a cabo la prueba se utilizó una plancha de calentamiento eléctrica, crisoles de 25 mililitros, un termómetro infrarrojo y como fuente de ignición un encendedor; todo el equipo perteneciente al Laboratorio de la Sección de Tecnología de la Madera, se utilizó de la siguiente manera:

- Cortar piezas de la probeta que pesen aproximadamente 1 gramo.
- Calentar la plancha eléctrica hasta una temperatura de 10 °C por debajo del punto de inflamación esperado, de acuerdo a la sección 3.6.2, referente a la caracterización de la muestra.
- Colocar las piezas dentro de los crisoles.
- Incrementar la temperatura en 1 °C cada minuto o hasta que la temperatura se haya homogenizado en la pieza.

- Observar los cambios físicos de la muestra, hasta que la misma empiece a quemarse.
- Reportar la temperatura a la cual la pieza se quema, observando el proceso de combustión para cada formulación

3.6.4.5. Procedimiento para determinación de capacidad máxima de absorción del material formulado

Para determinar la capacidad de absorción de agua, característica de los paneles aglomerados, se utilizó la norma ASTM citada, de acuerdo a las secciones 100 a 106, utilizando para ellos un tonel fraccionado por la mitad y una base encargada de detener las probetas de cada porcentaje de formulación, según se describe a continuación:

- Pesar las probetas formuladas con un diámetro aproximado de 4 5/32 pulgadas en una balanza analítica.
- Con ayuda del Vernier determinar sus medidas exactas (diámetro y grosor).
- Colocar las probetas dentro de la base de manera segura para evitar perder la identificación de cada una durante el proceso.
- Sumergirlas por un mínimo de 24 horas.
- Suspender las probetas con ayuda de la base, al menos 10 minutos, para remover de manera adecuada el agua en exceso.
- Determinar rápidamente el peso ganado por cada probeta con base en la absorción de agua.
- Como referencia, determinar sus medidas después de la sumersión, para observar la hinchazón producto del agua absorbida.

- Reportar el porcentaje en peso, como la capacidad máxima de absorción de agua.

3.6.4.6. Procedimiento para determinación del porcentaje de humedad del material formulado

Se determinó el porcentaje de humedad para cada formulación del material fibroreforzado, utilizando la balanza de humedad ubicada en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, de la siguiente manera:

- Cortar piezas de la probeta que pesen aproximadamente 1 gramo.
- Colocar de manera individual cada pieza dentro de la balanza de humedad.
- Reportar el contenido de humedad indicado por la balanza en un tiempo específico.

3.6.5. Análisis químico del agua residual (prueba de absorción)

Se realizó la prueba de capacidad de absorción sumergiendo todas las probetas a analizar, colocándolas debidamente en una estructura de alambre para mantenerlas dentro del agua durante las 24 horas correspondientes, siguiendo el procedimiento del apartado 3.5.2.4 y 3.6.4.5, obteniendo así un agua residual, a la cual se le observó un color oscuro, partículas que causaban la turbidez y con olor característico, por lo que se le realizó un análisis químico, para determinar que sustancias se encuentran disueltas producto de la sumersión de todas las probetas, según se detalla a continuación:

- Medir el potencial de hidrógeno (pH) por medio de un multiparamétrico. Para ello tomar muestras de 25 mililitros del agua antes y después de la prueba.
- Medir la conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$) por medio de un multiparamétrico. Para ellos tomar muestras de 35 mililitros del agua antes y después de la prueba.
- Medir el total de sólidos disueltos (partes por millón) por medio de un multiparamétrico. Para ello tomar una muestra de 25 mililitros del agua antes y después de la prueba.
- Medir la concentración de hierro disuelto (partes por millón) en agua por medio de un espectrofotómetro. Para ello tomar una muestra de 10 mililitros del agua antes y después de la prueba.
- Medir la concentración de cloruros disueltos (partes por millón) en agua por medio de un espectrofotómetro. Para ello tomar una muestra de 10 mililitros del agua antes y después de la prueba.
- Medir la concentración total Álcalis disueltos (partes por millón) en agua por medio del equipo de muestreo Taylor®. Para ello realizar una dilución 1/100, y tomar una alícuota de 25 mililitros de esta, el resultado se multiplica por 100 para obtener el resultado real. Dicho análisis se realiza tomando agua antes y después de la prueba.
- Medir la dureza total del agua (partes por millón) por medio del equipo de muestreo Taylor®. Para ello realizar una dilución 1/100, y tomar una alícuota de 25 mililitros de esta, el resultado se multiplica por 100 para

obtener el resultado real. Dicho análisis se realiza tomando agua antes y después de la prueba.

- Medir la concentración de calcio (partes por millón) por medio del equipo de muestreo Taylor®. Para ello realizar una dilución 1/100, y tomar una alícuota de 25 mililitros de esta, el resultado se multiplica por 100 para obtener el resultado real. Dicho análisis se realiza tomando agua antes y después de la prueba.

3.6.6. Análisis fisicomecánicos del Durpanel

Al material Durpanel que actualmente se vende en el mercado, se le realizaron las mismas pruebas fisicomecánicas que al material formulado tomando las siguientes mediciones:

- Para la prueba de densidad cortar piezas cuadradas de $4 \frac{5}{32}$ pulgadas por lado y seguir el procedimiento descrito en la sección 3.6.4.1.
- Cortar piezas de $4 \frac{5}{32}$ pulgadas de largo y $1 \frac{31}{32}$ pulgadas de ancho, para luego reportar la capacidad máxima de flexión con base en la sección 3.6.4.1.
- Para reportar la dureza con base en el procedimiento de Janka, utilizar las piezas cortadas para la prueba de densidad y seguir lo descrito en la sección 3.6.4.3.
- Cortar piezas de aproximadamente 1 gramo y seguir el procedimiento de la sección 3.6.4.4, para reportar la temperatura de inflamación.
- Para determinar la capacidad de absorción cortar piezas cuadradas de $4 \frac{5}{32}$ pulgadas por lado y seguir el procedimiento descrito en la sección 3.6.4.5.

- Determinar el porcentaje de humedad, cortando piezas de aproximadamente 1 gramo y seguir el procedimiento descrito en la sección 3.6.4.6.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

Para la elaboración del trabajo de investigación se recopilaron datos pertenecientes a la caracterización de materia prima, siendo esta, el mesocarpio del coco y el polipropileno. Por otra parte, también se recopilaron datos de la evaluación física, química y mecánica de la matriz fibroreforzada formulada, para compararlo posteriormente con los datos recopilados del material Durpanel. Posteriormente estos datos, se tabularon y ordenaron para hacer más fácil su procesamiento y el análisis de los mismos. Presentando finalmente los resultados en tablas y gráficas, según corresponda para cada evaluación realizada.

3.7.1. Ordenamiento de la información

Los datos recopilados en cada fase de la experimentación, para la formulación de la matriz, se ordenaron en tablas que se muestran en el apéndice, correspondientes a cada evaluación realizada.

3.7.2. Procesamiento de la información

Los datos obtenidos de la caracterización de la materia prima siendo: polipropileno reciclado y el mesocarpio del coco, además de los análisis químicos, la prueba de dureza, la temperatura de inflamación y el por ciento de humedad, se presentaron como resultado directo de la fase experimental. No requirieron de algún cálculo adicional. Por otra parte los resultados de las

evaluaciones físicas y mecánicas: densidad, esfuerzo máximo de flexión y capacidad de absorción, realizadas tanto al material fibroreforzado formulado, como al material de comparación (Durpanel), se obtuvieron haciendo uso de relaciones matemáticas basadas en la Norma ASTM D1037 para materiales aglomerados.

3.7.2.1. Determinación de densidad

La densidad es utilizada para determinar la cantidad de masa en una unidad de volumen de todo objeto o sustancia que ocupe un espacio específico, por lo que se midieron las dimensiones de las probetas formuladas y las cortadas únicamente del material de comparación, además se determinó el peso de cada una de ellas, siendo el resultado, la media aritmética de las medidas con las cuales se utilizó la siguiente relación matemática:

$$\rho = \frac{m}{v}$$

[Ecuación 1, Referencia 1]

Donde:

ρ = densidad [g/cm³]

m= masa [g]

v= volumen [cm³]

3.7.2.2. Determinación del esfuerzo máximo de flexión

Dicha prueba también es conocida como módulo de ruptura, el cual según la norma se calcula a partir de la carga máxima soportada por el material de

análisis, la distancia entre los apoyos colocados en ambos extremos de la pieza, el espesor y ancho efectivo de la misma. Se tomó como resultado la media aritmética de los datos calculados, según:

$$R = \frac{3PL}{2bd^2}$$

[Ecuación 2, Referencia 1]

Donde:

R = módulo de ruptura [Kg/cm²]

P = carga o esfuerzo de ruptura [Kg]

L = distancia entre apoyos [cm]

b = ancho efectivo del espécimen [cm]

d = espesor efectivo del espécimen [cm]

3.7.2.3. Capacidad de absorción

La absorción máxima de agua de la matriz formulada y del material de comparación, es presentada como resultado de la relación entre pesos finales e iniciales de cada probeta a analizar, sumergiéndolas en agua durante un mínimo de 24 horas, siendo el resultado la media aritmética de los datos obtenidos y manejados según la siguiente ecuación:

$$\% Abs = \frac{(p_f - p_o)}{p_o} * 100$$

[Ecuación 3, Referencia 1]

Donde:

% Abs = Porcentaje de absorción

p_f =Peso final [g]

p_o =Peso inicial [g]

3.8. Análisis estadístico

Se realizaron repeticiones de cada evaluación para corroborar los datos, observando la precisión entre ellos, dando como resultado a cada prueba la media aritmética de los mismos. Además se analizó la variación entre cada grupo de datos para determinar si existiera un efecto significativo. Por lo que, se realizó a su vez, el análisis de varianza.

3.8.1. Media aritmética

Se determinó la media aritmética de cada parámetro para la caracterización de la materia prima y de cada una de las pruebas físicomecánicas, a partir de la suma de los valores de las tres repeticiones realizadas, para cada evaluación y se dividió dentro del número total de las mismas, de la siguiente manera:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}$$

[Ecuación 4, Referencia 2]

Donde:

\bar{X} = media aritmética

X_i = dato para cada corrida

n = número de corridas por cada evaluación

3.8.2. Análisis de varianza

Para el análisis de las respuestas cuantitativas se utilizó el análisis de varianza ANOVA, con lo cual se pretendió determinar si existe algún efecto significativo en las evaluaciones físicas y mecánicas realizadas a las probetas

formuladas, al variar el porcentaje de polipropileno y el tiempo dentro del horno para la transferencia de calor entre la materia prima y poder llegar al punto de fusión del polímero.

Para dicho análisis se utilizó un sistema de dos factores, el cual se relaciona con 3 variaciones de porcentaje de polipropileno (J), 3 variaciones de tiempo (I), y para cada grupo de formulaciones se utilizaron 3 repeticiones (K). Por tanto se trabajó con un total de 27 probetas (IJK) por cada evaluación fisicomecánica. Utilizando para ello un nivel de confianza del 95 por ciento y la tabla de valores críticos para la distribución, según se muestra a continuación:

Tabla IV. **Sistema de distribución de datos para cada prueba fisicomecánica**

Prueba fisicomecánica			
Tiempo (min)	40 % PP	60 % PP	80 % PP
30			
30			
30			
40			
40			
40			
50			
50			
50			

Fuente: elaboración propia.

Ecuaciones necesarias para el análisis de varianza ANOVA tomando como factor (A) el tiempo, I variaciones de tiempo, factor (B) el porcentaje de polipropileno, J variaciones de este:

- Grados de libertad

Factor A: $gl = I - 1$

Error: $gl = IJ - 1(K - 1)$

Factor B: $gl = J - 1$

Total: $gl = IJK - 1$

Factor AB: $gl = (I - 1)(J - 1)$

- Suma de cuadrados

Factor A: $SSA = \frac{1}{JK} \sum_i X_{i..}^2 - \frac{1}{IJK} \sum_i X_{...}^2$

Factor B: $SSB = \frac{1}{IK} \sum_j X_{.j.}^2 - \frac{1}{IJK} \sum_i X_{...}^2$

Factor AB: $SSAB = \sum_i \sum_j \sum_k (\bar{X}_{ij.} - \bar{X}_{i..} - \bar{X}_{.j.} + \bar{X}_{...})^2$

Error: $SSE = \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk} - \bar{X}_{ij.})^2$

Total: $SST = \sum_i \sum_j \sum_k (X_{ijk} - \bar{X}_{...})^2$

- Cuadrados medios

Factor A: $MSA = \frac{SSA}{i-1}$

Error: $MSE = \frac{SSE}{IJ(K-1)}$

Factor B: $MSB = \frac{SSB}{J-1}$

Total: $MST = \frac{SST}{IJK-1}$

Factor AB: $MSAB = \frac{SSAB}{(I-1)(J-1)}$

- F Calculado

Factor A: $f_A = \frac{MSA}{MSE}$

Factor AB: $f_{AB} = \frac{MSAB}{MSE}$

Factor B: $f_B = \frac{MSB}{MSE}$

Tomando en cuenta los datos generados por las fórmulas anteriores se toma la siguiente hipótesis:

- H_0 = el efecto de los datos generados es insignificante en la prueba fisicomecánica realizada.
- H_a = el efecto de los datos generados es significativo en la prueba fisicomecánica realizada.

Tabla V. **Análisis de varianza del efecto de la variación de parámetros sobre la prueba fisicomecánica a analizar**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (H_0)
Tiempo						
% PP						
Interacción						
Error						
Total						

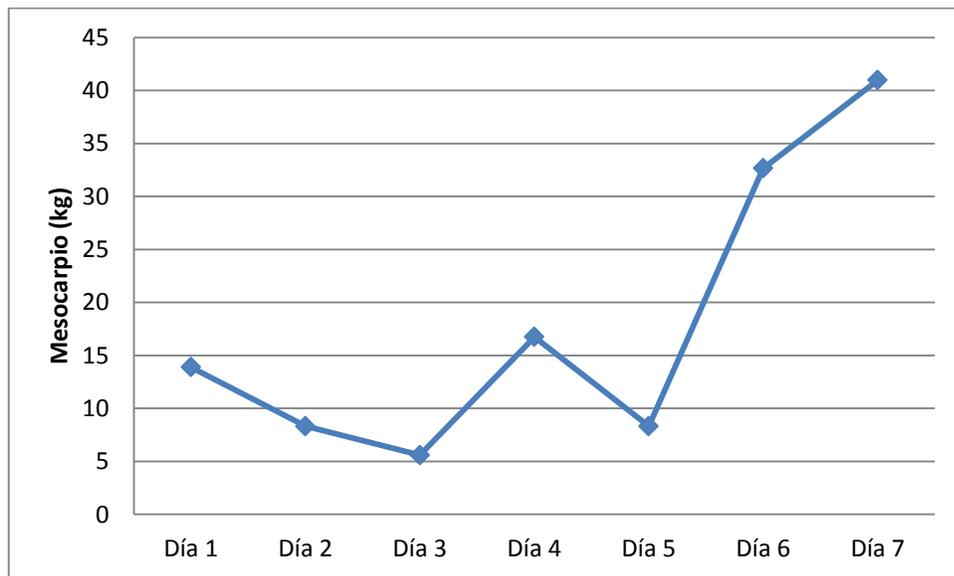
Fuente: elaboración propia.

4. RESULTADOS

4.1. Fibra de coco como desecho

Este apartado describe la cantidad de coco desechado diariamente por una semana, en los puestos de esta fruta tropical, ubicados en kilómetro 61 de la autopista a Palín, departamento de Escuintla, como producto de la venta cotiledón únicamente junto con el endoesperma del coco. Por lo cual la fibra de coco o mesocarpio es desechada sin ningún uso apropiado por alguna entidad.

Figura 2. **Desecho de fibra de coco no aprovechado en el kilómetro 61 autopista a Palín, Escuintla**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. **Análisis de varianza del efecto del día de venta o de los puestos de venta sobre la cantidad de fibra de coco desechada**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Puesto	7	726,1250	103,7321	3,77	2,24	Rechazada
Día	6	9774,6071	1629,1012	59,28	2,32	Rechazada
Error	42	1154,2500	27,4821			
Total	55	11654,9821				

Fuente: elaboración propia.

4.2. Caracterización de la materia prima

Este apartado se refiere a la descripción de datos importantes acerca de la materia prima utilizada, siendo esta la fibra de coco y los *pellets* de polipropileno reciclado como aglutinante, manipulados adecuadamente para formular probetas de madera plástica.

Tabla VII. **Caracterización de la fibra de coco y el aglutinante polipropileno reciclado**

Detalle	Polipropileno reciclado	Coco
Tamaño de partícula (mm)	4,00	2.36 , 0.54, <0.54
Tamaño de fibra (mm)	NAP	44,31 a 8,69
Temperatura degradación/ inflamación (°C)	272	281
Temperatura de fusión (°C)	172	NAP
% Humedad	NAP	64,4655
Densidad (g/ml)	0,0897	0,0948
Capacidad de absorción (%)	NAP	205

Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Análisis químico del agua residual del coco

La siguiente tabla muestra los resultados del análisis químico del agua residual del coco utilizado para la prueba de capacidad de absorción, en la cual la fibra de coco molida permaneció sumergida durante 24 horas.

Tabla VIII. Análisis químico del agua residual del coco

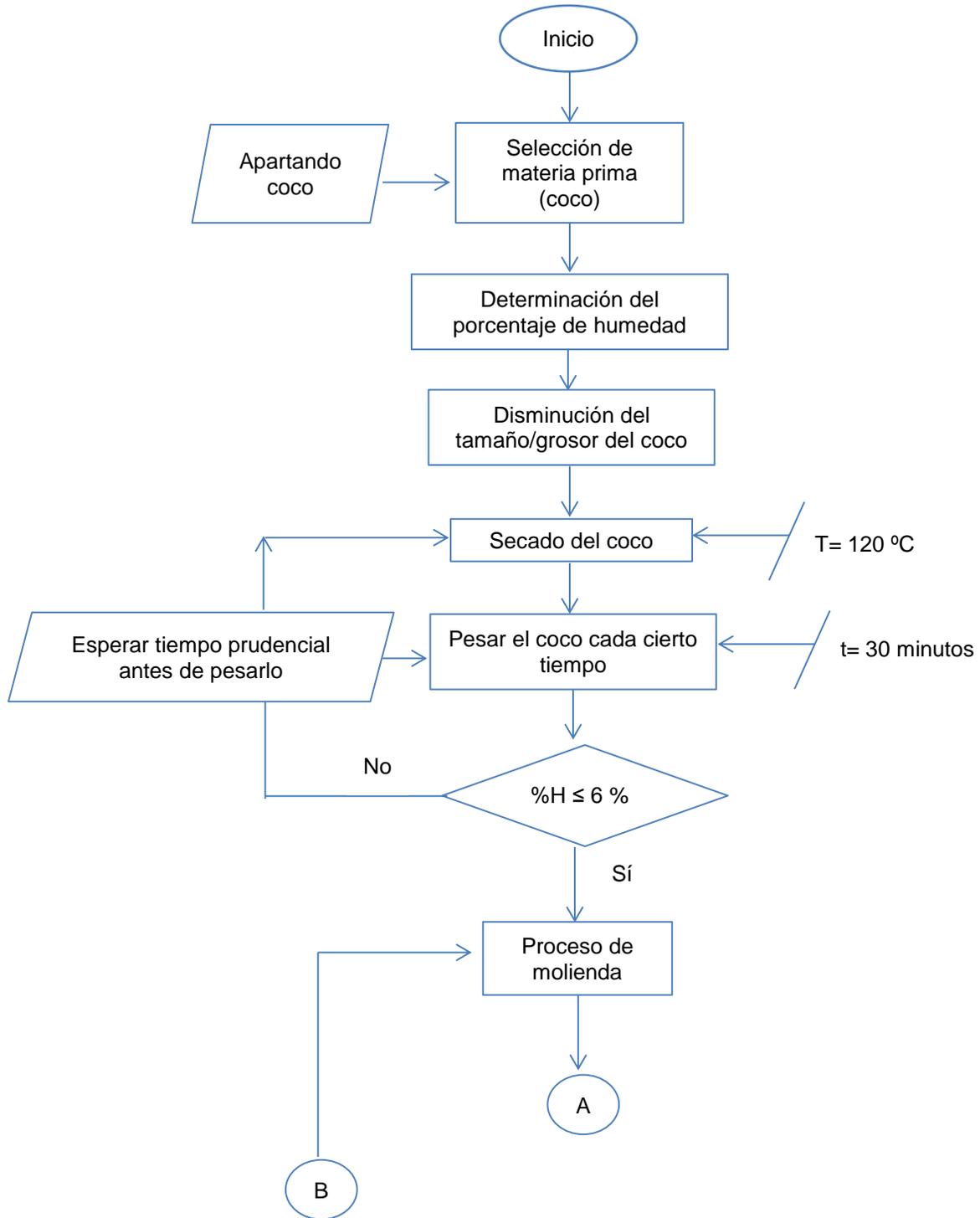
Análisis	Agua residual (Coco)
pH	5,94
Conductividad	786,50
TDS (ppm)	383,30
Hierro (ppm)	0,40
Cloruros (ppm)	495,20
Alcalinidad total (ppm)	850,00
Dureza total (ppm)	220,00
Calcio (ppm)	10,00

Fuente: elaboración propia.

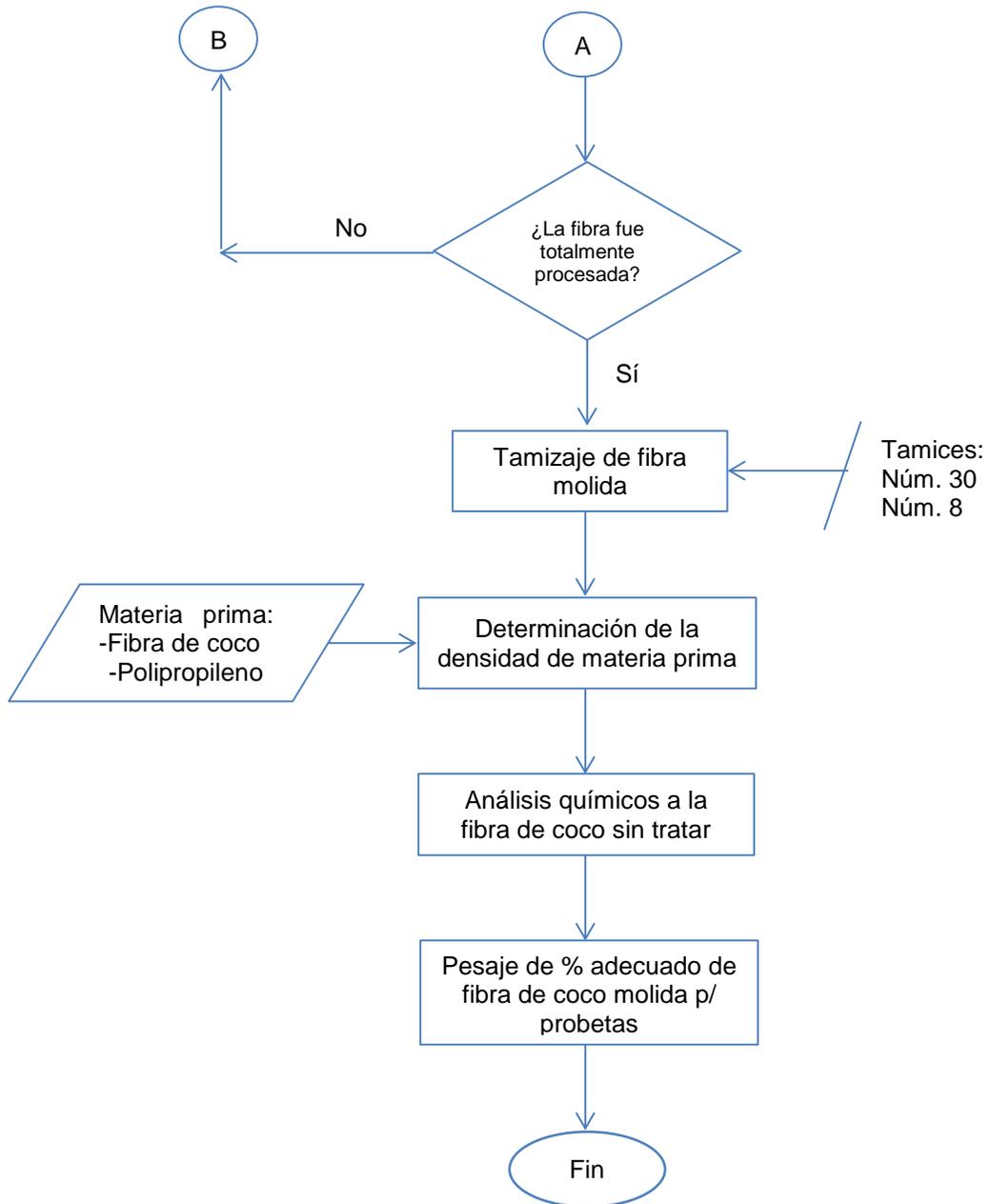
4.3. Proceso de preparación de la materia prima previo a su transformación

Este apartado detalla el proceso adecuado para la preparación del polipropileno y la fibra de coco, siendo esta última la que abarca mayor tiempo para su preparación, cuidando su porcentaje de humedad y el tamaño de partícula.

Figura 3. **Proceso de preparación de fibra de coco**



Continuación de la figura 3.



Fuente: elaboración propia.

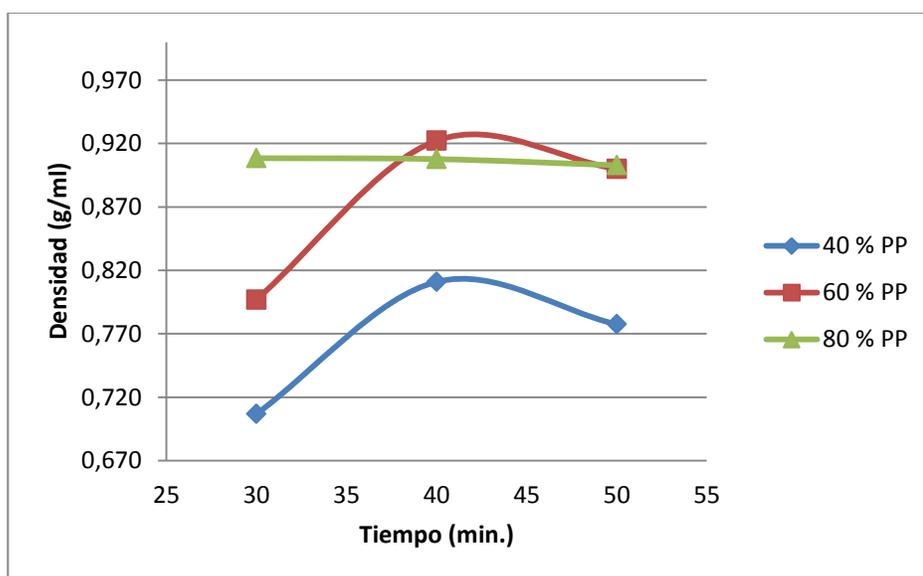
4.4. Propiedades fisicomecánicas de las probetas de madera plástica

Se detallan las propiedades de la madera plástica formulada, siendo estas: densidad, módulo de ruptura, dureza, temperatura de inflamación, capacidad de absorción y porcentaje de humedad al utilizar variaciones en el porcentaje de polipropileno reciclado, así como tres variaciones de tiempo.

4.4.1. Densidad

Se muestra el comportamiento gráfico de la densidad de las probetas de madera plástica, tomando en cuenta tres porcentajes, cada uno con tres variaciones de tiempo del proceso dentro del horno. Estableciendo una sola temperatura para todos los ensayos.

Figura 4. **Densidad del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la densidad**

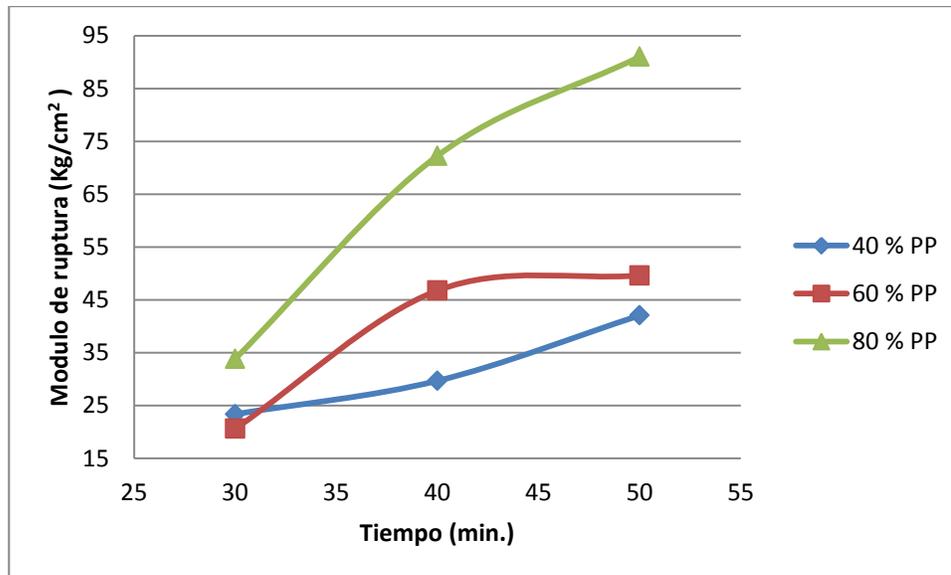
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	0,0281	0,0141	04,21	3,55	Rechazada
% PP	2	0,0983	0,0491	14,72	3,55	Rechazada
Interacción	4	0,0158	0,0039	01,18	2,93	Aceptada
Error	18	0,0601	0,0033			
Total	26	0,2022				

Fuente: elaboración propia.

4.4.2. Módulo de ruptura

La siguiente gráfica representa el comportamiento del esfuerzo máximo de flexión, representado por medio del módulo de ruptura, de las probetas con tres porcentajes distintos de polipropileno, realizando tres variaciones de tiempo del proceso dentro del horno.

Figura 5. **Módulo de ruptura del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre el módulo de ruptura**

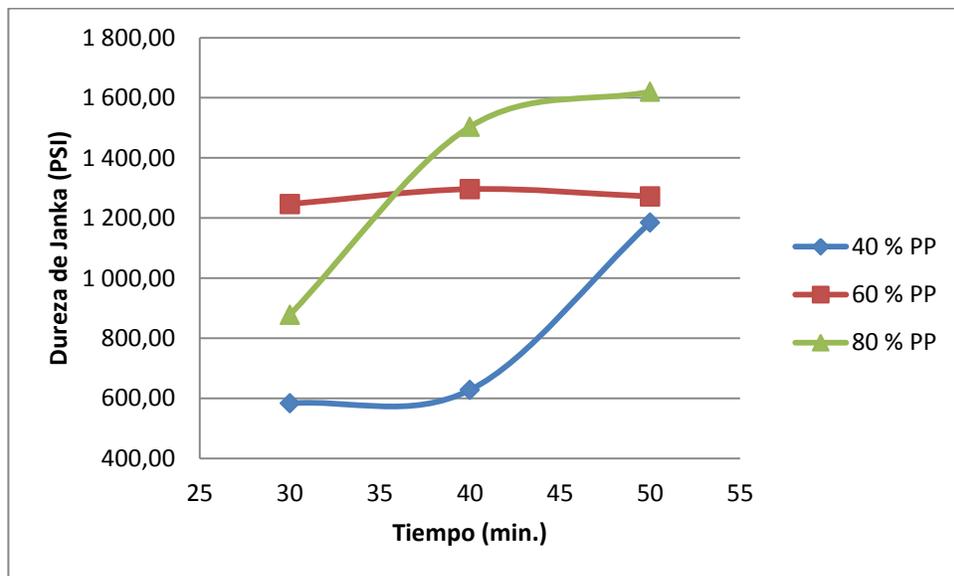
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	5 725,3458	2 862,6729	4,59	3,55	Rechazada
% PP	2	5 772,1665	2 886,0833	4,63	3,55	Rechazada
Interacción	4	1 447,0795	361,7699	0,58	2,93	Aceptada
Error	18	11 216,2185	623,1232			
Total	26	24 160,8103				

Fuente: elaboración propia.

4.4.3. Dureza

Se presenta la relación gráfica de los valores de dureza de las probetas ensayadas con base en el método de Janka, utilizando un balín de tamaño determinado con probetas de distinto porcentaje de polipropileno, realizando a su vez tres variaciones de tiempo del proceso dentro del horno.

Figura 6. **Dureza de Janka del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la dureza de Janka**

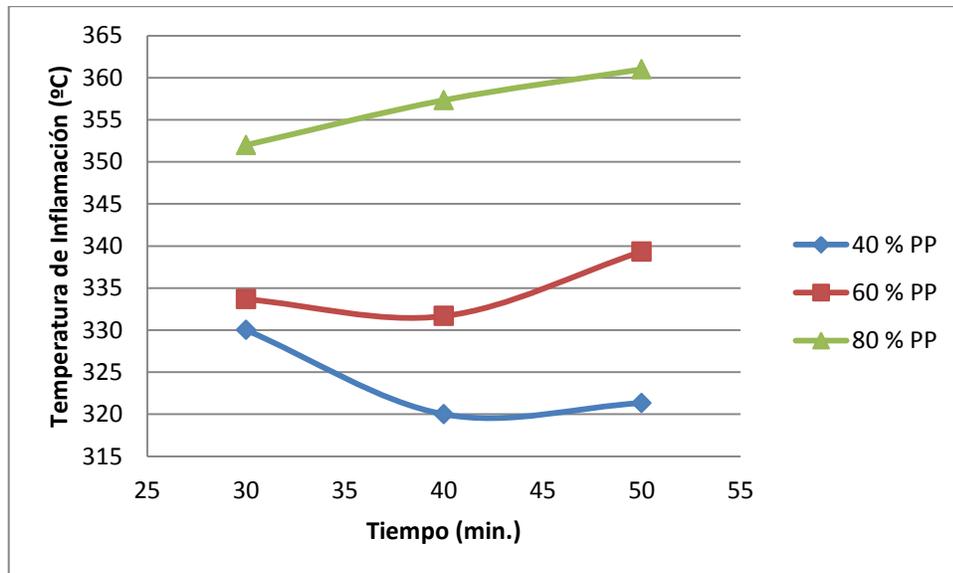
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	938 578	469 289	4,09	3,55	Rechazada
% PP	2	1 542 913	771 456	6,72	3,55	Rechazada
Interacción	4	696 417	174 104	1,52	2,93	Aceptada
Error	18	2 066 243	114 791			
Total	26	5 244 151				

Fuente: elaboración propia.

4.4.4. Temperatura de inflamación

Se presenta gráficamente la temperatura de inflamación determinada para cada probeta ensayada con distinto porcentaje de polipropileno, realizando tres variaciones en el tiempo del proceso dentro del horno.

Figura 7. **Temperatura de inflamación del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la temperatura de inflamación**

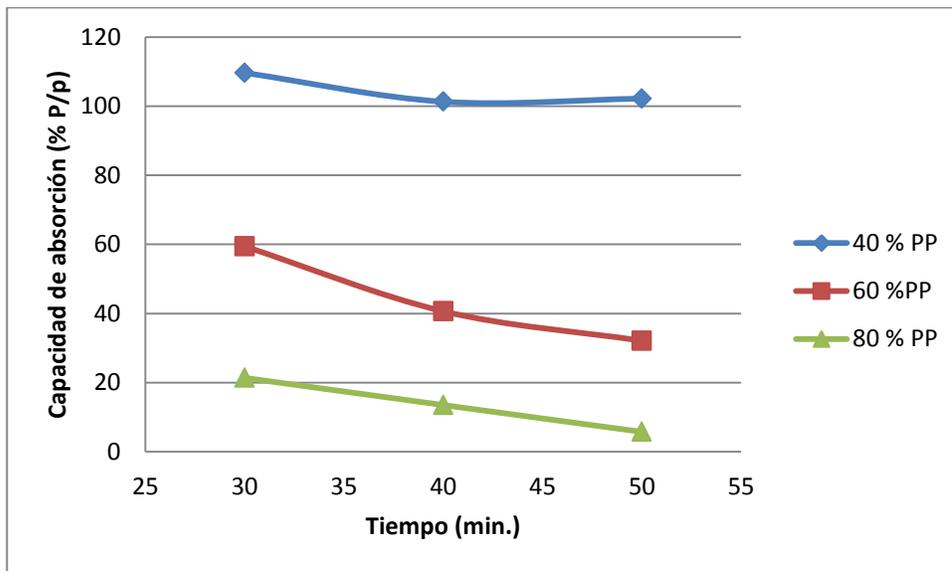
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	80,2963	40,1481	0,34	3,55	Rechazada
% PP	2	5 074,7407	2537,3704	21,23	3,55	Rechazada
Interacción	4	314,3704	78,5926	0,66	2,93	Aceptada
Error	18	2 151,3333	119,5185			
Total	26	7 620,7407				

Fuente: elaboración propia.

4.4.5. Capacidad de absorción

Se representa la relación gráfica del porcentaje de absorción de agua con base en la cantidad de polipropileno contenido en cada probeta ensayada, realizando tres variaciones en el tiempo del proceso dentro del horno.

Figura 8. **Capacidad de absorción del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre la capacidad de absorción**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	1331,3065	665,6533	01,05	3,55	Aceptada
% PP	2	38425,7009	19212,8504	30,36	3,55	Rechazada
Interacción	4	330,4627	82,6157	00,13	2,93	Aceptada
Error	18	11390,7964	632,8220			
Total	26	51478,2665				

Fuente: elaboración propia.

4.4.5.1. **Análisis químico del agua residual de las formulaciones**

La siguiente tabla muestra los resultados del análisis químico del agua residual, de todas las formulaciones utilizadas para la prueba de capacidad de absorción, en la cual la fibra de coco molida permaneció sumergida durante 24 horas.

Tabla XIV. **Análisis químico del agua residual de las formulaciones de material fibroreforzado a 275 °C**

Análisis	Agua residual (formulaciones)
pH	8,82
Conductividad	486,00
TDS (ppm)	209,00
Hierro (ppm)	39,30
Cloruros (ppm)	105,20
Alcalinidad total (ppm)	30,00

Continuación de la tabla XVI.

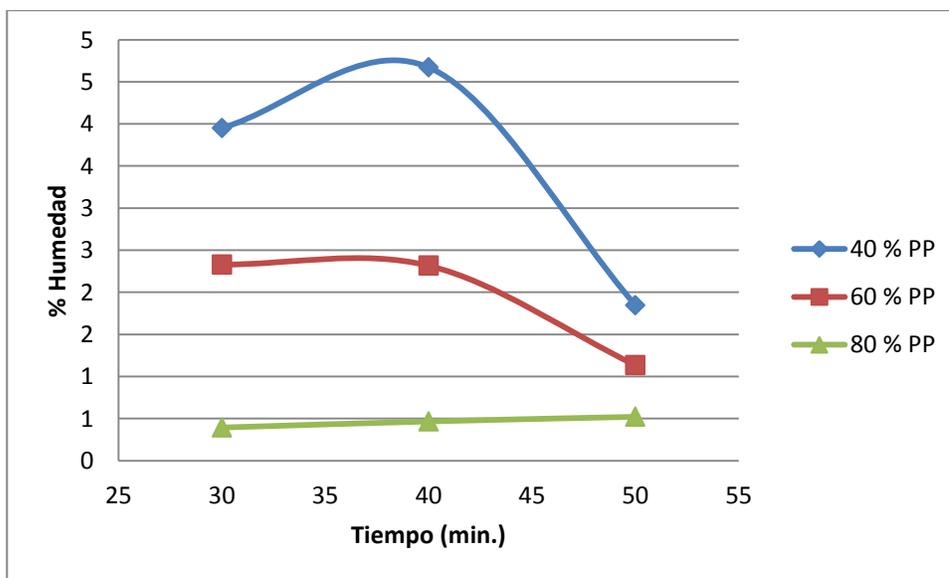
Dureza total (ppm)	20,00
Calcio (ppm)	20,00

Fuente: elaboración propia.

4.4.6. Porcentaje de humedad

Se presenta gráficamente el porcentaje de humedad de las probetas ensayadas con distinta proporción de polipropileno, realizando tres variaciones de tiempo del proceso dentro del horno.

Figura 9. **Porcentaje de humedad del material fibroreforzado formulado a 275 °C, realizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y composición**



Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Análisis de varianza del efecto de la variación del tiempo de transferencia de calor y el porcentaje de polipropileno sobre el porcentaje de humedad**

Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrado medio	F Calculado	F Crítico	Hipótesis nula (Ho)
Tiempo	2	08,7628	04,3814	07,82	3,55	Rechazada
% PP	2	41,2735	20,6368	36,82	3,55	Rechazada
Interacción	4	07,0175	01,7544	03,13	2,93	Rechazada
Error	18	10,0897	00,5605			
Total	26	67,1436				

Fuente: elaboración propia.

4.5. Comparación del material fibroreforzado con Durpanel

Esta sección describe los resultados obtenidos en las pruebas fisicomecánicas realizadas al material fibroreforzado a 275 °C, con una mezcla controlada de tamaño de fibra de coco y 80 por ciento de polipropileno reciclado, utilizando tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y los obtenidos del material Durpanel actualmente en el mercado.

Tabla XVI. **Resultados de las pruebas fisicomecánicas del material fibroreforzado formulado a 275 °C con 80 % PP y tres variaciones de tiempo de transferencia de calor y del material Durpanel**

Propiedades	80 %			Durpanel
	30	40	50	
ρ (g/cm³)	0,908	0,908	0,903	0,634
% H	0,394	0,467	0,522	11,390
R (Kg/cm²)	33,830	72,260	91,010	129,990
% Abs	21,380	13,520	5,770	69,460

Continuación de la tabla XVI.

Dureza (PSI)	878,000	1 503,670	1 620,330	525,000
T_{inf} (°C)	352,000	357,330	361,000	287,000

Fuente: elaboración propia.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Se realizaron matrices fibroreforzadas con base en una proporción controlada de distintos tamaños de partícula y fibra de coco, además de una proporción de polipropileno reciclado en un molde de hierro negro con 4 5/32 pulgadas de diámetro, variando para ello la proporción del polímero en cada formulación siendo: 40, 60 y 80 por ciento. Para todas las probetas realizadas se utilizó una temperatura de 275 °C en un horno de convección forzada, variando a su vez el tiempo de transferencia de calor dentro del horno siendo: 30, 40 y 50 minutos. Posteriormente se aplicó 10 toneladas de presión para compresión de todas las probetas con 3 repeticiones, realizando un total de 27 probetas para cada evaluación fisicomecánica.

Para el proceso de obtención de la fibra de coco, se ubicó una venta específica de dicha fruta tropical, en el kilómetro 61 de la autopista a Palín, departamento de Escuintla, con la cual se estimó la cantidad de fibra (mesocarpio) desechada por 17 puestos de venta de dicho lugar, según se observa en la figura 2. Se determinó así un desecho aproximado de 268,74 kilogramos correspondiente a 107,49 docenas de coco por semana aproximadamente, siendo los jueves, sábado y domingo, donde se encuentra mayor cantidad de desecho.

Se determinaron las propiedades físicas y químicas de la materia prima, previo al proceso de transformación para la formulación del material. Según se indica en la tabla VII, se utilizó un tamaño aproximado de 4 mm de *pellet* del polipropileno reciclado, y tres distintos tamaños de partícula y fibra de coco, debido a que durante las pruebas preliminares se observó que el utilizar la

misma proporción de tamaño de éste último, la fibra de 44,31 y 8,69 mm aproximadamente interfería en el proceso de transferencia de calor para llegar al punto de fusión del polímero. Por lo cual se utilizó una mezcla controlada de partícula de coco siendo: 40 por ciento la partícula menor a 0,54 mm, 33 por ciento la partícula retenida por el tamiz Núm. 30 de aproximadamente 0,54 mm con fibra de 8,69 mm de largo, y por último se utilizó 27 por ciento de partículas retenidas por el tamiz Núm. 8 aproximadamente de 2,36 mm con fibra de 44,31 de largo aproximadamente.

Para obtener una buena formulación se determinó a su vez que la temperatura de fusión y degradación del polímero es de 172 y 272 grados Celsius respectivamente, también se determinó que la temperatura de inflamación del mesocarpio es de 281 grados Celsius. Otra característica importante del coco es su porcentaje de humedad y capacidad de absorción, ya que según se muestra en la figura 3, el agua contenida interfiere significativamente en el proceso de secado del mismo.

Para el proceso de elaboración y formulación del material, se debe seleccionar el coco desechado; determinar su porcentaje de humedad para su posterior disminución de tamaño y grosor del mesocarpio, ya que entre más grueso es el mismo, es más prolongado el tiempo de secado. Para esto se debe de utilizar una temperatura de 120 grados Celsius, pesando el coco cada 30 minutos hasta obtener un porcentaje menor o igual a 6 por ciento, debido a que su incremento provoca daño en el equipo de molienda, ya que se extrae el agua por compresión de manera brusca, y esto provoca que la fibra se adhiera al sistema de molienda y no permita obtener el material deseado, provocando que se repita el proceso varias veces.

Al finalizar la molienda se procedió a tamizarlo para luego clasificar las partículas en tres grupos, el material retenido por el tamiz Núm. 8, el retenido por el tamiz Núm. 30 y las partículas que deja pasar este último, según figura 3.

A las formulaciones establecidas, se les evaluó el efecto que causa la variación del polipropileno reciclado, utilizado como aglomerante y la variación de tiempo dentro del horno para la respectiva transferencia de calor, en las propiedades fisicomecánicas del material, utilizando para ello, los procedimientos descritos en la Norma ASTM D1037 para tableros aglomerados.

Los resultados de la evaluación de densidad al material fibroreforzado formulado se presentan en la figura 4, se observa que al aumentar la cantidad de polipropileno aumenta la densidad del material formulado, teniendo una variación insignificante al utilizar 80 por ciento de polipropileno y tres tiempos distintos dentro del horno, esto ocurrió debido a que la fibra de coco seca tiene peso muy bajo, por tanto al aumentar la cantidad de coco disminuye la densidad del material. De acuerdo al análisis de varianza, el dejar constante el tiempo y variar el porcentaje si tiene efecto significativo en la densidad y la interacción, entre ambos parámetros de tiempo y porcentaje no tiene efecto significativo.

En la figura 5 se presentan los resultados de la capacidad máxima de flexión a través del módulo de ruptura, presentando mayor resistencia a la flexión al utilizar 80 por ciento de polipropileno, aumentando el tiempo de transferencia de calor, debido a que la cáscara de coco mejora la capacidad de flexión, y a su vez es una resistencia a la transferencia de calor, con lo que al aumentar el tiempo se logra llegar al punto de fusión del polímero ubicado en todos los puntos del material. Observando así que cambios en el tiempo/porcentaje dejando constante un parámetro, si tiene efecto significativo en la capacidad de flexión.

Se evaluó la dureza del material fibroreforzado formulado, con el balín de Janka para determinar la resistencia a la deformación al aplicarle presión en un solo punto, presentando los resultados en la figura 6, observando que la mejor formulación fue utilizando 80 por ciento de polipropileno, resistiendo una carga de 1 600 PSI aproximadamente, con lo cual se afirma que es posible utilizarlo para techos interiores y pisos. Determinando que variaciones de tiempo y porcentaje de material influyen significativamente en la dureza. También es posible observar que al utilizar una composición de 60 por ciento las variaciones son insignificantes, debido a que dicha cantidad de polipropileno no es suficiente para elevar su resistencia y la cantidad de coco es la adecuada para detener una deformación significativa en el material.

Para la temperatura de inflamación se utilizó medio gramo de material ya que con una cantidad mayor la cantidad de plástico interfiere y se emplea mayor tiempo para su inflamación. En la figura 7 se observa que el punto de inflamación depende únicamente de la cantidad de coco utilizado, por lo cual, el material se inflamó a mayor temperatura teniendo 80 por ciento de polipropileno, siendo aproximadamente 361 grados Celsius en comparación con la formulación de 40 por ciento de coco, ya que la cantidad de polímero no interfirió de manera significativa en el proceso y este ocurrió en menor tiempo y menor temperatura.

En la figura 8 se observa que la capacidad de absorción mínima se obtuvo para las formulaciones de 80 por ciento de polipropileno, independientemente del tiempo de transferencia de calor, debido a que contiene la menor cantidad de fibra de coco, siendo esta última, la materia que se hidrata con el agua. Por lo que se determina que variaciones en el tiempo no tienen efecto significativo en la prueba, únicamente variaciones de materia prima. Similares son las tendencias de comportamiento en la determinación de porcentaje de humedad

en la figura 9, ya que el material presenta mayor humedad con 40 por ciento de polipropileno, observando a su vez que al utilizar 40 y 60 por ciento del polímero, el porcentaje de humedad, disminuye al aumentar el tiempo dentro del horno, ya que hay mayor posibilidad de extraer el agua retenida por el material; por tanto al utilizar 80 por ciento de polímero no hay variación significativa en el porcentaje de humedad, ya que se hace más característico el comportamiento del plástico que de la fibra de coco.

Se comparó la densidad del material formulado y la del Durpanel observando así según la tabla XVI, que la densidad de la mejor formulación de 80 por ciento de polipropileno en comparación con el Durpanel, es 1,4 veces mayor. Para la prueba de capacidad máxima de flexión, se obtuvo mayor resistencia a la flexión del material Durpanel, siendo esta 1,32 veces mayor, con la cual se tuvo que modificar el ancho representativo para poder utilizar de manera adecuada el equipo ubicado en el Laboratorio de Tecnología de la Madera, ya que la ecuación a utilizar, está en función del ancho del espécimen.

Para la prueba de dureza de Janka se obtuvo menor resistencia al uso cotidiano del material, es decir a la deformación en un solo punto, siendo una diferencia significativa al material formulado con 80 por ciento de polipropileno en su lectura más alta, siendo 3 veces mayor la de este último. Aunque los dos materiales no son aptos para exteriores, tiene mayor durabilidad el material fibroreforzado con mayor tiempo dentro del horno ya que la capacidad de absorción de este es 12 veces menor que el Durpanel, a su vez este último presenta 21,8 veces mayor porcentaje de humedad que la formulación con 80 por ciento de polipropileno.

Al realizar la prueba de capacidad de absorción se tomó muestra del agua a utilizar antes del proceso y del agua residual de la prueba de la fibra de coco, sin ningún tratamiento y al total de formulaciones realizadas. Observando según la tabla VIII y XIV para el coco sin tratamiento un pH aproximado de 5,94, esto denota el grado de acidez y la tendencia corrosiva hacia otros materiales. Se obtuvo una conductividad de 786,50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando alta concentración de minerales, por otro lado, para el total de formulaciones realizadas el pH aumentó hasta un valor aproximado de 8,82, denotando alto grado de alcalinidad y mayor cantidad de materia insoluble y suspendida. Se obtuvo menor conductividad siendo aproximadamente 486,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mostrando menor concentración de minerales.

En la comparación de ambos materiales, se observó que el total de sólidos disueltos en el material formulado es mayor, por el contrario la cantidad de cloruros disminuyó notablemente en este último, lo cual es reflejado en la diferencia del potencial de hidrógeno.

CONCLUSIONES

1. En una semana es desechada 268,74 kg de fibra de coco, únicamente por 17 puestos de venta dedicados a esta fruta tropical, siendo su mayor cantidad de desecho sábado y domingo.
2. Se identificó el tamaño de partícula y fibra de coco adecuado para lograr una buena formulación, el tamaño del *pellet* fue constante. Además se identificó la temperatura de fusión y degradación del polipropileno y la temperatura de inflamación del coco, para no afectar a la formulación con la temperatura establecida para el proceso. Se determinó que el coco tiene un porcentaje de humedad alto por lo cual aumenta el tiempo de secado.
3. Se determinó un procedimiento adecuado para la correcta preparación de la materia prima tomando en cuenta su clasificación, el porcentaje de humedad al llegar al proceso de molienda y la separación por tamaño de partículas, para crear una mezcla controlada en las formulaciones.
4. Se determinó que la mejor formulación de material fibroreforzado es la de 80 por ciento de polipropileno y 20 por ciento de fibra de coco, teniendo variaciones insignificantes en su densidad al aumentar el tiempo dentro del horno; mayor resistencia a la flexión, resistencia a la deformación por presión y temperatura de inflamación porque interfiere en el comportamiento natural de la fibra de coco; presenta menor capacidad de absorción y porcentaje de humedad por la cantidad de fibra.

5. El Durpanel tiene menor densidad, mayor resistencia a la flexión, significativamente menor dureza, menor temperatura de inflamación, capacidad de absorción significativamente mayor al igual que el porcentaje de humedad, en comparación con el material fibroreforzado formulado con 80 por ciento de polipropileno.

RECOMENDACIONES

1. Realizar campañas sobre la utilización de desechos sólidos y los beneficios que estos traen al medio ambiente.
2. Realizar un análisis microbiológico al mesocarpio del coco a utilizar, para determinar el efecto que tiene en las características físicas y mecánicas del material a utilizar.
3. No establecer tiempos menores a 30 minutos ni mayores a 50 minutos para la estadía de la muestra dentro del horno, ya que al ser menor, el polipropileno reciclado no llega a su punto de fusión y si es mayor provoca daños físicos a la fibra de coco a una temperatura de 275 °C.
4. No introducir al molino de martillo materia prima con un porcentaje de humedad mayor al 6 por ciento, ya que ocasionará problemas mecánicos y no se obtendrá un proceso de molienda satisfactorio.
5. Comparar el material fibroreforzado con mayor cantidad de aglomerados que se encuentren actualmente en el mercado, para establecer su uso.

BIBLIOGRAFÍA

1. American Society for Testing and Materials. *Standards methods of evaluating properties of wood-base fiber and particle panel materials*. Designation D 1037-89. Annual book of ASTM standards. Philadelphia, Pennsylvania. ASTM, 1989. 30 p.
2. DEVORE, Jay L. *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. 6a ed. México: Thomson Learning, 2005. 441 p.
3. Econocul Guatemala. *Superficie cultivada, rendimiento y producción por productos*. [en línea] <[www.econosul.com/PDF /8%20Paises /Guatemala/Produccion%20Guatemala.pdf](http://www.econosul.com/PDF/8%20Paises/Guatemala/Produccion%20Guatemala.pdf)> [Consulta: 3 de mayo de 2013].
4. EVA Tech. *History of Wood Plastic Composite (WPC)*. Área de plásticos. [en línea] <<http://www.eva-last.co.za/request-information.html>> [Consulta: 15 de mayo de 2013].
5. GÓMEZ. José Enríquez. *Obtención a nivel laboratorio del tinte natural del exocarpo del coco (Cocus nucifera L.) mediante lixiviación por maceración dinámica utilizando muestra seca y fresca*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 113 p.

6. INFOAGRO Guatemala. *Coco, cocos, cocotero, palma de coco*. [en línea] <<http://articulos.infojardin.com/Frutales/fichas/coco-cocos-cocotero-cocoter.html>> [Consulta: 24 de abril de 2013].
7. LUNA, Donaciano. *Obtención de carbón activado a partir de la cáscara de coco*. [en línea], Área de Termofluidos, av. San Pablo 180, México D.F.; <www.izt.uam.mx/newpage/contactos/anterior/n64ne/carbon_v2.pdf> [Consulta: 28 de julio de 2013].
8. MCDONALD, Armando. *Coalición para el avance de estructuras de madera* [en línea], Departamento forestal. <www.fpl.fs.fed.us/documnts/rips/fplrip-4706-003-wood-plastics-composites.pdf> [Consulta: 5 de mayo de 2013].
9. MÉRIDA, Mario. *Extracción y caracterización fisicoquímica del tinte natural obtenido del exocarpo del coco (Cocos nucifera), como aprovechamiento del desecho de fuentes comerciales*. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 101 p.
10. PÉREZ ESCOBAR, Milton Adolfo. *Elaboración de matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de estopa del coco y determinación de sus propiedades físicas y mecánicas*. Trabajo de graduación de Ing. Civil. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2008. 102 p.

11. QUIÑONEZ DE LA CRUZ, Francisco. *Evaluación experimental de matrices fibro-reforzadas con desechos del fruto del coco, y de paneles para construcción de vivienda económica*. FODECYT. Trabajo de graduación de Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2009. 112 p.
12. *Reciclaje de plásticos: propiedades de plásticos*. [en línea] <[www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/\(6\)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf](http://www.infoiarna.org.gt/media/file/areas/desechos/documentos/nac/(6)%20PLASTICOS_DIVERSOS_GUA.pdf)> [Consulta: 7 de junio de 2013].
13. *Tecnología de los plásticos: materiales plásticos*. [en línea] <tecnologiadelosplasticos.com/2011/06/polipropileno.html> [Consulta: 15 de mayo de 2013].

APÉNDICES

Figura 1. Requisitos académicos

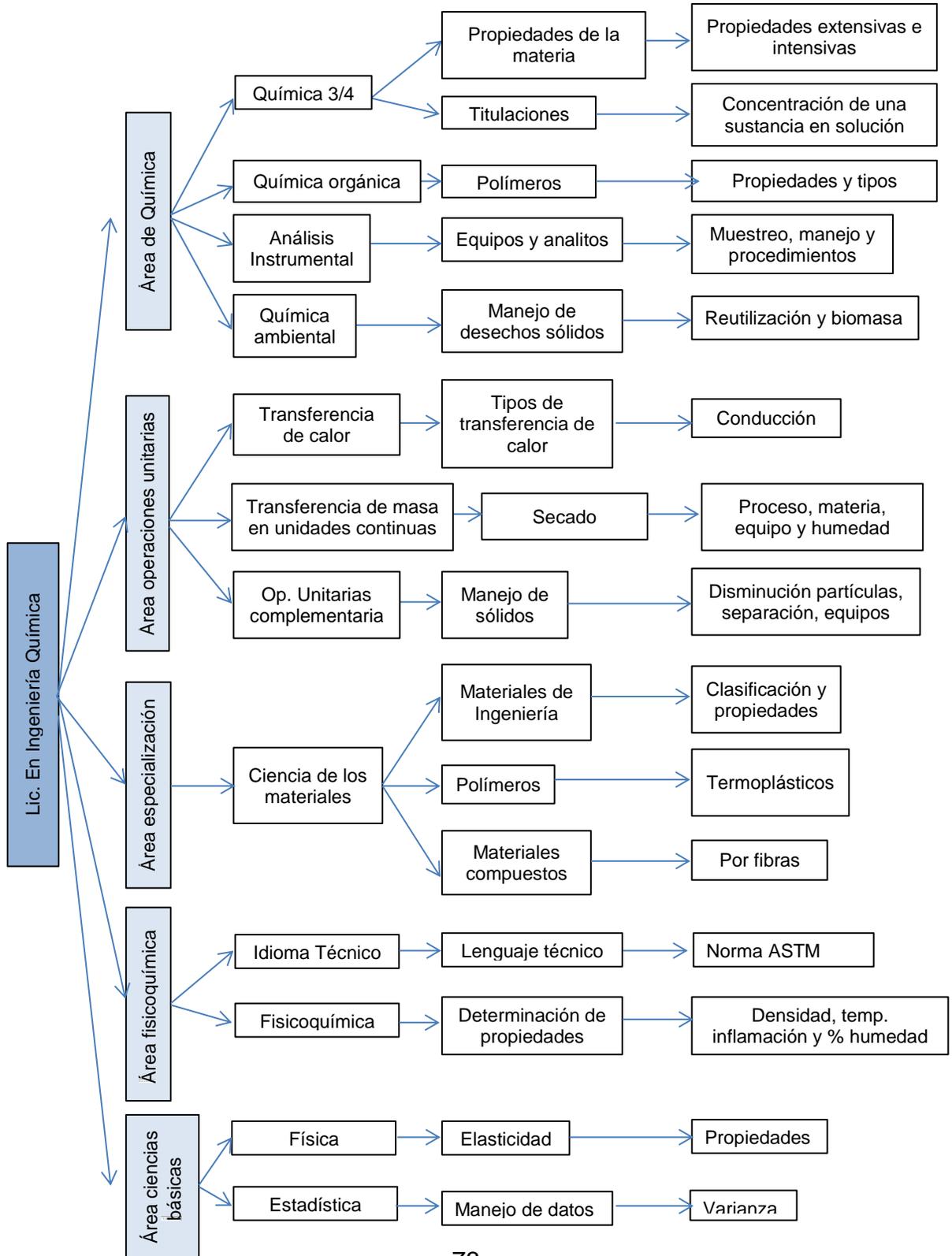
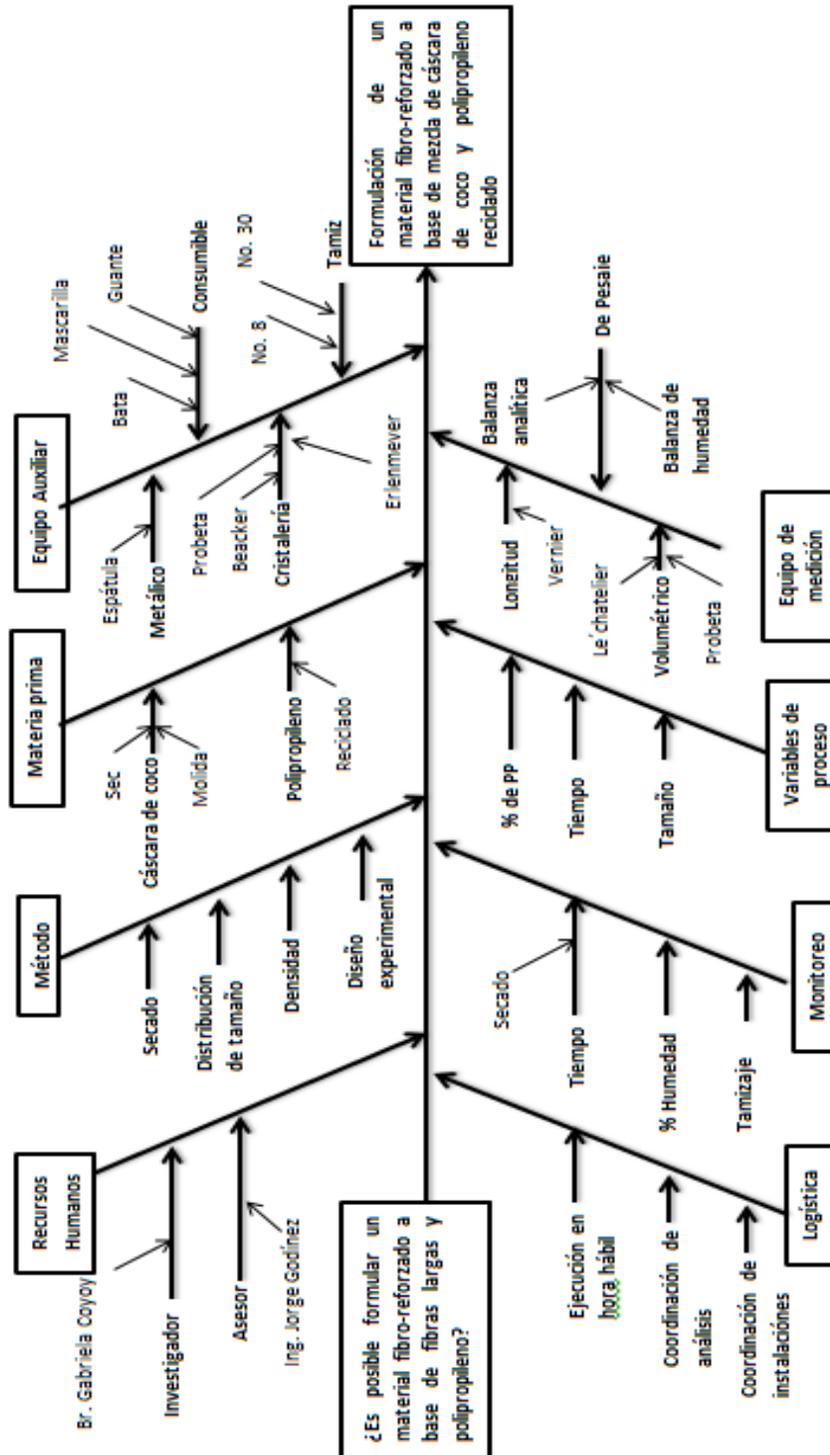
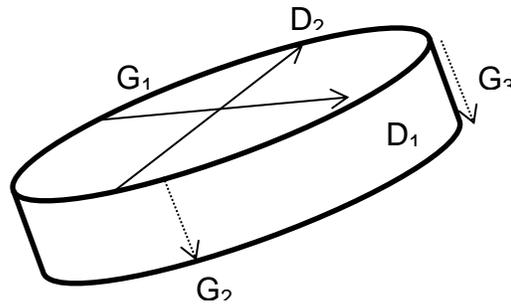


Figura 2. Diagrama de Ishikawa



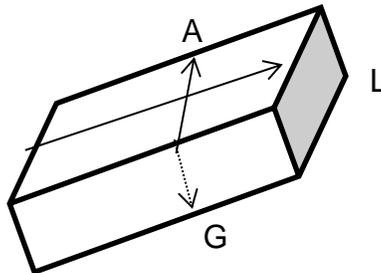
Tablas de recopilación y procesamiento de la información

Figura 3. **Medición de probetas**



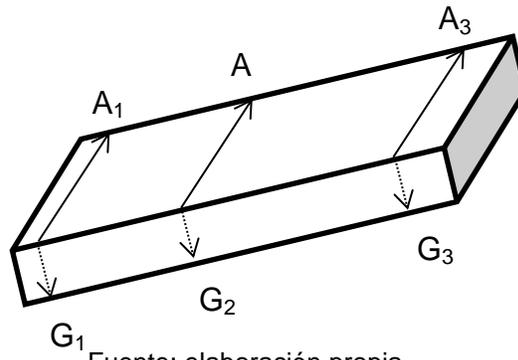
Fuente: elaboración propia

Figura 4. **Medición de piezas de Durpanel**



Fuente: elaboración propia

Figura 5. **Medición de piezas para la prueba de flexión del material formulado y de Durpanel**



Fuente: elaboración propia

Tabla I. Dimensiones y peso del material formulado

% PP	Tiempo (min)	Masa (g)	Diámetro (mm)		Grosor (mm)		
			D ₁	D ₂	G ₁	G ₂	G ₃
40	30	107,77	107,41	106,47	15,44	15,80	19,51
		114,77	106,69	106,68	19,34	17,69	19,02
		108,26	106,47	103,95	16,92	17,72	16,98
	40	111,33	105,05	105,92	12,81	13,76	17,95
		110,96	105,25	105,94	15,32	16,64	13,19
		112,37	103,78	106,63	16,60	17,18	19,17
	50	109,08	106,01	106,01	14,92	12,37	15,42
		104,09	103,99	107,78	20,03	17,57	20,35
		109,15	106,04	105,87	15,02	13,29	15,27
60	30	115,43	106,78	106,28	18,38	15,66	13,78
		114,97	107,02	104,90	19,39	17,45	15,69
		115,71	104,36	106,28	15,91	16,35	15,54
	40	114,61	105,14	105,42	14,79	13,90	14,97
		113,82	104,52	104,03	14,87	14,16	13,76
		115,89	104,38	105,16	14,84	13,35	15,28
	50	113,73	104,90	104,47	14,90	16,86	12,64
		114,79	104,54	105,79	14,79	13,43	15,39
		107,15	105,75	105,17	13,04	13,36	14,58
80	30	114,75	105,48	104,29	13,93	15,15	13,95
		116,52	104,49	105,82	15,90	14,60	15,11
		116,96	104,87	104,71	14,24	12,68	17,45
	40	114,95	104,79	104,10	16,34	15,73	12,47
		113,73	104,06	103,78	14,84	14,40	15,10
		113,98	104,24	105,20	16,24	14,94	12,34
	50	115,02	103,77	104,54	13,16	15,99	15,29
		114,15	104,09	103,89	13,07	14,92	15,12
		110,62	104,46	103,87	14,74	16,88	13,56

Fuente: elaboración propia

Tabla II. Datos para la determinación de capacidad máxima de flexión del material formulado

% PP	Tiempo (min)	Ancho (cm)			Grosor (cm)			Carga (kg)	
		A ₁	A ₂	A ₃	G ₁	G ₂	G ₃		
40	30	4,25	4,29	4,38	1,55	1,70	1,69	20	
		4,14	4,23	4,17	1,69	1,78	1,80	22	
		4,58	4,47	4,41	1,68	1,87	1,61	12	
	40	40	4,35	4,42	4,64	1,58	1,58	1,50	22
			4,56	4,49	4,63	1,49	1,66	1,66	22
			4,37	4,46	4,48	1,58	1,82	1,70	20
	50	50	4,38	4,51	4,56	1,56	1,62	1,32	26
			4,69	4,65	4,65	1,58	1,47	1,50	24
			4,66	4,71	4,67	1,40	1,59	1,57	32
60	30	4,29	4,36	4,47	1,59	1,78	1,69	10	
		4,39	4,35	4,27	1,54	1,80	1,55	22	
		4,45	4,41	4,49	1,79	1,56	1,72	14	
	40	40	4,71	4,61	4,51	1,53	1,65	1,54	48
			4,41	4,41	4,58	1,43	1,49	1,44	24
			4,46	4,48	4,47	1,68	1,66	1,48	22
	50	50	4,77	4,69	4,57	1,50	1,44	1,61	44
			4,46	4,55	4,54	1,43	1,64	1,53	26
			4,80	4,81	4,66	1,45	1,56	1,47	28
80	30	4,29	4,31	4,39	1,59	1,72	1,45	8	
		4,49	4,49	4,38	1,21	1,61	1,62	26	
		4,45	4,54	4,46	1,37	1,44	1,45	26	
	40	40	4,52	4,41	4,69	1,42	1,45	1,39	40
			4,56	4,55	4,56	1,44	1,51	1,45	38
			4,62	4,69	4,75	1,41	1,44	1,22	44
	50	50	4,55	4,58	4,60	1,54	1,61	1,41	68
			4,56	4,61	4,68	1,48	1,51	1,44	12
			4,66	4,55	4,59	1,31	1,37	1,28	74

Fuente: elaboración propia.

Tabla III. **Peso y dimensiones del Durpanel**

Peso (g)	Ancho (mm)			Largo (mm)			Grosor (mm)		
	A ₁	A ₂	A ₃	L ₁	L ₂	L ₃	G ₁	G ₂	G ₃
117,12	105,48	105,48	105,68	103,56	104,39	104,69	17,09	17,21	16,92
115,46	105,52	104,79	104,97	105,14	105,05	104,66	16,72	17,12	16,82
124,67	105,84	105,85	105,65	106,16	105,38	105,78	16,75	17,02	16,94

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos para la determinación de capacidad máxima de flexión del Durpanel**

Ancho (mm)			Grosor (mm)			Carga (kg)
A ₁	A ₂	A ₃	G ₁	G ₂	G ₃	
26,40	26,67	26,76	16,67	17,22	17,72	60
23,88	24,64	25,16	16,68	17,08	17,06	44
23,17	23,81	24,40	17,35	17,05	17,17	60

Fuente: elaboración propia.

Tabla V. **Datos para la determinación de dureza de Janka del material formulado**

Presión (PSI)	0	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700
d (mm)	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
P _{40t1}	25,10	21,19	20,79	18,26	-	-	-	-	-
	23,90	21,39	20,43	19,72	-	-	-	-	-
	23,77	20,78	19,09	16,51	-	-	-	-	-
P _{40t2}	23,86	20,33	18,78	18,14	17,76	17,42	-	-	-
	23,29	21,43	19,84	19,01	17,89	-	-	-	-
	23,25	20,43	19,50	16,85	16,05	15,63	-	-	-
P _{40t3}	21,56	20,66	19,81	18,90	17,26	16,56	16,29	15,32	-
	20,05	19,34	18,33	18,13	17,20	17,01	16,79	-	-
	21,77	19,09	18,44	17,75	16,89	15,55	-	-	-
P _{60t1}	23,51	19,37	18,55	18,28	-	-	-	-	-
	22,25	21,14	21,19	20,28	18,58	17,21	-	-	-
	23,23	20,09	18,44	-	-	-	-	-	-

Continuación de la tabla V

Presión (PSI)	0	300	500	700	900	1100	1300	1500	1700
d(mm) Probeta	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d ₇	d ₈	d ₉
P _{60t2}	21,21	19,82	19,73	17,69	17,10	-	-	-	-
	22,32	20,88	19,56	19,39	18,38	17,38	-	-	-
	22,73	20,26	19,27	19,18	-	-	-	-	-
P _{60t3}	21,51	20,03	19,99	18,47	17,59	14,50	-	-	-
	22,42	19,45	19,06	18,24	18,04	17,70	16,93	-	-
	22,11	20,52	19,36	18,48	18,45	18,17	17,87	16,71	-
P _{80t1}	21,70	19,25	19,22	17,70	-	-	-	-	-
	21,59	20,72	19,78	18,81	17,65	17,03	-	-	-
	22,00	20,25	18,66	18,59	-	-	-	-	-
P _{80t2}	21,14	20,85	19,87	18,15	18,12	18,06	17,09	16,83	16,17
	21,78	19,44	19,08	19,22	18,39	17,46	-	-	-
	21,68	20,54	19,25	18,63	18,51	15,71	-	-	-
P _{80t3}	21,49	21,05	20,62	20,24	18,94	18,47	17,88	17,00	16,66
	17,64	17,25	17,20	16,35	15,85	15,34	15,25	15,10	14,86
	17,15	15,66	15,20	15,23	14,54	13,54	12,45	12,67	12,21

Fuente: elaboración propia.

Tabla VI. Datos para la determinación de dureza de Janka del Durpanel

Presión (PSI)	300	500	700
d (mm) Corrida	d ₁	d ₂	d ₃
1	2,20	6,08	6,12
2	2,04	2,89	4,87
3	3,30	4,74	6,35

Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. **Temperatura de inflamación del material formulado y del Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	T _{inf} (°C)		
		T ₁	T ₂	T ₃
40	30	329	333	328
	40	329	337	294
	50	334	332	298
60	30	338	326	337
	40	340	325	330
	50	338	340	340
80	30	356	348	352
	40	358	354	360
	50	362	358	363
Durpanel		285	282	276

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos para obtener la capacidad máxima de absorción del material formulado**

% PP	Tiempo (min)	Peso (g)	
		p _o	p _r
40	30	107,77	227,26
		114,77	225,59
		108,26	239,67
	40	111,33	188,65
		110,96	208,70
		112,37	276,76

Continuación de la tabla VIII.

% PP	Tiempo (min)	Peso (g)	
		p _o	p _o
40	50	109,08	178,77
		104,09	284,59
		109,15	184,70
60	30	115,43	182,39
		114,97	194,26
		115,71	175,06
	40	114,61	161,61
		113,82	156,94
		115,89	165,82
	50	113,73	148,18
		114,79	157,02
		107,15	138,50
80	30	114,75	134,63
		116,52	143,08
		116,96	145,05
	40	114,95	128,28
		113,73	130,32
		113,98	130,38
	50	115,02	120,18
		114,15	120,66
		110,62	118,50

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos para obtener la capacidad máxima de absorción del Durpanel**

Corrida	Peso (g)	
	p _o	P _f
1	117,20	201,74
2	115,46	196,52
3	124,67	207,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Porcentaje de humedad del material formulado y del Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	% Humedad		
		%H ₁	%H ₂	%H ₃
40	30	2,583	4,273	4,998
	40	4,225	4,457	5,329
	50	2,193	1,610	1,734
60	30	3,480	1,298	2,213
	40	0,898	2,674	3,375
	50	1,070	1,137	1,196
80	30	0,733	0,227	0,223
	40	0,239	0,263	0,899
	50	0,524	0,644	0,398
Durpanel		11,519	11,489	11,162

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. Datos calculados para evaluar la densidad del material formulado y del Durpanel

% PP	Tiempo (min)	Masa (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	$\bar{\rho}$ (g/cm ³)
40	30	107,77	151,94	0,709	0,707
		114,77	167,01	0,687	
		108,26	149,59	0,724	
	40	111,33	129,69	0,858	0,811
		110,96	131,80	0,842	
		112,37	153,43	0,732	
	50	109,08	125,66	0,868	0,777
		104,09	170,09	0,612	
		109,15	128,08	0,852	
60	30	115,43	142,08	0,812	0,797
		114,97	154,41	0,745	
		115,71	138,81	0,834	
	40	114,61	126,69	0,905	0,922
		113,82	121,81	0,934	
		115,89	124,92	0,928	
	50	113,73	127,39	0,893	0,900
		114,79	126,27	0,909	
		107,15	119,32	0,898	
80	30	114,75	123,93	0,926	0,908
		116,52	132,03	0,882	
		116,96	127,55	0,917	
	40	114,95	127,20	0,904	0,908
		113,73	125,36	0,907	
		113,98	124,94	0,912	
	50	115,02	126,21	0,911	0,903
		114,15	122,05	0,935	
		110,62	128,34	0,862	
Durpanel		117,12	187,80	0,624	0,634
		115,46	186,25	0,620	
		124,67	189,13	0,659	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XII. **Determinación de capacidad máxima de flexión del material formulado y de Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	Carga (kg)	Ancho (cm)	Grosor (cm)	R (kg/cm²)	\bar{R} (kg/cm²)	
40	30	20	4,31	1,65	27,72	23,35	
		22	4,18	1,76	27,67		
		12	4,49	1,72	14,67		
	40	40	22	4,47	1,55	33,23	29,67
			22	4,56	1,60	30,37	
			20	4,43	1,70	25,47	
	50	50	26	4,48	1,50	41,79	42,04
			24	4,66	1,51	36,44	
			32	4,68	1,52	47,88	
60	30	10	4,37	1,69	13,03	20,60	
		22	4,33	1,63	30,96		
		14	4,45	1,69	17,82		
	40	40	48	4,61	1,57	68,15	46,75
			24	4,47	1,45	41,26	
			22	4,47	1,61	30,85	
	50	50	44	4,67	1,52	66,33	41,24
			26	4,52	1,53	39,71	
			28	4,75	1,49	42,77	
80	30	8	4,33	1,59	11,90	33,83	
		26	4,45	1,48	43,10		
		26	4,48	1,42	46,51		
	40	40	40	4,54	1,42	70,93	72,26
			38	4,55	1,47	62,95	
			44	4,68	1,36	82,91	
	50	50	68	4,58	1,52	104,11	91,01
			12	4,62	1,48	19,34	
			74	4,60	1,32	149,58	
Durpanel		30	2,66	1,72	123,48	120,99	
		22	2,46	1,69	101,18		
		30	2,38	1,72	138,31		

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Determinación de dureza de Janka del material formulado y de Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	Dureza (PSI)	<i>Dureza</i> (PSI)
40	30	600	583,00
		-	
		566	
	40	620	627,50
		-	
		635	
	50	1360	1185,00
		-	
		1010	
60	30	1343	1246,50
		1150	
		-	
	40	1340	1296,00
		1252	
		-	
	50	1010	1271,67
		1300	
		1505	
80	30	878	878,00
		876	
		-	
	40	2500	1503,67
		921	
		1090	
	50	1450	1620,33
		2100	
		1311	
Durpanel		450	525
		-	
		600	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Temperatura de inflamación del material formulado y del Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	T _{inf} (°C)
40	30	330,00
	40	320,00
	50	321,33
60	30	333,67
	40	331,67
	50	339,33
80	30	352,00
	40	357,33
	50	361,00
Durpanel		287,00

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Capacidad máxima de absorción del material formulado y de Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	% Abs	$\overline{\%Abs}$	
40	30	110,88	109,61	
		96,56		
		121,38		
	40	40	69,45	101,28
			88,09	
			146,29	
50	50	63,89	102,17	
		173,41		
		69,22		
60	30	58,01	59,42	
		68,97		
		51,29		
	40	40	41,01	40,66
			37,88	
			43,08	
	50	50	30,29	32,11
			36,79	
			29,26	

Fuente: elaboración propia.

Continuación de la tabla XV.

% PP	Tiempo (min)	% Abs	$\overline{\%Abs}$
80	30	17,32	21,38
		22,79	
		24,02	
	40	11,59	13,52
		14,59	
		14,39	
	50	4,49	5,77
		5,70	
		7,12	
Durpanel		72,13	69,46
		70,21	
		66,04	

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVI. **Porcentaje de humedad del material formulado y de Durpanel**

% PP	Tiempo (min)	% H	$\overline{\%H}$
40	30	2,583	3,951
		4,273	
		4,998	
	40	4,225	4,670
		4,457	
		5,329	
50	2,193	1,846	
	1,610		
	1,734		
60	30	3,480	2,330
		1,298	
		2,213	
	40	0,898	2,316
		2,674	
		3,375	

Continuación de la tabla XVI

% PP	Tiempo (min)	% H	$\overline{\%H}$
60	50	1,070	1,134
		1,137	
		1,196	
80	30	0,733	0,394
		0,227	
		0,223	
	40	0,239	0,467
		0,263	
		0,899	
	50	0,524	0,522
		0,644	
		0,398	
Durpanel		11,519	11,390
		11,489	
		11,162	

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Figura 1. **Disminución de tamaño de materia prima**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 2. **Secado de materia prima en horno de convección forzada**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 3. **Molienda de materia prima. (Molino de martillos)**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 4. **Materia prima procesada**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 5. **Determinación del porcentaje de humedad**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 6. **Compactación de las probetas ensayadas**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 7. **Material formulado con distinta composición de Polipropileno**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 8. **Prueba de Capacidad de Absorción**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 9. **Prueba de capacidad máxima de flexión**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 10. **Determinación de la temperatura de inflamación**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 11. **Determinación de la dureza de Janka**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.

Figura 12. **Determinación de la Densidad con keroseno**



Fuente: taller de Sección de Tecnología de la madera. CII/USAC.