



# ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL



## FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

### ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS A PARTIR DEL CUESCO DE LA PALMA AFRICANA CON ADHESIVO BIODEGRADABLE

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO

LÓPEZ ZAPATA RICARDO ANDRÉS  
ricardo.lopez01@epn.edu.ec

MESÍAS NARVÁEZ JEAN CARLOS  
jean.mesias@epn.edu.ec

DIRECTOR:  
ING. DÍAZ CAMPOVERDE CARLOS WIME  
carlos.diaz@epn.edu.ec

Quito, enero 2020

## **CERTIFICACIÓN**

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por **Ricardo Andrés López Zapata y Jean Carlos Mesías Narváez**, bajo mi supervisión.

---

Ing. Carlos Díaz, M.Sc.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **Ricardo Andrés López Zapata y Jean Carlos Mesías Narváez**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondiente a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

---

Ricardo Andrés López Zapata

---

Jean Carlos Mesías Narváez

## **DEDICATORIA**

A mis padres, familia, amigos y compañeros que me apoyaron durante mi carrera universitaria.

Ricardo

## **DEDICATORIA**

A mi padre Patricio Mesías, a mi madre Mayra Narváez, a mi hermana Arianna Mesías y a mi abuelito Eduardo Mesías, por darme todo su amor y todo su apoyo.

Jean Carlos

## **AGRADECIMIENTO**

A todos quienes de una u otra manera me ayudaron y apoyaron en la realización de este proyecto.

Ricardo

## **AGRADECIMIENTO**

A mis padres Patricio Mesías y Mayra Narváez, por brindarme todo su apoyo y enseñarme a soñar en grande, que nada es imposible y todo se puede alcanzar con esfuerzo, dedicación y sacrificio. Mis padres son los que me han incentivado a siempre seguir adelante en mis estudios, dándome palabras de motivación, aconsejándome y sobre todo mostrándome todo su amor y comprensión en los momentos difíciles de la carrera. Gracias mamá y papá por todo el sacrificio que han hecho, para que yo pueda alcanzar uno de mis sueños más grandes que es ser Ingeniero de la Escuela Politécnica Nacional. Sin ustedes nada de esto sería posible.

A mi hermana Arianna Mesías por todos los momentos maravillosos que hemos compartido como hermanos, por estar a mi lado en los momentos difíciles, por todo tu amor y sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba. Por enseñarme a ser un mejor hermano y una mejor persona. Es increíble saber que siempre voy a poder contar contigo.

A mi abuelito Eduardo Mesías por todo el amor, cariño, paciencia, pero sobre todo por enseñarme a ser un hombre de valores y principios. A nunca bajar los brazos ante una situación complicada. Gracias por estar pendiente de mí y ayudarme cuando se necesitaba. Siempre estarás en mi memoria Papito Eduardo.

Al Ingeniero Carlos Díaz por creer en este proyecto de investigación, por el apoyo, los consejos y por toda la ayuda que nos dio cuando más se necesitó. Al Ingeniero Marcelo Salvador y al Tecnólogo Camilo Peñaloza por darnos todas las facilidades para ocupar los equipos disponibles en el Laboratorio de Operaciones Unitarias y poder realizar la parte experimental del proyecto de titulación, Al equipo de trabajo del Laboratorio de Análisis y Vibraciones especialmente al Ingeniero Patricio quien nos ayudó a ensayar todas las probetas para este estudio.

A mis amigos y amigas por todos los momentos que compartimos dentro y fuera del aula por lograr forjar una amistad, por todas las anécdotas que hemos vivido y todas las experiencias que siempre recordaré.

Jean Carlos

# ÍNDICE

<b>CERTIFICACIÓN</b> .....	i
<b>DECLARACIÓN</b> .....	ii
<b>DEDICATORIA</b> .....	iii
<b>AGRADECIMIENTO</b> .....	v
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	xi
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	xiii
<b>RESUMEN</b> .....	xvi
<b>ABSTRACT</b> .....	xvii
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	1
<b>Objetivo general</b> .....	2
<b>Objetivos específicos</b> .....	2
<b>1. MARCO TEÓRICO</b> .....	3
1.1. Material Compuesto .....	3
1.1.1. Componentes de un material compuesto.....	3
1.1.1.1. Matriz.....	4
1.1.1.1.1. Metálicas y cerámicas .....	4
1.1.1.1.2. Poliméricas.....	4
1.1.2. Refuerzo.....	5
1.1.2.1. Fibras y elementos estructurales .....	5
1.1.2.2. Partículas .....	5
1.1.3. Clasificación de los materiales compuestos.....	5
1.2. Tableros .....	6
1.2.1. Clasificación de los tableros por su fabricación.....	6
1.2.1.1. Tableros de fibras y contrachapados .....	7
1.2.1.2. Tableros de partículas .....	7
1.2.2. Clasificación de los tableros de partículas según la densidad.....	9
1.2.3. Procesamiento de tableros aglomerados.....	9



1.3.	Palma africana ( <i>Elaeis guineensis</i> Jacq.).....	10
1.3.1.	Descripción y características de la planta .....	10
1.3.2.	Partes del fruto .....	13
1.3.3.	Situación actual en el Ecuador .....	14
1.3.4.	Importancia económica en el Ecuador .....	16
1.3.5.	Cuesco de palma africana usado como materia prima .....	18
1.4.	Adhesivos .....	19
1.4.1.	Adhesivos naturales y sintéticos .....	19
1.4.2.	Polímeros y biodegradación .....	20
1.4.3.	Alcohol Polivinílico (PVA).....	21
<b>2.</b>	<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>23</b>
2.1.	Proceso de elaboración de los tableros de cuesco con adhesivo biodegradable .....	23
2.1.1.	Determinación del tipo de adhesivo a utilizar .....	28
2.1.2.	Materiales .....	32
2.1.2.1.	Cuesco de la palma africana (Palm kernel shell) .....	33
2.1.2.2.	Alcohol polivinílico (PVA).....	35
2.1.3.	Preparación de las partículas (Cuesco de palma africana) .....	36
2.1.3.1.	Secado .....	37
2.1.3.2.	Molienda.....	39
2.1.3.3.	Tamizado.....	40
2.1.3.4.	Separación de las partículas por tamaño (Granulometría).....	42
2.1.3.5.	Selección del tamaño de partículas para los tableros .....	43
2.1.4.	Relación PVA – Agua (H <sub>2</sub> O) .....	44
2.1.4.1.	Preparación del adhesivo .....	45
2.1.5.	Diseño del tablero aglomerado .....	47
2.1.5.1.	Densidad .....	47
2.1.5.2.	Dimensiones.....	47
2.1.5.2.1.	Volumen .....	48

2.1.5.2.2.	Masa .....	48
2.1.5.3.	Molde.....	49
2.1.5.4.	Determinación de las relaciones másicas partícula – adhesivo.....	51
2.1.5.5.	Determinación de las diferentes combinaciones de tableros.....	52
2.1.5.6.	Mezclado de partículas y adhesivo .....	53
2.1.6.	Elaboración de los tableros para la obtención de probetas.....	53
2.1.6.1.	Mezclado del cuesco con PVA .....	53
2.1.6.1.1.	Pesaje .....	54
2.1.6.1.2.	Mezcla .....	54
2.1.6.2.	Formación de los tableros.....	55
2.1.6.3.	Prensado de los tableros .....	55
2.1.6.4.	Desmolde de los tableros .....	58
2.2.1.	Flexión estática.....	58
2.2.1.1.	Diagrama carga vs. deflexión .....	60
2.2.1.2.	Módulo de ruptura .....	60
2.2.1.3.	Módulo de elasticidad .....	61
2.2.2.	Tracción paralela a la superficie .....	61
2.2.3.	Tracción perpendicular a la superficie (Cohesión interna).....	63
2.2.4.	Ensayo de dureza.....	65
2.2.5.	Densidad y gravedad específica (Densidad relativa) .....	67
2.2.6.	Contenido de humedad .....	70
2.2.7.	Determinación de absorción de agua e hinchamiento.....	71
<b>3.</b>	<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>72</b>
3.1.	Caracterización mecánica de los tableros de partículas .....	72
3.1.1.	Flexión estática.....	72
3.1.1.1.	Comparación de los diagramas carga vs deflexión de los diferentes tipos de tableros .....	72
3.1.1.2.	Módulo de ruptura (MOR).....	73
3.1.1.3.	Módulo de elasticidad (MOE).....	75

3.1.2.	Tracción paralela a la superficie. ....	77
3.1.3.	Tracción perpendicular a la superficie (Cohesión interna).....	80
3.1.4.	Ensayo de dureza Janka .....	83
3.2.	Caracterización física de los tableros de partículas .....	86
3.2.1.	Densidad y gravedad específica .....	86
3.2.2.	Contenido de humedad .....	89
3.3.	Comparación de las propiedades de los tableros de partículas que se obtuvieron.....	91
3.4.	Comparación con la Norma INEN 3110 .....	94
3.5.	Comparación de los resultados que se obtuvieron con otras investigaciones .....	96
<b>4.</b>	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>98</b>
4.1.	Conclusiones .....	98
4.2.	Recomendaciones .....	99
	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>101</b>
	<b>ANEXOS</b> .....	<b>106</b>
ANEXO I.	Ficha técnica y hoja de seguridad del alcohol polivinílico.....	106
ANEXO II.	Planos de taller y montaje del molde metálico para elaborar el tablero aglomerado .....	111
ANEXO III.	Datos y resultados del ensayo de flexión para obtener el MOR.....	117
ANEXO IV.	Datos y resultados del ensayo de flexión para obtener el MOE.....	123
ANEXO V.	Datos y resultados que se obtuvieron del ensayo de tracción paralela a la superficie.....	129
ANEXO VI.	Datos y resultados que se obtuvieron del ensayo de tracción perpendicular a la superficie.....	132
ANEXO VII.	Datos y resultados que se obtuvieron del ensayo de dureza Janka .....	135
ANEXO VIII.	Datos y resultados que se obtuvieron de la prueba de gravedad específica, densidad y contenido de humedad. ....	138

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de los materiales poliméricos .....	4
Tabla 1.2. Clasificación de los tableros de madera.....	7
Tabla 1.3. Clasificación de la palma aceitera .....	11
Tabla 1.4. Datos generales de la palma aceitera (E. Guineensis, var. Tenera).....	12
Tabla 1.5. Requerimientos agro climatológicos para cultivo de la palma africana .....	13
Tabla 2.1. Evaluación del peso específico de cada criterio.....	29
Tabla 2.2. Evaluación del peso específico del criterio de biodegradabilidad. ....	30
Tabla 2.3. Evaluación del peso específico del criterio resistencia. ....	30
Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio costo.....	31
Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio usabilidad.....	31
Tabla 2.6. Conclusión de criterios ponderados para alternativas de adhesivo .....	32
Tabla 2.7. Contenido lignocelulósico (componentes) y poder calorífico de cuesco .....	33
Tabla 2.8. Análisis físico químico del cuesco .....	34
Tabla 2.9. Propiedades del cuesco adquirido según la empresa ALCOPALMA .....	34
Tabla 2.10. Tabla de conversión de número de tamiz a milímetros.....	43
Tabla 2.11. Tamaños de partículas seleccionadas para la elaboración de los tableros....	44
Tabla 2.12. Tipo de partícula según el número de tamiz.....	44
Tabla 2.13. Dimensiones iniciales de los tableros aglomerados en crudo.....	47
Tabla 2.14. Dimensiones finales de los tableros después del proceso de termocompresión .....	48
Tabla 2.15. Relación másica de partícula-aglomerante.....	51
Tabla 2.16. Combinación de variables para la elaboración de tableros.....	52
Tabla 2.17. Cantidad de masa de partículas y adhesivo para relación partícula-aglomerante 75:25 .....	53
Tabla 2.18. Cantidad de masa de partículas y adhesivo para relación partícula-aglomerante 70:30 .....	53
Tabla 2.19. Ciclo de prensado .....	56

Tabla 3.1. Resumen de los resultados que se obtuvieron del módulo de ruptura de los tableros.....	73
Tabla 3.2. Valores promedio del módulo de ruptura de cada tipo de tablero.....	74
Tabla 3.3. Resumen de los resultados que se obtuvieron del módulo de elasticidad de los tableros.....	76
Tabla 3.4. Valores promedio del módulo de elasticidad de cada tipo de tablero. ....	76
Tabla 3.5. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de tracción paralela a la superficie .....	78
Tabla 3.6. Valores promedio de tracción paralela de cada tipo de tablero .....	78
Tabla 3.7. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de tracción perpendicular a la superficie .....	80
Tabla 3.8. Valores promedio de tracción perpendicular de cada tipo de tablero.....	81
Tabla 3.9. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de dureza Janka.....	83
Tabla 3.10. Valores promedio de la carga máxima promedio de cada tipo de tablero.....	84
Tabla 3.11. Escala de valores para dureza Janka.....	85
Tabla 3.12. Resumen de los resultados que se obtuvieron de densidad de los tableros..	86
Tabla 3.13. Valores promedio de densidad de cada tipo de tablero.....	87
Tabla 3.14. Resumen de los resultados que se obtuvieron de contenido de humedad de los tableros.....	89
Tabla 3.15. Valores promedio del contenido de humedad de cada tipo de tablero.....	90
Tabla 3.16. Resumen de las propiedades obtenidas de los tableros elaborados .....	92
Tabla 3.17. Propiedades mecánicas de los tableros tipo (P1) y tipo (P2).....	95
Tabla 3.18. Propiedades mecánicas del tablero T2 B.....	95
Tabla 3.19. Comparación de las propiedades físicas y mecánicas del tablero T2 B con otras investigaciones.....	97

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Tipos de matrices y refuerzo .....	6
Figura 1.2. Tablero de partículas de madera de una capa y de tres capas .....	8
Figura 1.3. Esquema de producción de los tableros aglomerados .....	10
Figura 1.4. Planta de palma africana aceitera .....	11
Figura 1.5. Racimo de palma africana.....	13
Figura 1.6. Partes del fruto de la palma africana .....	14
Figura 1.7. Superficie sembrada de palma africana en el Ecuador .....	15
Figura 1.8. Total de fincas y extensión en hectáreas según provincia.....	16
Figura 1.9. Productos derivados de la palma africana.....	17
Figura 1.10. Productos derivados del fruto de la palma africana .....	17
Figura 1.11. Cuesco de la palma africana.....	18
Figura 1.12. Reacción de síntesis del alcohol polivinílico .....	22
Figura 2.1. Diagrama de flujo para la obtención de tableros de cuesco con adhesivo biodegradable.....	24
Figura 2.2. Cuesco de palma africana adquirido .....	33
Figura 2.3. Saco de PVA (Alcohol Polivinílico) de 25 kg. ....	35
Figura 2.4. Presentación en polvo de del PVA (Alcohol Polivinílico) .....	36
Figura 2.5. Termo balanza .....	37
Figura 2.6. Secador de banda.....	38
Figura 2.7. Estufa memmert UNB 500 .....	38
Figura 2.8. Estufa POL-EKO_APARATURA SP.J.....	39
Figura 2.9. Molino de martillos .....	40
Figura 2.10. Molino de cuchillas .....	40
Figura 2.11. Agitador de tamices mecánico .....	41
Figura 2.12. Tamizado con zaranda.....	41
Figura 2.13. Juego de tamices para la separación final de partículas por tamaño .....	42
Figura 2.14. Materiales para elaboración del adhesivo .....	46
Figura 2.15. Mezcla de agua y PVA para obtener el adhesivo .....	46

Figura 2.16. Diseño del molde metálico en Solidworks .....	49
Figura 2.17. Corte oxiacetilénico de las planchas de acero.....	50
Figura 2.18. Fresado del acero para obtener las dimensiones requeridas .....	50
Figura 2.19. Molde metálico para la elaboración de tableros .....	50
Figura 2.20. Pesaje de materia prima .....	54
Figura 2.21. Mezclado de partículas de cuesco y aglomerante.....	54
Figura 2.22. Formación de tableros .....	55
Figura 2.23. Diagrama del ciclo de presando .....	57
Figura 2.24. Prensado de los tableros .....	57
Figura 2.25. Tablero aglomerado.....	58
Figura 2.26. Ensayo de flexión estática .....	59
Figura 2.27. Probetas para el ensayo de flexión estática .....	60
Figura 2.28. Detalle de la probeta para la tracción paralela a superficie .....	62
Figura 2.29. Ensayo de tracción paralela a la superficie .....	62
Figura 2.30. Probetas para el ensayo de tracción paralela a la superficie.....	63
Figura 2.31. Mordazas acopladas a la máquina de ensayos universales.....	64
Figura 2.32. Ensayo de tracción perpendicular a la superficie .....	64
Figura 2.33. Probetas para el ensayo de tracción perpendicular a la superficie.....	65
Figura 2.34. Ensayo de dureza Janka.....	66
Figura 2.35. Grupo de probetas para el ensayo de dureza .....	67
Figura 2.36. Horno de convección POL-EKO APARATURA .....	68
Figura 2.37. Balanza marca ADAM PW 124 .....	68
Figura 2.38. Probetas para el ensayo de contenido de humedad y densidad .....	69
Figura 2.39. Ensayo de absorción de agua e hinchamiento.....	71
Figura 3.1. Curva carga vs. deflexión.....	72
Figura 3.2. Efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados.....	75
Figura 3.3. Efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el módulo de elasticidad de los tableros aglomerados. ....	77

Figura 3.4. Efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la propiedad de la resistencia a la tracción paralela en tableros .....	79
Figura 3.5. Tipos de fallo en el ensayo de tracción perpendicular .....	80
Figura 3.6. Probeta ensayada con un fallo cohesivo deseable.....	80
Figura 3.7. Efecto del tamaño de partícula y el adhesivo en tracción perpendicular de los tableros .....	82
Figura 3.8. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la dureza de los tableros aglomerados.....	85
Figura 3.9. Barras de error porcentual de la densidad máxima y densidad mínima de los tableros elaborados con respecto a la densidad máxima que deben tener los tableros de densidad media. ....	88
Figura 3.10. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la densidad de los tableros aglomerados .....	88
Figura 3.11. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el contenido de humedad de los tableros aglomerados .....	91



## RESUMEN

En la actualidad se utilizan materiales poco convencionales de origen vegetal para la fabricación de tableros sean estos de fibras o de partículas; con el objetivo de reducir desechos agroindustriales y fomentar la creación de nuevos materiales. El presente trabajo tuvo como finalidad elaborar y caracterizar tableros de partículas a partir del cuesco de la palma africana con adhesivo biodegradable. El alcohol polivinílico, que es de origen sintético y biodegradable, se determinó como agente aglomerante por medio del método de criterios ponderados y a través de pruebas preliminares se definieron las diferentes combinaciones de tamaños de partículas y contenido de aglomerante para la fabricación de tableros. De esta manera se escogieron tres combinaciones de partículas y dos concentraciones másicas de adhesivo (25% y 30%), obteniendo un total de seis tipos de tableros. Para la obtención de los tableros se utilizó el proceso de termocompresión, con un ciclo de prensado fijo. Para caracterizar mecánica y físicamente los diferentes tipos de tableros se realizaron los siguientes ensayos: flexión, tracción paralela, tracción perpendicular (cohesión interna), dureza, densidad, gravedad específica y contenido de humedad; estos ensayos se realizaron bajo la norma ASTM D1037-12. Se determinó por medio de los resultados que el tamaño de partícula y la concentración másica de adhesivo inciden en las propiedades mecánicas y físicas del material compuesto. El tablero que presentó las mejores propiedades de este estudio fue elaborado con partículas medianas (tamiz #16) y una relación másica de 30% de adhesivo. Los valores del módulo de ruptura y tracción perpendicular obtenidos fueron 6,70 MPa y 1,35 MPa respectivamente, este último valor superó hasta tres veces el valor de cohesión interna de los tableros comerciales.

**Palabras clave:** adhesivo biodegradable, cuesco de palma, alcohol polivinílico, cohesión interna, ciclo de prensado, tablero de partículas, termocompresión.

## ABSTRACT

Currently non conventional materials of vegetal origin are used for the manufacture of fiber boards or particleboards; in order to reduce agroindustrial waste and encourage the creation of new materials. The purpose of this work was to elaborate and characterize particleboards composed from palm kernel shell with biodegradable adhesive. Polyvinyl alcohol, which is biodegradable and synthetic origin, was determined as a binder agent by the weighted criteria method, besides through preliminary tests, different combination of particle sizes and binder content were determined for the manufacture of boards. In this way three combinations of particles and two mass concentrations of adhesive (25% and 30%) were chosen, resulting in a total of six types of boards. The thermocompression process was used for obtaining the boards, with a fixed pressing cycle. In order to characterize mechanical and physically the different types of boards, the following tests were performed: static bending, tension parallel to surface, tension perpendicular to surface (internal bond), hardness, density, specific gravity and moisture content; these tests were based in the ASTM D1037-12 standard. It was determined that the particle size and mass concentration of adhesive affects physical and mechanical properties of the composite material. The board with the best properties in this study was elaborate of medium particle sizes (mesh #16) and a mass concentration adhesive of 30%. The values of the modulus of fracture and perpendicular tension obtained were 6,70 MPa and 1,35 MPa respectively, the latter value exceeds up to three times the internal bond value of commercial boards.

**Keywords:** biodegradable adhesive, palm kernel shell, particle board, polyvinyl alcohol, pressing cycle, thermocompression.

# **ELABORACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE TABLEROS DE PARTÍCULAS A PARTIR DEL CUESCO DE PALMA AFRICANA CON ADHESIVO BIODEGRADABLE**

## **INTRODUCCIÓN**

En el proceso de extracción de aceite de palma africana, en su fase final se genera un residuo agroindustrial en gran volumen conocido como cuesco. En dichas fábricas este residuo se utiliza como combustible para producir vapor como fuente de energía, ocasionando un problema de polución por las emisiones de gases contaminantes hacia el medio ambiente [1]. Por esta razón se buscó gestionar este residuo dándole un uso potencial como componente estructural para tableros de partículas, aprovechando de esta manera dicha biomasa lignocelulósica residual. Debido a las excelentes propiedades del cuesco (dureza, buena resistencia y bajo peso), pudo ser utilizado como material de refuerzo para materiales compuestos.

En la fabricación de tableros convencionales de madera, ya sea de fibras, partículas o contrachapados, en la cual se usa generalmente la urea-formaldehído como adhesivo por su tiempo de curado, color claro y bajo costo. Sin embargo, una desventaja importante de este adhesivo es su emisión de formaldehído que genera serios problemas en la salud del ser humano al ser una sustancia cancerígena según la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer dependiente de la OMS [2]. Las emisiones de los tableros pueden reducirse hasta la mitad en los primeros nueve meses, tras los cuales el proceso se ralentiza. Debido a la situación explicada anteriormente, los fabricantes de tableros aglomerados buscan el desarrollo de adhesivos que no tengan una base de formaldehído, es así que se planteó la utilización de adhesivos naturales o sintéticos que sean biodegradables en la aglomeración de tableros. De esta manera se busca fomentar el desarrollo de nuevos materiales, que sean amigables con el medio ambiente y puedan en un futuro reemplazar a los tableros de madera convencionales.

## **Objetivo general**

Elaborar y caracterizar tableros de partículas a partir del cuesco de palma africana con adhesivo biodegradable.

## **Objetivos específicos**

- Seleccionar el tamaño idóneo de partícula de cuesco como componente estructural del tablero.
- Determinar el tipo de matriz biodegradable adecuada que mejor se adapte al refuerzo (cuesco de la palma).
- Determinar una relación másica óptima entre el cuesco y aglomerante.
- Realizar los ensayos pertinentes en base a la norma ASTM D1037-12 para determinar las características físicas y mecánicas de las probetas obtenidas con las diferentes variaciones de relación másica de cuesco-aglomerante y del tamaño de partícula del cuesco.

# **1. MARCO TEÓRICO**

## **1.1. Material Compuesto**

Un material compuesto se obtiene al combinar dos o más materiales, formando un sistema con mejores propiedades e inclusive propiedades únicas en comparación a las de sus componentes individuales. El nuevo material se encuentra conformado por dos fases principales: matriz y refuerzo, entre las que es importante que exista una fuerte adhesión. La superficie existente entre la matriz y el refuerzo es conocida como interfaz, además el material compuesto puede estar constituido por otros componentes como recubrimientos y rellenos.

Para ser considerado un material compuesto al menos uno de sus componentes (fases) debe ser sólido. En este tipo de materiales la fase denominada refuerzo es sólida y dependiendo del refuerzo se clasifican en: materiales reforzados con partículas, reforzados con fibras y compuestos estructurales. También se clasifican a este tipo de materiales compuestos según el tipo de matriz: metálica, cerámica, polimérica. Las propiedades de este nuevo material se alcanzan mediante la cooperación entre las fases individuales, denominadas efectos sinérgicos.

### **1.1.1. Componentes de un material compuesto**

Un material compuesto se compone principalmente de dos fases, la fase continua conocida como matriz y la fase discontinua o refuerzo. La fase continua es la encargada de soportar y transmitir la carga a los elementos de refuerzo, además de proteger a la fase discontinua de las influencias externas. Generalmente la matriz, en comparación con el refuerzo, tiene una menor resistencia y mayor plasticidad. Existen tres tipos de matrices: metálica, cerámica y polimérica.

Las características principales de los materiales compuestos son las siguientes:

- Los componentes son separables mecánicamente y son distinguibles físicamente.
- Presentan fases distintas químicamente, separadas por una interfase, y entre sí completamente insolubles.

### 1.1.1.1. Matriz

#### 1.1.1.1.1. Metálicas y cerámicas

Las matrices metálicas utilizadas son metales de baja densidad como el aluminio, titanio o magnesio y se caracterizan por presentar una resistencia mecánica relativamente alta, resistencia a elevadas temperaturas, excelente dureza, conductividad térmica y eléctrica. Por otro lado, las matrices cerámicas presentan elevados puntos de fusión y baja densidad, además se caracterizan por tener una elevada resistencia en compresión, alta dureza, rigidez, resistencia a la corrosión en la mayoría de los ambientes y una elevada fragilidad.

#### 1.1.1.1.2. Poliméricas

Las matrices poliméricas debido a sus excelentes propiedades, fácil procesamiento y costos relativamente bajos tienen una gran demanda [3]. Estas matrices se clasifican en: termoplásticas, termoestables y elastómericas. Las matrices termoplásticas debido a que sus moléculas se encuentran unidas por fuerzas débiles, tienen la propiedad de ablandarse y ser moldeadas bajo la acción del calor, endureciéndose al enfriar, siendo un ciclo reversible que lo hace apto para el reciclaje. El polipropileno, polietileno y la poliamida son ejemplos de matrices termoplásticas. En la Tabla 1.1 se observa la clasificación de los materiales poliméricos en función de su origen, respuesta térmica, formación o estructura.

Tabla 1.1. Clasificación de los materiales poliméricos.

<b>Base de clasificación</b>	<b>Tipo</b>
Origen	Natural, sintético, semisintético
Respuesta térmica	Termoestables, termoplásticos
Formación	Adición, condensación
Estructura	Lineales, ramificados, entrecruzados

(Fuente: [4])

## **1.1.2. Refuerzo**

El refuerzo, también conocido como fase discontinua, soporta la carga, permite absorber las tensiones, incrementa la rigidez y la resistencia del material al mejorar las características de la matriz. También aporta propiedades al material compuesto como son: resistencia a la abrasión, estabilidad térmica, propiedades estructurales. Los refuerzos pueden ser fibras, partículas o elementos estructurales.

### **1.1.2.1. Fibras y elementos estructurales**

Las fibras (determina las propiedades mecánicas del compuesto) son envueltas y ligadas por una matriz blanda y dúctil (determina las propiedades físicas y químicas del compuesto) que trasmite la carga a éstas soportando la mayor parte de la fuerza aplicada, lo que caracteriza a estos compuestos por sus altas prestaciones mecánicas y una buena relación resistencia-peso. Los compuestos de elementos estructurales más comunes son los laminares y los paneles sándwich, las propiedades de éstos están dadas por el diseño y la geometría de los elementos.

### **1.1.2.2. Partículas**

Los compuestos pueden ser reforzados con partículas de tamaño grande. En estos compuestos la matriz transfiere parte de la carga a las partículas y es importante señalar que la adhesión matriz-partícula es la que proporciona un buen comportamiento mecánico. También puede ser reforzado con partículas consolidadas por dispersión que son de diámetros pequeños de (10 a 100) nm, en estos las interacciones matriz-partícula ocurren a nivel atómico o molecular a diferencia de los refuerzos de partícula grande que no pueden ser tratados al mismo nivel; aquí la matriz soporta la mayor parte de la carga aplicada.

## **1.1.3. Clasificación de los materiales compuestos**

Los materiales compuestos se pueden clasificar de diferentes maneras: según la forma de los constituyentes y según la naturaleza de los constituyentes; pero una de las clasificaciones más utilizadas es la que se basa en el tipo de matriz y el tipo de refuerzo utilizado. La clasificación de los materiales compuestos se puede observar en la Figura 1.1 (Callister, 2007).

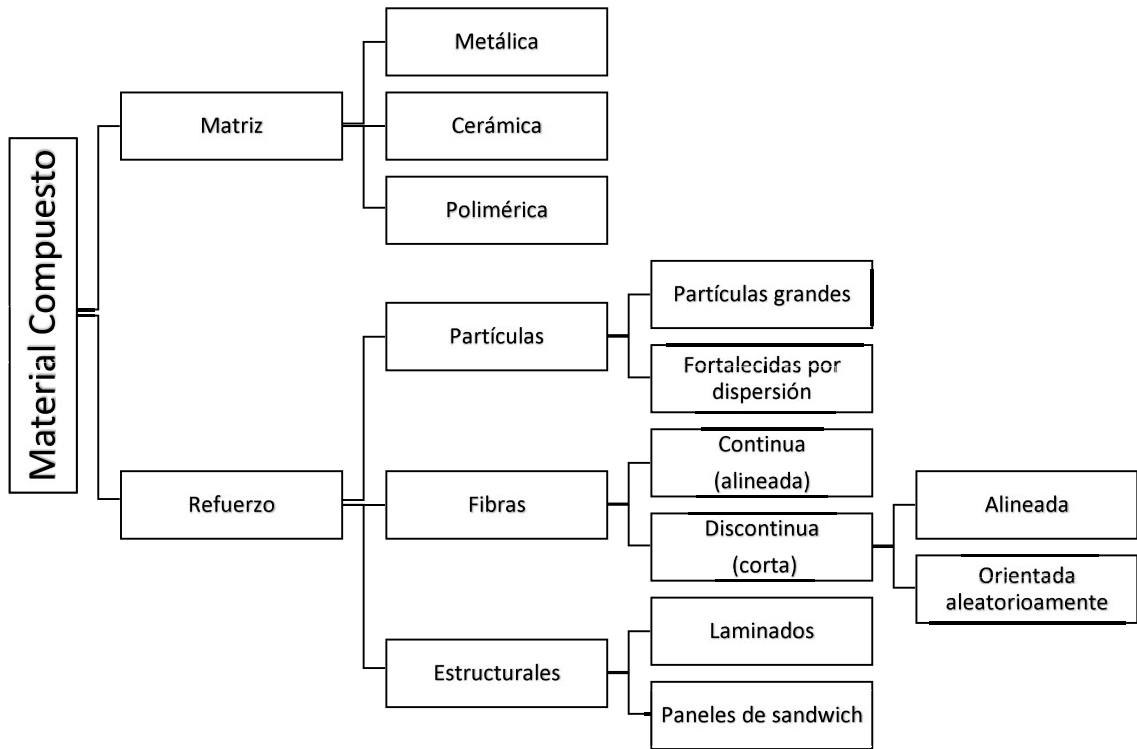


Figura 1.1. Tipos de matrices y refuerzo.

(Fuente: [5])

## 1.2. Tableros

### 1.2.1. Clasificación de los tableros por su fabricación

Los tableros derivados de la madera tienen una amplia variedad de productos que se ofertan en el mercado. Estos tableros pueden usarse en mobiliario de interior, manualidades, aislamientos, revestimientos, tarimas y construcción. Anteriormente los tableros de madera se clasificaban en tableros de fibras o tableros de partículas. Debido a la gran demanda y diversas aplicaciones, los tableros de madera en la actualidad pueden clasificarse de acuerdo a su fabricación como se observa en la Tabla 1.2. En el proceso de fabricación se ven involucrados diversos factores como son el modo de preparación de la materia prima, la orientación, tamaño del material, aglutinantes y métodos de prensado. Gracias al avance tecnológico, en la actualidad se pueden producir tableros de madera más estables, homogéneos y con mejores propiedades.



Tabla 1.2. Clasificación de los tableros de madera.

<b>Familia</b>	<b>Productos</b>	<b>Nombre en inglés</b>	<b>Siglas</b>
Tableros en base a madera (Wood based panels)	Contrachapados	Plywood	
	Tableros de fibras	Fiberboard	FB
	Tableros de fibras de densidad media	Medium Density fiberboard	MDF
	Tableros de fibras de alta densidad	High Density fiberboard	HDF
	Tableros de fibra duro	Hard fiberboard	HF
	Tableros de partículas	Particleboard	PB
	Tableros de virutas orientadas	Oriented strandboard	OSB

(Fuente: [6])

### **1.2.1.1. Tableros de fibras y contrachapados**

Los tableros de fibras están formados por haces de fibras de madera u otro material lignocelulósico unidos por sus inherentes propiedades adhesivas y la orientación de las fibras en donde se puede añadir agentes encolantes y ser prensados o no [7]. Para la fabricación de tableros de fibras existen dos fases importantes que son el desfibrado de la madera donde se hace pasar las astillas por desfibradoras mecánicas o termomecánicas para la obtención de fibras y el afieltrado que se encarga de la interconexión de las fibras entre sí otorgando propiedades resistentes a los tableros. Los tableros contrachapados se constituyen de láminas o chapas de madera en un número impar, con las fibras orientadas perpendicularmente entre capas adyacentes una sobre la otra unidos por una resina sintética mediante presión y calor con el fin de equilibrar su estructura y proporcionar estabilidad dimensional al tablero.

### **1.2.1.2. Tableros de partículas**

También conocidos como tableros aglomerados, es un producto elaborado en forma de tablas con dimensiones variables y conformados por partículas de madera (hojuelas, astillas y viruta) y resinas sintéticas; esta mezcla se coloca en moldes a temperaturas altas para ser prensados y aumentar su densidad [8].

Un tablero aglomerado de partículas lignocelulósicas es un material del tipo composite que generalmente está conformado por una resina (matriz), aglutinada con ripio de madera (refuerzo) [10]. Para la fabricación del tablero de partículas se utiliza partículas finas de madera. El tablero de densidad media se forma a partir del desfibrado de las astillas. Existen dos métodos para el desfibrado: mecánico y termomecánico. Lo que se aprovecha para la fabricación de tableros aglomerados son los desperdicios y materiales lignocelulósicos del proceso primario de la madera, así como otros residuos agrícolas como la cáscara de yuca, la cáscara del coco, raquis del banano, raquis de palma de aceite, cuesco de palma de aceite, etc.

Están formados por:

- Partículas de diferentes formas y tamaños y pueden tener 1, 3 o hasta 5 capas dispuestas, colocando las capas de partículas finas en las caras y las gruesas en el centro, como se observa en la Figura 1.2.
- Los adhesivos, convencionalmente usados son resinas sintéticas termoendurecibles a base de formaldehído como urea-formaldehído (UF), fenol-formaldehído (PF) y melamina-formaldehído (MF).
- Aditivos en diferentes proporciones dependiendo de las propiedades que se desee alcanzar en el tablero.
- Recubrimientos.



**Tablero de una capa**

**Tableros de tres capas**

Figura 1.2. Tablero de partículas de madera de una capa y de tres capas.

(Fuente: [2])

### **1.2.2. Clasificación de los tableros de partículas según la densidad**

- Baja densidad: también conocidos como tableros aislantes, debido a que se emplean como amortiguadores del ruido y calor, pueden tener valores de densidad entre (200 a 400) kg/m<sup>3</sup>. Los tableros de baja densidad son los que tienen una menor resistencia mecánica pues la unión entre las partículas es débil y su terminación superficial no es totalmente lisa.
- Densidad media: tienen valores de densidad entre (400 a 800) kg/m<sup>3</sup>, son comúnmente conocidos como aglomerados, son los de mayor aplicación y están destinados a reemplazar en gran medida la producción de placas de madera maciza para mobiliario, puertas, paredes, etc; estos tableros permiten hacer trabajos como: cortar, calar, taladrar, atornillar, lijar, etc.
- Tableros duros: sus densidades están en el rango de (800 a 1150) kg/m<sup>3</sup> y pueden llegar hasta 1400 kg/m<sup>3</sup> para usos especiales. Se elaboran con partículas pequeñas, aserrín, y pueden usarse como pisos en forma de baldosas [8].

### **1.2.3. Procesamiento de tableros aglomerados**

Los tableros de partículas (tableros aglomerados), se fabrican aplicando simultáneamente presión y calor sobre las partículas de madera u otros materiales lignocelulósicos en forma de partículas previamente rociadas con una resina para provocar la aglomeración y pegado de las partículas entre sí.

En el proceso de fabricación de tableros aglomerados se utilizan temperaturas altas en la etapa de prensado, para acelerar el endurecimiento o curado de los adhesivos. Los resultados que se esperan es obtener un producto que tiene como materia prima pequeñas partículas unidas con un adhesivo, alcanzando propiedades físicas semejantes o superiores que las piezas de madera maciza [8].

El proceso para la fabricación de tableros de partículas consta de las siguientes etapas: astillado o desmenuzamiento, almacenamiento de las astillas, refinado de las partículas, secado de las partículas, clasificación de las partículas, mezcla con adhesivos y aditivos, moldeo, prensado, lijado y corte a medida [11]. El proceso de fabricación de tableros se puede ver en el esquema del proceso de la Figura 1.3.

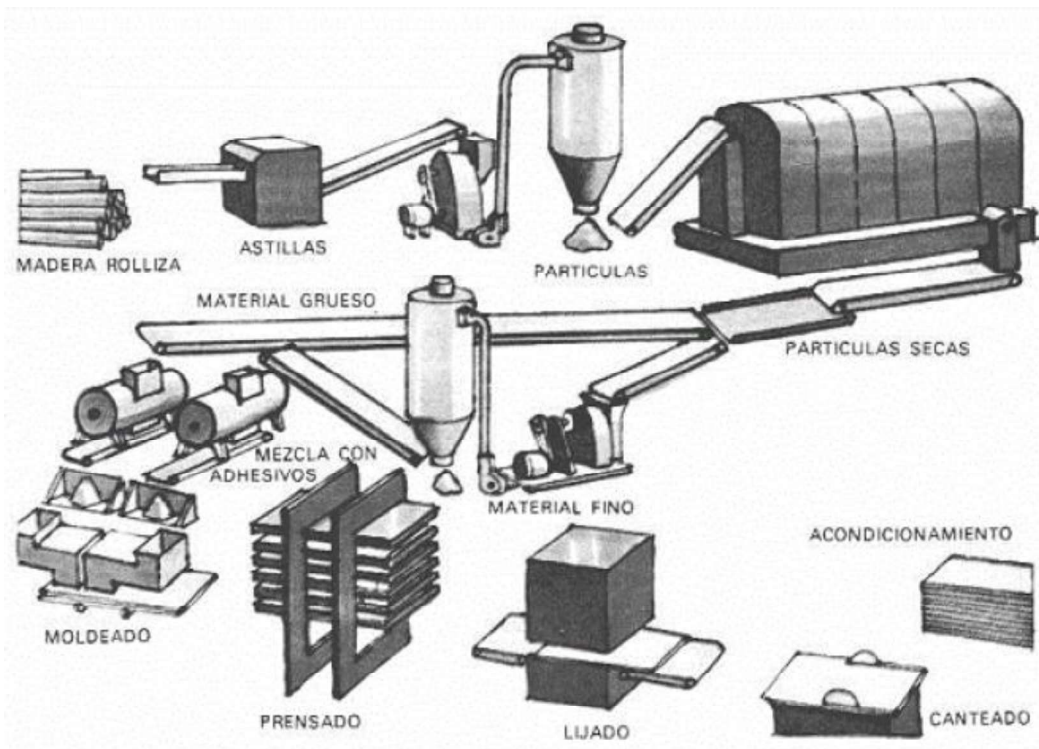


Figura 1.3. Esquema de producción de los tableros aglomerados.

(Fuente: [8])

### 1.3. Palma africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)

La palma africana tiene su origen en el golfo de Guinea, en honor a la región de donde proviene la palma de aceite botánicamente se conoce con el nombre de *Elaeis guineensis* Jacq. La palma aceitera africana es una planta tropical que se empezó a cultivar hace 5000 años en climas cálidos en la región occidental y central del continente africano. En el siglo XV se extendió a otras regiones de África y posteriormente en el siglo XVI se introdujo en América por los colonizadores y comerciantes de esclavos portugueses. En esta misma época empezó su expansión en Asia Oriental.

#### 1.3.1. Descripción y características de la planta

En el año de 1763 el botánico holandés Nikolaus Joseph von Jacquin, le puso el nombre de *Elaeis guineensis* a la palma africana aceitera. En la Tabla 1.3 se observa la clasificación de la palma aceitera según el científico Hutchinson y en la Figura 1.4 se muestra una plantación de palma africana aceitera.

Tabla 1.3. Clasificación de la palma aceitera.

División	Fanerógamas
Tipo	Angiosperma
Clave	Monocotiledóneas
Orden	Palmales
Familia	Palmaceae
Tribu	Cocoina
Género	Elaeis
Especie	Guineensis y oleífera

(Fuente: [12])



Figura 1.4. Plantación de palma africana aceitera.

(Fuente: [13])

La palma aceitera es una especie monoica, que produce tanto inflorescencias masculinas como femeninas por separado para evitar la autofecundación, una inflorescencia femenina se convierte en un racimo con frutos maduros, de color rojo amarillentos, después de cinco meses a partir de la apertura de las flores. El número de racimos y de hojas producidas por palma por año es variable, depende de la edad y los factores genéticos. En estado natural puede alcanzar más de 40 m de altura y vivir más de 100 años, pero en cultivos industriales su altura varía entre (10 a 15) m, con un diámetro de (30 a 60) cm y tiempo de vida de hasta 25 años.

La especie de la palma tiene 3 variedades: dura, pisífera y tenera. Comercialmente para la extracción del aceite se utiliza la variedad tenera, que proviene de un cruce entre las otras dos variedades. La semilla híbrida producto del cruce de estas dos especies ha mejorado sustancialmente el mercado de la producción de aceite de palma ya que produce una mayor cantidad del mismo. Según el INIAP (Instituto Nacional de investigaciones Agropecuarias del Ecuador), el incremento de producción de aceite esta entre el 23% al 25% en relación a las variedades pisífera y dura. En la Tabla 1.4 se muestran los datos generales de la palma aceitera (E. Guineensis, var. Tenera).

Tabla 1.4. Datos generales de la palma aceitera (E. Guineensis, var. Tenera).

Producción de hojas	24,00 a 30,00 / palma
Producción de racimos	12,00 / año/ palma
Peso del racimo	(20,00 a 30,00) kg
Peso del fruto	10,00 g
Semilla(nuez) fruto	(5,00 a 8,00) % ( 1,00 a 1,60 ton / ha)
Aceite de almendra	0,50 ton/ ha
Torta de almendra	0,45 ton/ ha
Producción de cascara ( de semilla)	5,00%
Pericarpio/ fruto	(85,00 a 92,00)%
Aceite( racimo)	(20,00 a 25,00) %
Producción de aceite	(5,00 a 8,00) ton/ ha/ año
Producción de fibras / racimo	13,00%
Producción de raquis ( estopas) / racimo	22,00%

(Fuente: [12])

Cabe destacar que Ecuador por su localización geográfica, al ser atravesado por la línea ecuatorial, presenta condiciones agroclimatológicas óptimas para el desarrollo de cultivos de palma africana en las diferentes regiones del país, sobre todo en la parte norte de la costa y amazonía. Debido a los requerimientos agroclimatológicos que se muestran en la Tabla 1.5 los mayores productores de aceite de palma africana de Sudamérica son Ecuador y Colombia.

Tabla 1.5. Requerimientos agroclimatológicos para cultivo de la palma africana.

<b>Requerimiento</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>
Latitud	15,00° norte	15,00° sur
Horas luz / año	2000,00	1500,00
Langleys /día	400,00	300,00
pH del suelo	4,50	7,80
m.s.n.m	700,00	3,00
mm de agua por año	2000,00	1750,00
Temperatura [°C]	27,00	23,00

(Fuente: [15])

### 1.3.2. Partes del fruto

El racimo de la palma africana está dispuesto en brácteas puntiagudas y lo conforman en peso y volumen en un 65% el fruto y el 35% los racimos vacíos, conocidos como raquis. Una planta produce en promedio de 12 a 13 racimos por año con un peso de (20 a 30) kg y son de color rojizo amarillento como se ve en la Figura 1.5. El fruto de la palma es un ovoide que varía en longitud de (3 a 6) cm y diámetro de hasta 4 cm con un peso aproximado de (5 a 12) g.



Figura 1.5. Racimo de palma africana.

(Fuente: [16])

El fruto está formado de afuera hacia adentro por: exocarpio o epicarpio (capa externa que tiene la piel lisa y brillante cumple con la función de recubrir y proteger la pulpa), mesocarpio (pulpa o tejido fibroso que contiene las células de aceite), endocarpio o cuesco (capa leñosa que cubre a la almendra, endospermo o almendra que es una única semilla de donde proviene el aceite de palmiste) [17]. Las partes o capas que conforman el fruto de palma africana se pueden ver en la Figura 1.6.



Figura 1.6. Partes del fruto de la palma africana.

(Fuente: [18])

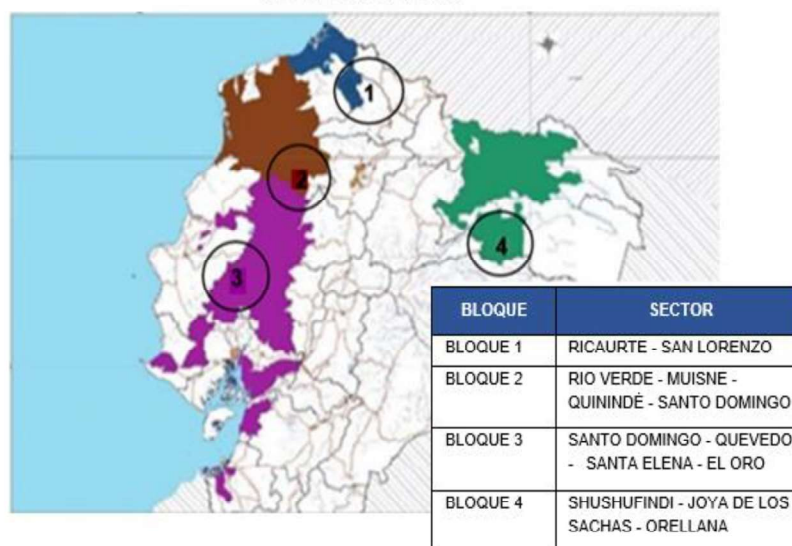
### 1.3.3. Situación actual en el Ecuador

La palma africana fue introducida en el Ecuador en 1953, los primeros cultivos de palma aceitera fueron en las provincias de Santo Domingo de los Tsáchilas y Esmeraldas, con el objetivo de observar si esta nueva planta era capaz de adaptarse a las condiciones de suelo y climáticas que presenta el Ecuador. Para el año de 1967 el territorio nacional tenía sembradas alrededor de 1020 hectáreas de palma africana.

El último censo nacional palmero realizado en el año 2017 muestra que la superficie sembrada de palma africana en el territorio nacional es de 257 120,93 hectáreas, además existen 6 568 productores que se dedican al cultivo de esta planta [19]. Las plantaciones de palma aceitera se encuentran en la sierra, costa y oriente del Ecuador, como se muestra en la Figura 1.7 que ilustra las superficies sembradas en las diferentes regiones del país dividida por bloques.



**CENSO NACIONAL PALMERO 2017**  
BLOQUES DE INTERVENCIÓN



BLOQUE	SECTOR	SUPERFICIE [ha]	PLANTACIONES
BLOQUE 1	RICAUARTE - SAN LORENZO	29387,71	175
BLOQUE 2	RIO VERDE - MUISNE - QUININDÉ - SANTO DOMINGO	125895,58	4559
BLOQUE 3	SANTO DOMINGO - QUEVEDO - SANTA ELENA - EL ORO	68035,65	2143
BLOQUE 4	SHUSHUFINDI - JOYA DE LOS SACHAS - ORELLANA	33801,99	1272
<b>TOTAL</b>		<b>257120,93</b>	<b>8149</b>

Figura 1.7. Superficie sembrada de palma africana en el Ecuador.

(Fuente: [20])

En la región costera existe la mayor superficie sembrada de plantaciones de palma africana distribuidas entre las provincias de Esmeraldas, Manabí, Guayas, Santa Elena, El Oro, Los Ríos y Santo Domingo de los Tsáchilas. En la sierra se ubican principalmente en Bolívar, Imbabura, Pichincha y Cotopaxi. En la región oriental se encuentran ubicadas en las provincias de Orellana y Sucumbíos.

El Ecuador tiene los recursos necesarios para producir palma africana y la capacidad industrial para procesarlo en aceite, existen 42 plantas extractoras de aceite, que se ubican en su mayoría en las provincias de Esmeraldas y Santo Domingo de los Tsáchilas. Las extractoras más importantes dentro del territorio nacional son: Palmeras de los Andes, Palmeras del Ecuador, Palmeras de Quinindé con una capacidad de producción aproximada de 60 toneladas fruto/hora [21]. En la Figura 1.8 se puede ver el total de plantaciones y su extensión en hectáreas en cada provincia.



Figura 1.8. Total de plantaciones y extensión en hectáreas según provincia.

(Fuente: [20])

### 1.3.4. Importancia económica en el Ecuador

Principalmente esta planta es conocida como palma aceitera porque de los frutos de la palma se extraen dos tipos de aceite: el primero de ellos es el más importante desde el aspecto de producción, se denomina de pulpa, rojo o de pericarpio. Hecha esta extracción queda un corozo, que al romperlo permite recuperar la almendra. El segundo tipo de aceite se extrae de la almendra, denominada aceite de palmiste, quedando finalmente una torta de almendra de gran valor para la fabricación de concentrados y alimentación animal [22].

La importancia y potencial económico para el Ecuador radica en la gran diversidad de productos que se pueden obtener con las diferentes partes de la palma africana, como se puede observar en las Figuras 1.9 y 1.10. En el Ecuador, la producción de aceite de palma constituye el 4% del PIB agrícola, siendo una de las industrias no petroleras más dinámicas, es el séptimo producto agrícola que más se exporta mostrando un crecimiento del 8% anual durante los últimos 6 años. De la producción actual de aceite de palma el 42% es para consumo interno y el 58% restante es exportado como aceite crudo de palma, productos semi-elaborados y elaborados [23].



Figura 1.9. Productos derivados de la palma africana.

(Fuente: [24])

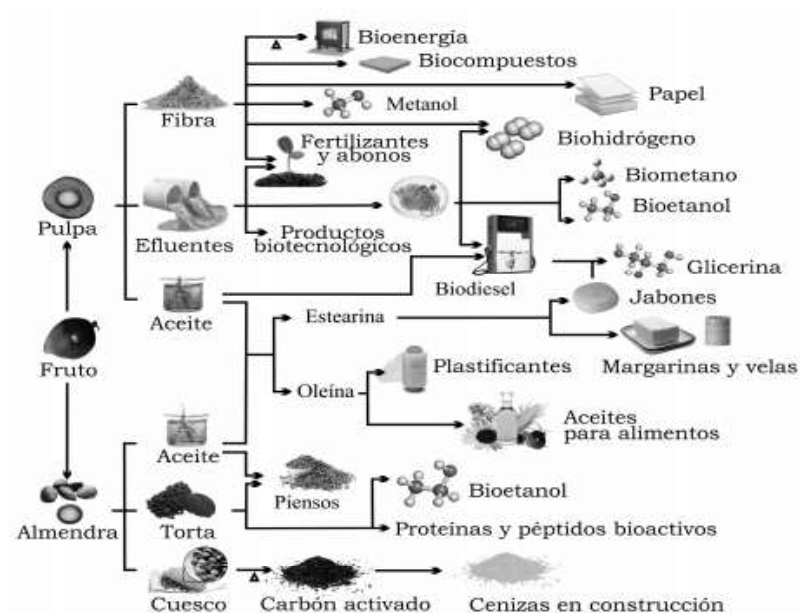


Figura 1.10. Productos derivados del fruto de la palma africana.

(Fuente: [24])

La industria de la palma contribuye de forma positiva al desarrollo del país, generando 271 millones de dólares americanos en divisas de exportación. El Ecuador a nivel mundial es uno de los mayores exportadores de aceite de palma ocupando el séptimo puesto. Los principales destinos donde se exporta la producción de aceite de palma son Colombia, Venezuela, Unión Europea, México [19]. El desarrollo del sector de la palma se evidencia en el transcurso de los últimos años. Para el 2016 se exportó un total de 349,569 Ton; una cifra récord de exportación de aceite de palma y de productos derivados. En comparación con el año 2006 hubo un incremento del 136% en el ámbito de exportación de los productos de la palma africana.

Los resultados que se obtuvieron en este periodo de 10 años demuestran la importancia que tiene el sector de la palma en el crecimiento económico del país, generando empleos y reduciendo la pobreza. Datos que se obtuvieron del informe sobre el sector palmicultor ecuatoriano realizado en mayo del 2017, muestran que el cultivo, comercialización, industrialización y el procesamiento de palma genera alrededor de 150 mil empleos directos e indirectos, además de fomentar el progreso de diferentes regiones del país particularmente en zonas marginales y vulnerables.

### 1.3.5. Cuesco de palma africana usado como materia prima

El cuesco es el endocarpio del fruto de la palma africana y es de color marrón oscuro amarillento, como se puede ver en la Figura 1.11. Es conocido en investigaciones por sus siglas en inglés como PKS (Palm Kernel Shell) y es un material fibroso, con tamaños que comúnmente oscilan entre (5 a 40) mm.



Figura 1.11. Cuesco de la palma africana.

(Fuente: [25])

El cuesco es un residuo agrícola que se produce en grandes cantidades diariamente en las plantas extractoras de aceite, las empresas no han sabido gestionar adecuadamente este residuo desaprovechando sus excelentes propiedades. Algunas de las aplicaciones en la que se utiliza este residuo son las siguientes:

- Al tener un alto poder calorífico y bajo contenido de cenizas es usado como material combustible de calderas en las plantas procesadoras de aceite para producir vapor, así como también para calefactores domésticos, con el problema que dicha incineración produce emanaciones de gases que contaminan el medio ambiente.

- Este producto posee propiedades oleofílicas y de adsorción que le permiten atrapar los aceites y sólidos presentes en el agua. Es apto para ser utilizado en la remoción de contaminantes de aguas residuales industriales y en el tratamiento de potabilización [26].
- Ha sido usado como material base en vías internas de las plantaciones donde se cultiva la palma, debido a su alta dureza, resistencia y bajo peso [22].

En la actualidad existe una tendencia creciente por utilizar materiales de construcción no convencionales fomentando la utilización de residuos de procesos industriales o materiales reciclados. Debido a las características mecánicas que presenta el cuesco, puede ser usado como material agregado de refuerzo para materiales compuestos.

## **1.4. Adhesivos**

Se puede definir al adhesivo como una sustancia de origen natural o sintético que aplicada entre las superficies de dos materiales permite una unión resistente a la separación. Se denomina sustratos o adherentes a los materiales que se pretende unir por medio del adhesivo. El mecanismo de unión depende de la fuerza interna del adhesivo (cohesión) y del conjunto de interacciones físicas y químicas que tienen lugar en la interfase adhesivo/sustrato (adhesión) [27]. Los adhesivos generalmente son materiales poliméricos clasificados como termoplásticos, termoestables, elastoméricos y adhesivos naturales (cola animal, caseína, almidón y colofonia) [5] que se aplican en estado líquido y se transforman al estado sólido tras su endurecimiento o curado.

### **1.4.1. Adhesivos naturales y sintéticos**

Los adhesivos de origen natural son aquellos que se extraen de los recursos naturales del planeta y son producidos parcial o totalmente a partir de un material biológico que puede ser de carácter orgánico (almidón, caseína, sangre, etc) o inorgánico (silicatos solubles, cementos, etc) [2]. Los adhesivos naturales fueron los primeros pegamentos que se descubrieron y que se utilizaron en la amplia y compleja historia y evolución de los adhesivos.

Los adhesivos sintéticos se clasifican, como se mencionó anteriormente, en resinas termoplásticas, resinas termoestables y resinas elastoméricas. Las resinas termoplásticas son polímeros que se ablandan cuando se exponen al calor y luego solidifican al enfriarse a temperatura ambiente, son generalmente solubles en agua. Las resinas termoestables forman polímeros que son reticulados durante el curado, y después de este son insolubles y no se ablandan con el calor. Los adhesivos elastoméricos son formados generalmente por mezclas de caucho y resinas, la característica principal que aporta este tipo de adhesivos es cierta flexibilidad a la resina termoestable [2].

#### **1.4.2. Polímeros y biodegradación**

La introducción de nuevos materiales biodegradables ha sido el reto de la ciencia de los materiales en los últimos 20 años. Los polímeros biodegradables están en pleno desarrollo para intentar mitigar el problema medioambiental que supone el reciclado de los plásticos convencionales. Los polímeros biodegradables deben tener estructuras químicas que permitan la degradación del material.

La degradación se puede dar ya sea por efecto de la temperatura (degradación térmica), debido al contacto con el agua (degradación hidrolítica), o por efectos medioambientales como la luz solar (fotodegradación) o los microorganismos (biodegradación) [28].

La biodegradación se define como la capacidad metabólica de los microorganismos como bacterias, hongos y algas, para transformar o mineralizar contaminantes orgánicos en compuestos menos peligrosos, que puedan ser integrados en los ciclos biogeoquímicos naturales [29]. La biodegradación puede ser parcial y consiste en la alteración en la estructura química del material y la pérdida de propiedades específicas.

También la biodegradación puede ser total, donde el material es degradado totalmente por la acción de microorganismos con la producción de CO<sub>2</sub> (bajo condiciones aeróbicas) y metano (bajo condiciones anaeróbicas), agua, sales minerales y biomasa [29]. Si bien los polímeros naturales están generalmente más asociados al término biodegradabilidad, la gama de los polímeros sintéticos que cumplen este concepto se ha incrementado en los últimos años.

Los polímeros biodegradables pueden clasificarse en:

- Polímeros naturales sin modificar: celulosa, almidón y proteínas.
- Polímeros naturales modificados de manera biológica y/o química, como el acetato de celulosa o los polialcanoatos.
- Polímeros sintéticos.
- Materiales compuestos que combinan partículas biodegradables (almidón) con polímeros sintéticos biodegradables (alcohol vinílico).

### **1.4.3. Alcohol Polivinílico (PVA)**

El alcohol polivinílico (PVOH o PVA) con fórmula química  $(C_2H_4O)_n$ , es un polímero sintético biodegradable y soluble en el agua, producido por la polimerización del acetato de vinilo (VAM) seguida por la hidrólisis parcial del polímero polivinil acetato (PVAc). Las propiedades del PVA varían dependiendo de su grado de polimerización e hidrólisis. A mayor grado de polimerización e hidrólisis del PVA mayor será la temperatura del agua en la que se disuelve por lo que puede ser soluble en agua fría (10°C), templada (20°C) y caliente (50°C) [30]. En la Figura 1.12, se puede observar el proceso de reacción de síntesis del alcohol polivinílico.

Se reconoce que el PVA es uno de los pocos polímeros vinílicos que puede tener una mayor tasa de biodegradación. Esto es posible debido a la presencia de grupos hidroxilo que condicionan la naturaleza hidrofílica de este material [32]. Además de los parámetros intrínsecos del polímero, la biodegradación depende en gran medida de las condiciones circundantes que el PVA encuentra al ser liberado al medio ambiente.

La disponibilidad de agua juega un papel crucial, así como la aparición de estructuras bióticas o abióticas que pueden interactuar con la superficie del polímero. Al final, el factor determinante para la biodegradación es la existencia de organismos microbianos que tienen el repertorio para modificar, hidrolizar, metabolizar y finalmente asimilar la molécula de PVA [33].

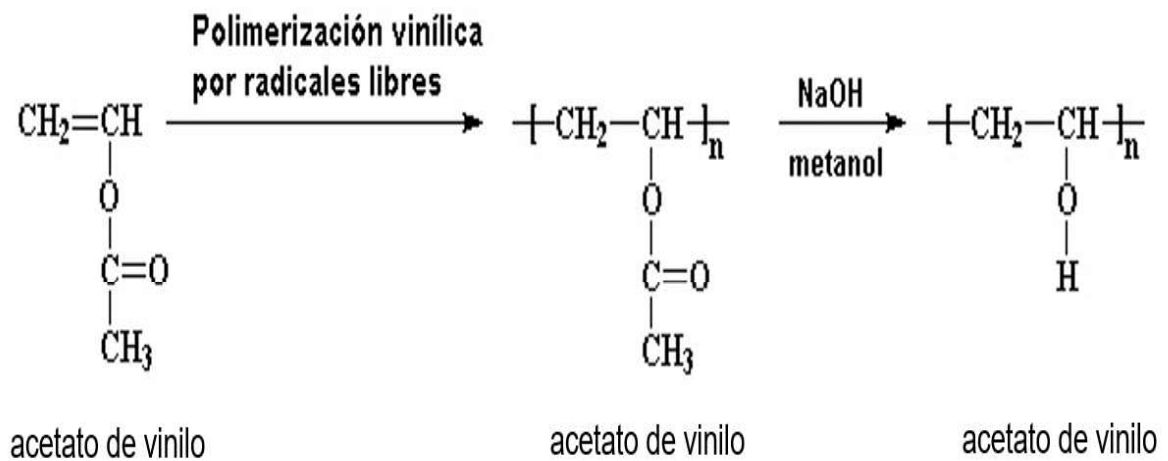


Figura 1.12. Reacción de síntesis del alcohol polivinílico.

(Fuente: [30])

Entre las características principales del PVA se tiene las siguientes:

- Alta resistencia mecánica y flexibilidad.
- Altas propiedades como barrera para los gases sobre todo el oxígeno.
- Buena capacidad de adsorción de sustancias polares.
- Buena pigmentación.
- No es tóxico y es inodoro.



## **2. METODOLOGÍA**

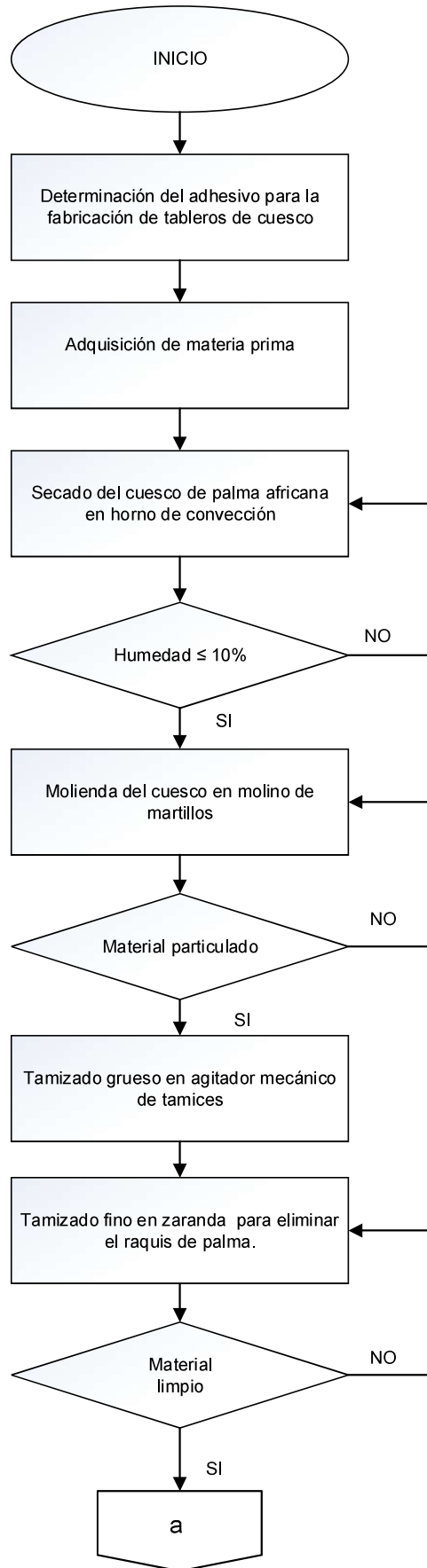
El objetivo principal de este estudio fue la elaboración y caracterización de tableros de partículas a partir del cuesco de la palma africana con adhesivo biodegradable. Para la obtención de los tableros primero se determinó el tipo de matriz biodegradable que mejor se adapta al refuerzo, para el efecto se realizó un estudio previo de los diferentes tipos de adhesivos biodegradables que se encuentran en el mercado y en base al método de criterios ponderados se escogió el adhesivo que cumplió con los objetivos y alcance de este estudio.

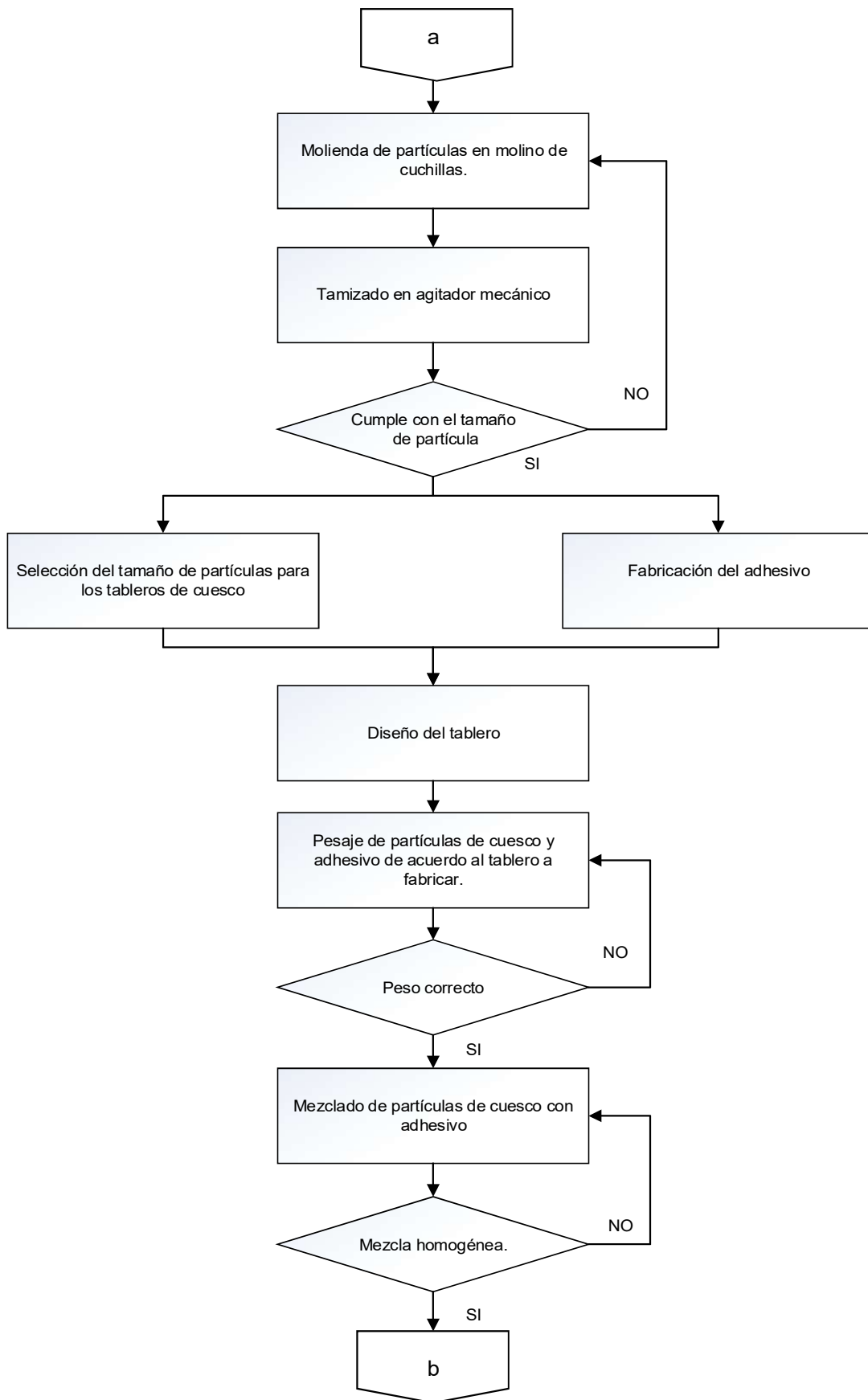
Por medio del método de ensayo y error se determinaron las combinaciones de concentración másica del adhesivo biodegradable y partículas de cuesco y en base a estudios previos se determinó las variables óptimas para el proceso de prensado de los tableros fabricados en este proyecto.

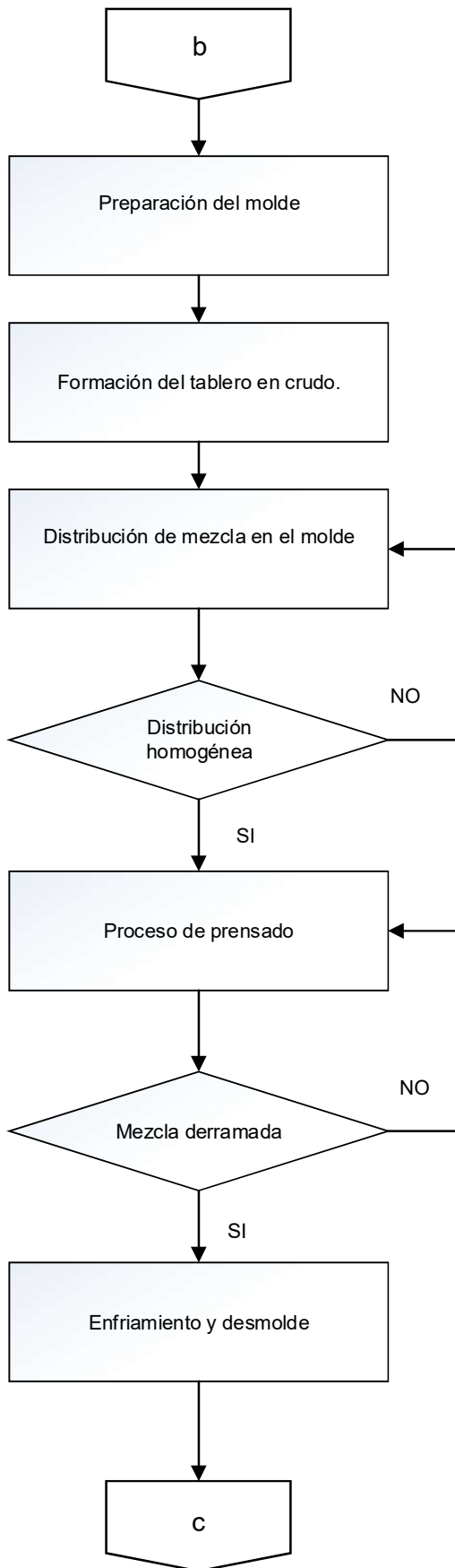
Para la caracterización mecánica y física de los tableros de cuesco con adhesivo biodegradable se utilizaron las normas ASTM D 1037, ASTM D 2395 y la ASTM D 4442. A partir de los análisis de los ensayos mencionados, se seleccionó la composición que presentó las mejores propiedades. Además, se comparó los resultados que se obtuvieron con la norma INEN 3110:2016 y con otras investigaciones de caracterización de tableros de partículas.

### **2.1. Proceso de elaboración de los tableros de cuesco con adhesivo biodegradable**

Para establecer el proceso de elaboración de los tableros de este estudio se utilizó como referencia principal el proceso de elaboración de tableros aglomerados de partículas de madera. A continuación, se detalla el proceso de elaboración que se utilizó para la obtención de los tableros de cuesco con adhesivo biodegradable, por medio del diagrama de flujo de la Figura 2.1.







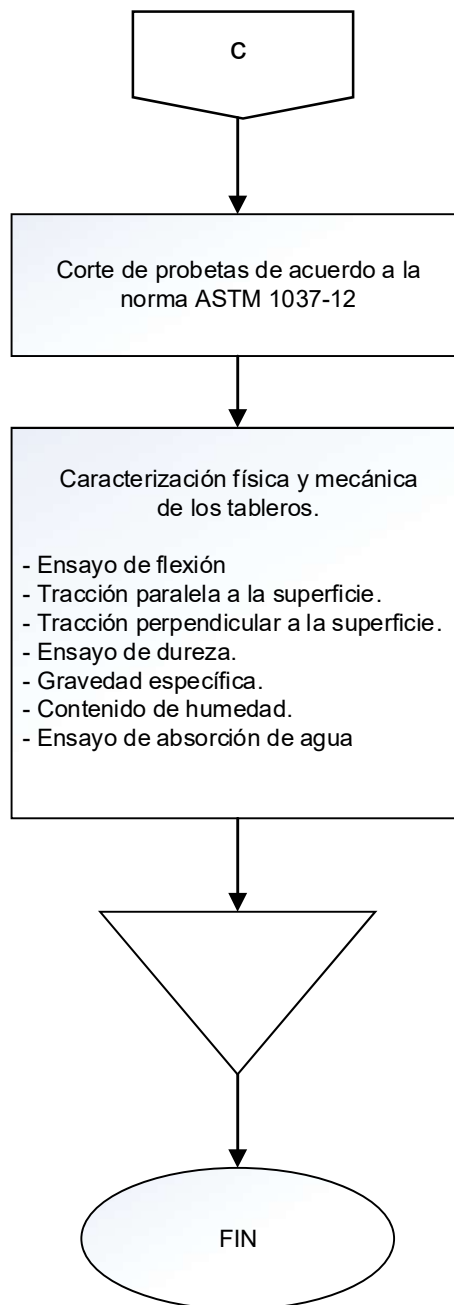


Figura 2.1. Diagrama de flujo para la obtención de tableros de cuesco con adhesivo biodegradable.  
(Fuente: Propia)

### 2.1.1. Determinación del tipo de adhesivo a utilizar

Los aglomerantes para tableros unen las partículas para formar una masa compacta mediante sustancias viscosas que pueden estar en estado líquido o sólido, estos últimos necesitan disolverse para conseguir un aglomerante líquido. Actúan aglomerando sustancias que de por sí, solo se compactarían a grandes presiones reduciendo la presión de compactación [37].

Para determinar el tipo de aglomerante se tomó en cuenta criterios de estudios e investigaciones previas para la elaboración de tableros aglomerados y se escogieron entre 4 tipos de aglomerantes, dos de origen natural y dos de origen sintético, considerando las limitaciones y ventajas de cada uno en base a parámetros como costo, usabilidad y principalmente su resistencia y biodegradabilidad.

Los aglomerantes escogidos fueron los siguientes:

- Aglomerantes de origen natural: almidón de yuca, almidón de maíz.
- Aglomerantes de origen sintético: acetato de polivinilo, alcohol polivinílico.

Para determinar cuál sería la mejor alternativa de los aglomerantes seleccionados se empleó el método de los “criterios ponderados” que sirvió para realizar un análisis en base a los objetivos y alcance que tenía este estudio se dio un orden de importancia o relevancia de los criterios como se indica a continuación:

biodegradabilidad > resistencia > costo >usabilidad

Para este método se elaboró una matriz de criterios ponderados, por facilidad se asignó a las alternativas de aglomerantes una letra como sigue:

- Alternativa A: PVA.
- Alternativa B: acetato de polivinilo (goma blanca).
- Alternativa C: almidón de yuca.
- Alternativa D: almidón de maíz.

El método de los criterios ponderados que se empleó se basa en que cada criterio se confrontó con los restantes y se otorgó los siguientes valores en una tabla:

- 1: Si el criterio de la fila era mayor o superior(mejor) que el de la columna.
- 0,5: Si el criterio de la fila era igual(equivalente) que el de la columna.
- 0: Si el criterio de la fila era menor o inferior(peor) que el de la columna.

Entonces para cada criterio o alternativa se sumaron los valores asignados en relación a las otras alternativas al que se le añadió una unidad para no tener una valoración nula para el criterio o alternativa menos favorable. En otra columna se calcularon sus valores ponderados.

La evaluación total para cada alternativa resultó de la sumatoria de productos de los pesos específicos de cada alternativa por el peso específico del respectivo criterio [38]. La tabla de conclusiones comparó cada criterio con los restantes para establecer cuál de ellos tiene mayor importancia e incidencia en la decisión final de la solución.

- Evaluación del peso específico de cada criterio:

Tabla 2.1. Evaluación del peso específico de cada criterio.

<b>Criterio</b>	<b>Biodegradabilidad</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Costo</b>	<b>Usabilidad</b>	<b><math>\Sigma+1</math></b>	<b>Ponderación</b>
<b>Biodegradabilidad</b>	-----	1,00	1,00	1,00	4,00	0,40
<b>Resistencia</b>	0,00	-----	1,00	1,00	3,00	0,30
<b>Costo</b>	0,00	0,00	-----	1,00	2,00	0,20
<b>Usabilidad</b>	0,00	0,00	0,00	-----	1,00	0,10
				<b>Total</b>	10,00	1,00

(Fuente: Propia)

- Evaluación de los pesos específicos de las distintas alternativas para cada criterio:
  - En la Tabla 2.2 se puede observar la evaluación del peso específico del criterio biodegradabilidad.

$$A > C = D > B$$

Tabla 2.2. Evaluación del peso específico del criterio de biodegradabilidad.

Biodegradabilidad	A	B	C	D	$\Sigma+1$	Ponderación
A	-----	1,00	1,00	1,00	4,00	0,40
B	0,00	-----	0,00	0,00	1,00	0,10
C	0,00	1,00	-----	0,50	2,50	0,25
D	0,00	1,00	0,50	-----	2,50	0,25
Total					10,00	1,00

(Fuente: Propia)

- En la Tabla 2.3 se puede observar la evaluación del peso específico del criterio resistencia.

$$B > A > C = D$$

Tabla 2.3. Evaluación del peso específico del criterio resistencia.

Resistencia	A	B	C	D	$\Sigma+1$	Ponderación
A	-----	0,00	1,00	1,00	3,00	0,30
B	1,00	-----	1,00	1,00	4,00	0,40
C	0,00	0,00	-----	0,50	1,50	0,15
D	0,00	0,00	0,50	-----	1,50	0,15
Total					10,00	1,00

(Fuente: Propia)



- En la Tabla 2.4 se puede observar la evaluación del peso específico del criterio costo (menor)

$$D > C > B > A$$

Tabla 2.4. Evaluación del peso específico del criterio costo.

Costo	A	B	C	D	$\Sigma+1$	Ponderación
A	-----	0,00	0,00	0,00	1,00	0,10
B	1,00	-----	0,00	0,00	2,00	0,20
C	1,00	1,00	-----	0,00	3,00	0,30
D	1,00	1,00	1,00	-----	4,00	0,40
Total					10,00	1,00

(Fuente: Propia)

- En la Tabla 2.5 se puede observar la evaluación del peso específico del criterio usabilidad

$$B > A > C = D$$

Tabla 2.5. Evaluación del peso específico del criterio usabilidad.

Usabilidad	A	B	C	D	$\Sigma+1$	Ponderación
A	-----	0,00	1,00	1,00	3,00	0,30
B	1,00	-----	1,00	1,00	4,00	0,40
C	0,00	0,00	-----	0,50	1,50	0,15
D	0,00	0,00	0,50	-----	1,50	0,15
Total					10,00	1,00

(Fuente: Propia)

- Tabla de conclusiones

En la Tabla 2.6 se puede observar la tabla de conclusiones que determinó el tipo de adhesivo adecuado para la elaboración de tableros con cuesco de palma africana.

Tabla 2.6. Conclusión de criterios ponderados para alternativas de adhesivo.

<b>Criterio</b> <b>Alternativa</b>	<b>Biodegradabilidad</b>	<b>Resistencia</b>	<b>Costo</b>	<b>Usabilidad</b>	<b>Σ</b>	<b>Prioridad</b>
<b>A</b>	0,16	0,09	0,02	0,03	0,30	1
<b>B</b>	0,04	0,12	0,04	0,04	0,24	2=3
<b>C</b>	0,10	0,04	0,06	0,01	0,22	4
<b>D</b>	0,10	0,04	0,08	0,01	0,24	3=2

(Fuente: Propia)

En la tabla de conclusiones del método de criterios ponderados se observa el orden de prioridad de las alternativas que se plantearon usar como adhesivo para la formación de tableros, en primer lugar, se encontró el PVA, seguido en igual importancia el acetato de polivinilo y almidón de maíz, y finalmente el almidón de yuca. Los adhesivos naturales son una buena alternativa en costo, pero en la elaboración de tableros aglomerados presentan una resistencia mecánica inferior y una mayor absorción de agua en comparación a los tableros fabricados con resinas sintéticas [2].

En base a la tabla de conclusiones del método de criterios ponderados se escogió como adhesivo para la elaboración de tableros aglomerados con partículas de cuesco al alcohol polivinílico (PVA), ya que ha sido utilizado en estudios e investigaciones previas para la elaboración de tableros y materiales compuestos dando excelentes resultados como agente aglomerante.

### 2.1.2. Materiales

El PVA es uno de los componentes más importantes en los adhesivos de base acuosa y es muy utilizado como revestimiento y protección. Se decidió utilizar como matriz polimérica el alcohol polivinílico 540 debido a su alto grado de hidrólisis y viscosidad. Para el refuerzo del material compuesto se utilizó partículas de cuesco de palma africana que fueron adquiridas en la empresa ALCOPALMA.

### 2.1.2.1. Cuesco de la palma africana (Palm kernel shell)

Se empleó como refuerzo partículas de cuesco de palma africana que es un subproducto de la extracción del aceite de almendra de palma y que se convierte en un residuo agroindustrial de las plantas extractoras de aceite. Solo algunas fracciones del cuesco tienen otras aplicaciones, como paliativos para carreteras sin asfaltar y para producir carbón activado [34]. En la Figura 2.2 se puede observar el cuesco de palma que se adquirió para la fabricación de tableros aglomerados.



Figura 2.2. Cuesco de palma africana.  
(Fuente: Propia)

Los resultados que se obtuvieron de las propiedades del cuesco, de acuerdo a la literatura, se pueden observar en las Tablas 2.7 y 2.8. Con los valores del contenido lignocelulósico y el análisis físico-químico se pudo conocer como posiblemente se iban a comportar las partículas de cuesco al utilizarse como refuerzo en la fabricación de tableros aglomerados.

Tabla 2.7. Contenido lignocelulósico (componentes) y poder calorífico de cuesco.

<b>Poder Calorífico [MJ/kg b.s.]</b>	<b>Componentes químicos [% b.s.]</b>				
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Extractivos	Cenizas
20,09	20,80	22,70	50,70	4,80	1,00

(Fuente: [35])

Tabla 2.8. Análisis físico químico del cuesco.

Análisis Elemental [%]				Análisis Próximo [%]			Poder Calorífico [MJ/kg]	
C	H	N	O	Humedad	Volátiles	Ceniza	PCS	PCI
52,80	5,70	<1,00	40,50	11,20	79,00	1,40	22,20	21,10

(Fuente: [35])

Se adquirió el cuesco en presentación de quintales de 45 kg en la planta extractora de aceite Teobroma de la empresa Alcopalma que se encuentra ubicada en el kilómetro 34 de la vía Santo Domingo – Quinindé en La Concordia, provincia de Santo Domingo de los Tsáchilas, la planta extractora de aceite Teobroma ofrece los siguientes productos: aceite crudo de palma, aceite crudo de palmiste, harina de palmiste y cuesco de palma.

En la Tabla 2.9, se muestran las propiedades que presentó el cuesco de palma adquirido (poder calorífico, valor energético, tamaño de partícula, humedad, cenizas y porcentaje de cloro). Se observó que los valores de poder calorífico y humedad que se encuentran en la Tabla 2.9 tienen similitud con los valores de la Tabla 2.8. Mientras que el valor porcentual de ceniza que indica la empresa ALCOPALMA es mayor que el valor porcentual que se indica en las Tablas 2.7 y 2.8, ya que puede variar debido a las condiciones agroclimatológicas de cada país.

Tabla 2.9. Propiedades del cuesco adquirido según la empresa ALCOPALMA.

Parámetro	Min.	Max.
Poder calorífico [MJ/kg]	16,73	
Tamaño de partícula [mm]	5,00	25,00
Humedad [%]	10,00	20,00
Cenizas [%]	-----	5,00
Cloro [%]	0,00	0,10

(Fuente: Alcopalma,2018)

### 2.1.2.2. Alcohol polivinílico (PVA)

El adhesivo que se empleó es el alcohol polivinílico mejor conocido como PVA o PVOH con fórmula química  $[-CH_2CHOH-]_n$ . Este adhesivo fue adquirido en la empresa Minerva en la ciudad de Quito que comercializa este producto con el nombre técnico de PVA 540 que se importa al país, fabricado por la empresa RONAS CHEMICALS IND.CO.LTD. La hoja técnica y la hoja de seguridad se pueden ver en el Anexo I. El PVA 540 se adquirió en una presentación de un saco de 25 kg como se puede ver en la Figura 2.3.

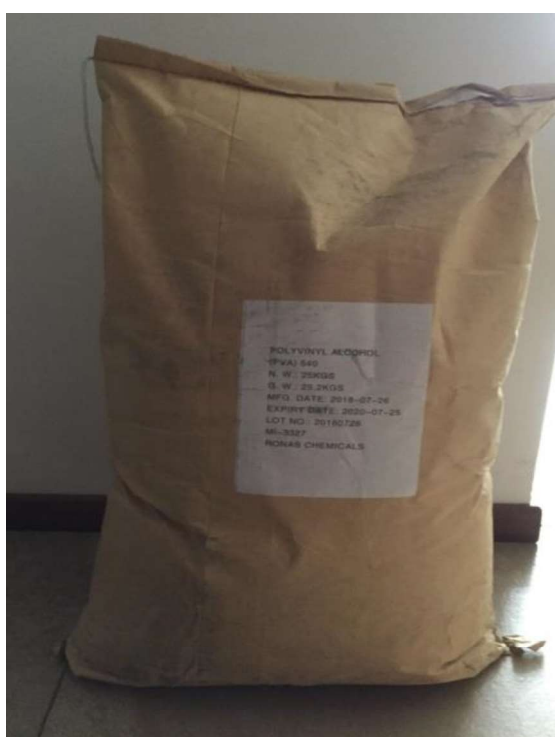


Figura 2.3. Saco de PVA (Alcohol Polivinílico) de 25 kg.

(Fuente: Propia)

El alcohol polivinílico comúnmente se confunde con el acetato de polivinilo o goma blanca, el PVA se obtiene del PVAc por medio de una reacción química de hidrólisis. Este tipo de polímero es pesado, de color blanco o amarillo claro (Figura 2.4), se encuentra en estado sólido, de aspecto granular o pulverulento, no es tóxico, es soluble en agua y el solvente proporciona buena viscosidad y formación de película.

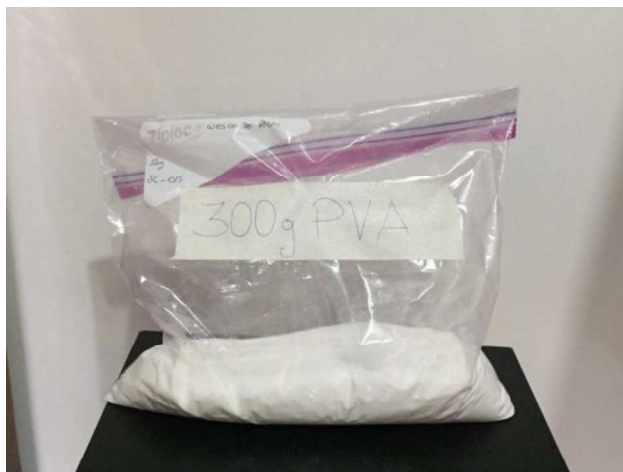


Figura 2.4. Presentación en polvo del PVA (Alcohol Polivinílico).

(Fuente: Propia)

Las características más importantes de este producto son las siguientes:

- Hidrólisis: (87,00 a 89,00) mol%.
- Viscosidad: (44,00 - 55,00) cps.
- Volátiles: 5,00% máx.
- Ceniza: 0,50% máx.
- Pureza: 93,50% min.
- Valor de PH: 5,00 a 7,00.
- Punto de fusión: > 200°C.

La información sobre la biodegradabilidad del producto se puede ver en la hoja de seguridad en la sección de información ecológica (Anexo I) e indica que el PVA ha sido sustancialmente biodegradado en varios sistemas de prueba después de un tiempo para la aclimatación microbiana.

### **2.1.3. Preparación de las partículas (cuesco de palma africana)**

Una vez adquirido el cuesco, se procedió a la recepción y almacenaje del producto en una bodega de la Facultad de Ingeniería Mecánica (FIM) de la Escuela Politécnica Nacional en donde se esparció el producto con el objetivo de reducir el contenido de humedad que tenía el cuesco de palma africana cuando salió del proceso industrial de extracción de aceite.

El contenido de humedad se determinó con una termobalanza marca OHAUS modelo MB45 del Laboratorio de Nuevos Materiales (LANUM) (Figura 2.5). El rango de contenido de humedad que presentaron las muestras de cuesco fue entre el 5% al 10%.



Figura 2.5. Termo balanza.  
(Fuente: Propia)

### 2.1.3.1. Secado

Se realizó con el fin de eliminar la humedad residual o remanente que estaba en el cuesco de palma africana. Esta etapa fue de vital importancia en la fabricación de tableros aglomerados pues al retirar la presión y calor introducidos durante el proceso de termoformado el vapor buscaba pasar de un nivel mayor de energía a uno de menor energía produciendo un efecto negativo en el tablero formando burbujas y grietas al buscar una salida [39].

El secado se realizó en el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustria, en el Departamento de Ciencia de los Alimentos y Biotecnología (DECAB) y en el Departamento de Ingeniería Química de la Escuela Politécnica Nacional.

El contenido de humedad final de un tablero aglomerado generalmente es alrededor del 10% [8], en el caso de este estudio se tomó en cuenta el aumento del contenido de humedad proveniente del adhesivo, por lo que las partículas debían ser secadas con el fin de reducir el contenido de humedad hasta un valor inferior al 10%.

Para alcanzar un contenido de humedad entre el 3% y 5% las partículas debían secarse a una temperatura de  $103 \pm 2^\circ\text{C}$  por un tiempo de 3 h de acuerdo con la norma ASTM D 4442 [40]. En esta investigación el cuesco fue secado a una temperatura de  $101^\circ\text{C}$  durante 2 h obteniendo un contenido de humedad menor al 1%. Las estufas y el secador que se utilizaron en el proceso se muestran en las Figuras 2.6, 2.7 y 2.8.



Figura 2.6. Secador de banda marca Wenger.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.7. Estufa memmert UNB 500 con control de temperatura.  
(Fuente: Propia)





Figura 2.8. Estufa Marca POL-EKO-APARATURA SP.J.  
modelo SLN 115 STD con control de temperatura.  
(Fuente: Propia)

### **2.1.3.2. Molienda**

Para la obtención del tablero final de aglomerado se necesitaban partículas de tamaño uniforme, por lo que se redujo el tamaño de las partículas de cuesco a través de dos molinos de diferente tipo (Figuras 2.9 y 2.10).

El molino de martillos marca CONDUX, modelo LHM 20716 funciona según el principio de trituración por impacto debido a golpes múltiples, es utilizado para materiales de dureza media como granos, cortezas, hojas y minerales, el tamaño promedio de partícula depende del tipo de malla utilizada que va de (2 a 6) mm. Se realizó la molienda primaria del cuesco en este molino obteniéndose partículas de tamaños superiores a 4 mm.

Se realizó una molienda secundaria en el molino de cuchillas del Laboratorio de Operaciones Unitarias de la FIQA de la EPN, el cual reduce el tamaño de partícula al fragmentar la muestra por corte y sirve para homogenizar sustancias con un alto contenido de agua, aceite o grasa y para materiales blandos a semiduros y fibrosos. De esta operación se obtuvieron partículas de tamaño inferior a los 4 mm, por lo que fue necesaria una molienda terciaria para obtener partículas de tamaño inferior a los 2 mm.



Figura 2.9. Molino de martillos.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.10. Molino de cuchillas.  
(Fuente: Propia)

### 2.1.3.3. Tamizado

Una vez secas y trituradas las partículas en los molinos descritos anteriormente, se tamizaron por medio de un juego de tamices de diferente número de malla y un agitador de tamices mecánico (Figura 2.11). El objetivo de tamizar es remover el polvo procedente de la trituración del material y separar las partículas de acuerdo a su tamaño, ya que si el polvo no es retirado este tiende a absorber gran cantidad de resina provocando que se reduzca la resistencia mecánica del tablero [41].



Figura 2.11. Agitador de tamices mecánico.  
(Fuente: Propia)

El tamizado se realizó en etapas y en función del tipo de molino que se utilizó para la trituración de partículas de cuesco de palma africana. Para las partículas que se obtuvieron del molino de martillos se tamizó con los tamices número 4, 6, 8, 40 y 60. Para las partículas de los tamices número 4, 6, 8 se realizó un tamizado manual con zaranda como se muestra en la Figura 2.12. Este procedimiento se realizó con el fin de retirar las fibras presentes en algunas de las partículas de cuesco.



Figura 2.12. Tamizado con zaranda.  
(Fuente: Propia)

Las partículas obtenidas de los tamices número 4, 6 y 8, limpias de las fibras propias del cuesco, se molieron en el molino de cuchillas para posteriormente tamizarlas con los tamices número 8, 12, 16, 20 y 40. Las partículas de los tamices 8 y 12 se molieron nuevamente en el molino de cuchillas para finalmente tamizar con los tamices número 12, 14, 16, 20 y 40. Este último juego de tamices se puede observar en la Figura 2.13.

Una vez culminado el proceso de tamizado y con las partículas separadas por tamaño se seleccionó el tamaño más idóneo para elaborar los tableros de cuesco con adhesivo biodegradable, generalmente en los tableros aglomerados de madera las partículas más pequeñas se utilizan para las superficies y las partículas más grandes para el centro del tablero como se mencionó anteriormente.

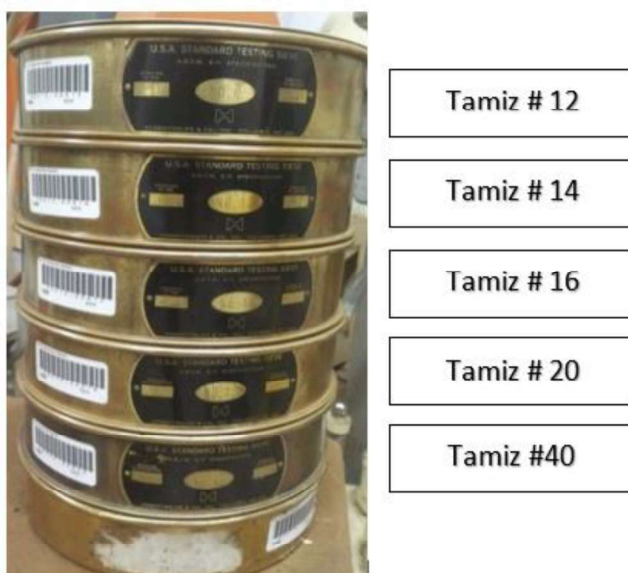


Figura 2.13. Juego de tamices para la separación final de partículas por tamaño.

(Fuente: Propia)

#### **2.1.3.4. Separación de las partículas por tamaño (Granulometría)**

El análisis granulométrico permite separar las partículas de la muestra por tamaños, dicha separación se realizó mediante el tamizado de las partículas obtenidas del molino de cuchillas en la molienda terciaria y no se determinó las cantidades en masa de cada tamaño de partícula, como se especificó anteriormente se hizo tres moliendas con los diferentes tamaños de partículas obtenidas. Los números de los tamices que se utilizaron para obtener los diferentes tamaños de partículas se puede ver la en la Tabla 2.10, con su respectivo tamaño de malla.

Tabla 2.10. Tabla de conversión de número de tamiz a milímetros.

Número de tamiz	Dimensión de la malla [mm]
> 12,00	> 1,68
12,00	1,68
14,00	1,41
16,00	1,19
20,00	0,84

(Fuente: [42])

### 2.1.3.5. Selección del tamaño de partículas para los tableros

En base al método de ensayo y error se definió el tamaño adecuado de partícula a usarse, producto que se obtuvo de la combinación de las partículas de diferentes tamices para la fabricación de los tableros, durante el proceso de experimentación se logró concluir lo siguiente:

- Con partículas de tamaño igual o mayor al tamiz # 12 el PVA formaba una capa de adhesivo no uniforme en la superficie del tablero. A medida que se aumentaba el número de tamiz esta capa iba desapareciendo hasta desaparecer por completo.
- En base a los tamices disponibles, las partículas de tamaño menor al tamiz número 20, son muy pequeñas para la elaboración de tableros aglomerados, es el caso de los números de tamices 40 y 60 que tienen un tamaño de malla de (0,40 y 0,25) mm, respectivamente.
- El tamaño de partícula que se utilizó es el del tamiz número 16 por presentar las características necesarias para la investigación como son dureza, compactación y estética que debe ostentar el tablero.
- Se combinó las partículas obtenidas en el tamiz número 16, con las partículas del tamiz número 20 en una proporción 50/50 de masa, se procedió de igual manera al combinar las partículas del tamiz número 14 con las partículas del tamiz número 16 en igual proporción 50/50 de masa (ver Tabla 2.11). Ambas combinaciones se evaluaron tomando como referencia el comportamiento de las partículas del tamiz número 16.

Tabla 2.11. Tamaños de partículas seleccionadas para la elaboración de los tableros.

<b>Combinación</b>	<b>Número de tamiz</b>	<b>Relación másica de partículas en el tablero [%]</b>
1	20 – 16	50/50
2	16	100
3	16 – 14	50/50

(Fuente: Propia)

Para este estudio se decidió utilizar la siguiente convención que se detalla en la Tabla 2.12.

Tabla 2.12. Tipo de partícula según el número de tamiz.

<b>Número de tamiz</b>	<b>Tipo de Partícula</b>
20	Pequeña
16	Mediana
14	Grande

(Fuente: Propia)

#### **2.1.4. Relación PVA – Agua (H<sub>2</sub>O)**

El PVA viene en polvo (solute) el cual tiene que ser disuelto en agua (disolvente) en una proporción establecida para obtener el adhesivo. La relación de PVA y agua para la elaboración del adhesivo se estableció en base a:

- El grado de hidrólisis del PVA adquirido, que define su solubilidad en agua, con una hidrólisis del (87 a 89) % mol, lo que significa que el porcentaje molar (concentración de soluto en una disolución, PVA en agua) tiene que ser de (11 a 13) % mol.
- Según la investigación “*Mechanical properties of particleboard made from rice husk*” realizada por Takao Ota y Tomoya Okamoto [44], basados en los efectos del agua purificada y la proporción de mezcla de PVA, concluyen que es importante controlar la cantidad de agua, es decir, la viscosidad del aglomerante y producir un fuerte enlace entre las partículas para mejorar las propiedades mecánicas del tablero de partículas,

en dicho estudio se muestra que las mejores propiedades mecánicas se obtienen con una relación de porcentaje en peso de 70% agua y 30% PVA, siendo esta relación la que más contenido de agua tiene en comparación a las otras dos relaciones de porcentaje en peso de agua.

- En base al método de ensayo y error se observó que al tener una cantidad menor al 90% de agua en porcentaje en peso de la disolución, fue bastante difícil de diluir el PVA y se formó un adhesivo demasiado viscoso que sería difícil de mezclar con el cuesco para elaborar los tableros.

Por lo tanto, se estableció una relación en porcentaje en peso de la disolución de 90/10 de agua y PVA respectivamente.

#### **2.1.4.1. Preparación del adhesivo**

Con una balanza digital de 5 kg de capacidad y precisión de 1 g se pesó la cantidad de PVA y agua, de acuerdo a la relación en peso establecida de PVA y agua a mezclarse. En este caso para obtener la relación de 90/10 de agua – PVA se necesitó 100 g de PVA por cada litro de agua (1000 g).

Según las investigaciones de *Syed, H. et al., 1999* y *S. H. Imam et al., 2005* en sus trabajos sobre “*Wood adhesive from crosslinked poly(vinyl alcohol) and partially gelatinized starch: preparation and properties*” y “*Characterization of biodegradable composite films prepared from blends of poly(vinyl alcohol), cornstarch, and lignocellulosic fiber*” respectivamente, para la preparación del adhesivo la mezcla de PVA y agua se calienta a aproximadamente 80°C con agitación constante hasta que se logre la disolución completa.

Se mezcló el PVA y agua progresivamente en un recipiente, durante los primeros minutos se formaron bolas de alcohol polivinílico como se observa en la Figura 2.15. Estas bolas tuvieron que ser diluidas con ayuda de agitación mecánica constante hasta que se obtuvo una mezcla homogénea y viscosa. El tiempo que se demoró para obtener el adhesivo fue aproximadamente de 2 h. Durante este proceso la mezcla fue calentada en una estufa hasta una temperatura de 80°C que se mantuvo constante, la temperatura se tomó con la ayuda de un termómetro digital que tiene una capacidad de -50°C a 300°C y precisión de 0,1°C.



Figura 2.14. Materiales para elaboración del adhesivo.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.15. Mezcla de agua y PVA para obtener el adhesivo.  
(Fuente: Propia)



### 2.1.5. Diseño del tablero aglomerado

Se realizó el diseño del tablero aglomerado con la finalidad de establecer la cantidad de masa, tanto de partículas como adhesivo necesario para mediante un proceso de termocompresión obtener un tablero, en función del valor de densidad y dimensiones establecidas.

#### 2.1.5.1. Densidad

Los tableros de densidad media tienen valores de densidad entre (400 a 800) kg/m<sup>3</sup>. Para la elaboración de los tableros de este estudio se tomó un valor referencial de densidad promedio de 600 kg/m<sup>3</sup>, valor muy cercano al que se puede encontrar en un catálogo comercial para tableros MDP partículas mixtas de la empresa EDIMCA cuya densidad es de 615 kg/m<sup>3</sup> para tableros de 9 mm de espesor.

#### 2.1.5.2. Dimensiones

El tamaño de los tableros aglomerados se determinó en función a la capacidad de la prensa hidráulica utilizada para el proceso de termocompresión y las dimensiones que debían tener las probetas para realizar los ensayos mecánicos y físicos que establece la norma ASTM D 1037-12.

El largo y ancho del tablero fueron de 300 mm x 300 mm, mientras el espesor inicial fue de 17 mm para obtener el espesor deseado final de 9 mm de tal manera que cumpla con el rango de densidad establecida para tableros aglomerados de partículas de densidad media. Las dimensiones del tablero en crudo se pueden ver en la Tabla 2.13 y las dimensiones finales del tablero se encuentran en la Tabla 2.14.

Tabla 2.13. Dimensiones iniciales de los tableros aglomerados en crudo.

Dimensiones [mm]	
Largo (l)	300,00
Ancho (a)	300,00
Espesor (e)	17,00

(Fuente: Propia)

Tabla 2.14. Dimensiones finales de los tableros después del proceso de termocompresión.

Dimensiones [mm]	
Largo (l)	300,00
Ancho (a)	300,00
Espesor (e)	9,00

(Fuente: Propia)

### 2.1.5.2.1. Volumen

Para obtener el volumen se realizó el cálculo con las dimensiones iniciales de los tableros aglomerados en crudo, como se muestra en la ecuación 2.1.

$$V = l \times a \times e$$

$$V = 300 \times 300 \times 17$$

$$V = 1,53 \times 10^6 \text{ mm}^3 = 1,53 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Ecuación 2.1. Cálculo del volumen del tablero en crudo.

### 2.1.5.2.2. Masa

El valor de la masa del tablero en crudo se obtuvo con la ecuación 2.2. Una vez determinada la masa teórica del tablero en crudo, se estableció la cantidad de partículas (cuesco) y adhesivo que se debía utilizar para la elaboración de los diferentes tableros aglomerados de cuesco de palma con adhesivo PVA.

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

$$m = \rho \times V$$

$$m = 600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 1,53 \times 10^{-3} \text{ m}^3 = 0,918 \text{ kg} = 9,18 \text{ g}$$

Ecuación 2.2. Cálculo de la masa teórica del tablero.

### 2.1.5.3. Molde

El molde fue diseñado conceptualmente en un software CAD (Figura 2.16) y como se mencionó anteriormente, sus dimensiones fueron establecidas en función de la capacidad de la prensa calefactora y las medidas de las probetas a obtener para realizar los ensayos mecánicos y físicos (planos de taller y conjunto del molde metálico Anexo II).

El molde debe tener una buena hermeticidad para no permitir la fuga de material, resistir altas temperaturas, debido a que el proceso de termocompresión normalmente emplea temperaturas mayores a 100°C, y tener buena resistencia mecánica por las fuerzas aplicadas durante el ciclo de prensado.

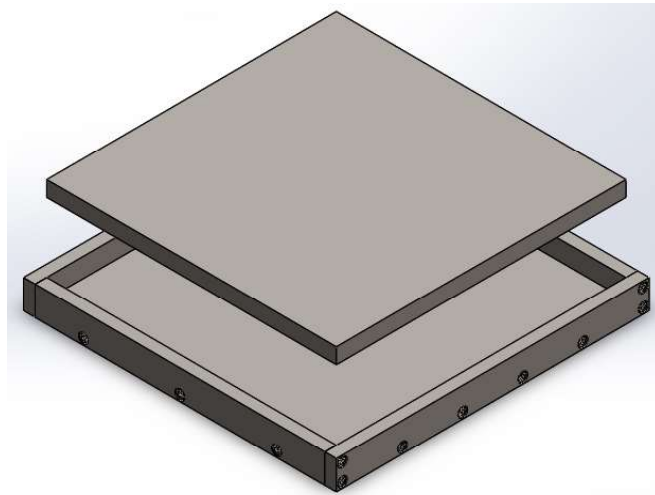


Figura 2.16. Diseño del molde metálico en Solidworks.

(Fuente: Propia)

El molde fue realizado en las instalaciones y con los equipos de la Metalmecánica San Bartolo de la EPN, se realizó operaciones de corte con cizalla, sierra y oxiacetilénica (ver Figura 2.17); fresado con diferentes tipos de fresas para desbaste y acabado (ver Figura 2.18); taladrado, roscado con machuelo; esmerilado, limado y lijado, para la fabricación de acuerdo a los planos con el diseño planteado. En la Figura 2.19 se puede observar el molde finalizado.



Figura 2.17. Corte oxiacetilénico de las planchas de acero.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.18. Fresado del acero para obtener las dimensiones requeridas.  
(Fuente: Propia)

El diseño consiste en un marco y una base emperrada, para que sea fácil el desmolde del tablero minimizando el número de pernos a usar para el montaje y desmontaje del molde.



Figura 2.19. Molde metálico para la elaboración de tableros.  
(Fuente: Propia)

#### 2.1.5.4. Determinación de las relaciones másicas partícula – adhesivo.

En base al método de ensayo y error se definió las relaciones másicas adecuadas de aglomerante y partícula para la fabricación de los tableros, durante el proceso de experimentación se pudo concluir que:

- Con una mezcla de partícula (cuesco) y adhesivo superior a la relación 70/30 el adhesivo fluía fuera del molde a una temperatura menor a 120°C (temperatura mínima para formar los tableros aglomerados) formando una capa de adhesivo no uniforme en la superficie del tablero.
- Con una mezcla de partícula (cuesco) y adhesivo menor a una relación de 75/25 respectivamente, el tablero se desmoronaba lo que indica que el adhesivo no aglomeraba de buena manera las partículas del cuesco en consecuencia se necesitaba más adhesivo.
- Con una mezcla de partícula (cuesco) y adhesivo en rangos entre 80/20 y 75/25 respectivamente con incremento del 3%, de la partícula, es decir, 78/22 el tablero se desmoronaba de igual manera, lo que demuestra que para tener un cambio representativo en la aglomeración de las partículas se debe tener un incremento mínimo del 5% de la partícula en la relación másica.

Por las razones expuestas anteriormente se decidió establecer dos relaciones másicas partícula- aglomerante que fueron las siguientes; 70/30 y 75/25. En la Tabla 2.15, se puede observar la masa del refuerzo (partículas de cuesco) y la masa de la matriz (adhesivo) para las relaciones másicas 70/30 y 75/25.

Tabla 2.15. Relación másica de partícula-aglomerante.

Relación	Porcentaje en masa del tablero [%]		Cantidad de masa de partículas y adhesivo en relación a la masa total del tablero (918 g) [g]	
	Partícula (cuesco)	Aglomerante (PVA)	Partícula (cuesco)	Aglomerante (PVA)
1	75	25	688,50	229,50
2	70	30	642,60	275,40

(Fuente: Propia)

### 2.1.5.5. Determinación de las diferentes combinaciones de tableros

Se determinó las variables basándose en estudios previos de elaboración de tableros aglomerados, en las relaciones másicas de partícula y aglomerante, y en tamaños de partícula (también determinados en base al método de prueba y error), en la Tabla 2.16 se muestran las diferentes combinaciones de variables que se tiene para la elaboración de los diferentes tipos tableros con partículas de cuesco.

Tabla 2.16. Combinación de variables para la elaboración de tableros.

<b>Relación másica [%] Partícula- Adhesivo</b>	<b>Tamaño de Partícula (Tamiz)</b>	<b>Relación másica de partículas en el tablero [%]</b>	<b>Tipo de Tablero</b>
75/25	20-16	50/50	T1 A
	16	100	T2 A
	16 - 14	50/50	T3 A
70/30	20 - 16	50/50	T1 B
	16	100	T2 B
	16 - 14	50/50	T3 B

(Fuente: Propia)

Por lo tanto, se tiene dos variables:

- Relación másica partícula - adhesivo: 75/25 y 70/30
- Tamaño de partícula de acuerdo a la combinación de mallas 20 y 16; malla 16 y combinación de mallas 16 y 14.

Se obtuvieron un total de seis diferentes tipos de tableros, en las Tablas 2.17 y 2.18, se muestra la cantidad de masa de partículas y adhesivo que se debe utilizar según el tipo de tablero. Para la caracterización mecánica y física de los tableros se realizaron los siguientes ensayos: flexión, tracción paralela, tracción perpendicular (cohesión interna), dureza, densidad, gravedad específica y contenido de humedad. Para cada ensayo se evaluó un mínimo de 5 probetas.

### 2.1.5.6. Mezclado de partículas y adhesivo

Tabla 2.17. Cantidad de masa de partículas y adhesivo para relación partícula- adhesivo 75:25.

<b>Composición máscica del tablero [g] Masa total tablero: 918 g</b>	<b>Tipo de tablero</b>	<b>Relación máscica de partículas en el tablero [%]</b>	<b>Cantidad de masa de cada tamaño de partícula [g]</b>	<b>Masa de adhesivo [g]</b>
Partícula: 688,50 Adhesivo: 229,50	T1 A	50/50	344,25	229,50
	T2 A	100	688,50	
	T3A	50/50	344,25	

(Fuente: Propia)

Tabla 2.18. Cantidad de masa de partículas y adhesivo para relación partícula- adhesivo 70:30.

<b>Composición máscica del tablero [g] Masa total tablero: 918 g</b>	<b>Tipo de tablero</b>	<b>Relación máscica de partículas en el tablero [%]</b>	<b>Cantidad de masa de cada tamaño de partícula [g]</b>	<b>Masa de adhesivo [g]</b>
Partícula: 642,60 Adhesivo: 275,40	T1 B	50/50	321,30	275,40
	T2 B	100	642,60	
	T3 B	50/50	321,30	

(Fuente: Propia)

### 2.1.6. Elaboración de los tableros para la obtención de probetas.

#### 2.1.6.1. Mezclado del cuesco con PVA

Para la fase de mezclado se debía tener la materia prima preparada (partículas de cuesco de palma africana y PVA líquido). Las cantidades para realizar los diferentes tableros se encuentran en las Tablas 2.17 y 2.18. En esta fase se utilizaron dos operaciones unitarias: pesaje y mezclado.

### 2.1.6.1.1. Pesaje

Para realizar el pesaje de las partículas de cuesco de palma africana y el adhesivo se utilizó una balanza digital de 5000 g de capacidad (Figura 2.20).



Figura 2.20. Pesaje de materia prima.

(Fuente: Propia)

### 2.1.6.1.2. Mezcla

Una vez realizado el pesaje de los dos componentes, se procedió a verter en un contenedor las partículas de cuesco de palma africana y el adhesivo. La mezcla se realizó de manera manual durante 10 min, para obtener una mezcla homogénea y que todas las partículas quedaran impregnadas de aglomerante como se puede observar en la Figura 2.21.



Figura 2.21. Mezclado de partículas de cuesco y aglomerante.

(Fuente: Propia)



### 2.1.6.2. Formación de los tableros

Se preparó el molde, aplicando un desmoldante (Smooth-On) para evitar que la mezcla se adhiera a la superficie del molde. Se esperó cinco minutos antes de verter la mezcla en el molde y esparcirla, de tal manera que se consiga una distribución lo más uniforme posible, para lo cual se aplicó presión sobre la superficie (Figura 2.22), utilizando un mazo.



Figura 2.22. Formación de tableros.

(Fuente: Propia)

### 2.1.6.3. Prensado de los tableros

El ciclo de prensado involucra las siguientes variables: presión, temperatura y tiempo. Dichas variables fueron determinadas por el método de ensayo y error para obtener y formar los tableros en función de los materiales utilizados (cuesco y PVA), espesor final y densidad deseada.

Para determinar los valores de las variables óptimas a utilizarse en el proceso de prensado de los tableros se tomó como referencia la investigación realizada por Guochao Li et al [47], en su trabajo sobre "*Biodegradable composites from pinewood sawdust and polyvinyl alcohol adhesives*". En este estudio se observa cómo afecta la temperatura en el proceso de prensado, Guachao Li et al [47] prueba cuatro diferentes temperaturas para la fabricación del material compuesto: 120°C, 140°C, 160°C y 180°C, los resultados de la investigación determinan que la temperatura óptima era de 140°C. Las otras dos variables se mantuvieron constantes. La presión fue de 13 MPa y el tiempo de prensado fue de 10 min. Las variables utilizadas por Guachao Li et al [47] dieron las directrices necesarias para utilizar el PVA como adhesivo en la fabricación de tableros para esta investigación.

Se dio un precalentamiento previo al ciclo de prensado, el rango de temperatura del precalentamiento fue entre 100°C a 120°C, en dicho rango se evapora el agua libre ayudando a que no se forme una capa de adhesivo no uniforme en la superficie del tablero, además que evita la deformación del colchón de partículas en el proceso de prensado como menciona Rangel [43].

Se estableció un ciclo de prensado en un rango de temperaturas de 120°C hasta 140°C con las siguientes presiones sostenidas: 180 kg/cm<sup>2</sup>, 120 kg/cm<sup>2</sup>, 60 kg/cm<sup>2</sup> y 10 kg/cm<sup>2</sup>. Las tres primeras presiones tuvieron una duración de 3 min cada una y la última presión tuvo una duración de 10 min hasta alcanzar la temperatura requerida. El rango de temperaturas establecido para el ciclo de presando se determinó experimentalmente y se concluyó que temperaturas inferiores a 120°C no lograban formar el tablero quedando éste crudo, y temperatura de superiores a 150°C hacían que el PVA comience a fluir del molde y se evapore. El ciclo de prensado se resume en la Tabla 2.19. Para la presión inicial de 180 kg/cm<sup>2</sup> el tablero fue descomprimido cada 30 s, durante el tiempo que se aplicó esta presión con el fin de liberar los vapores generados por el calentamiento como menciona Mejía [7].

Tabla 2.19. Ciclo de prensado.

<b>Presión [kg/cm<sup>2</sup>]</b>	<b>Tiempo [min]</b>	<b>Tiempo sumado [min]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>
180,00	3,00	3,00	120 - 140
120,00	3,00	6,00	
60,00	3,00	9,00	
10,00	10,00	19,00	

(Fuente: Propia)

El ciclo se estableció con presiones que disminuyen de un valor máximo a un mínimo para darle al tablero el espesor requerido. El tiempo total de prensado fue de 19 min, tiempo que fue suficiente para que fragüe el adhesivo, penetrando el calor hasta el centro del tablero. En la Figura 2.23, se puede observar el ciclo de prensado con las diferentes presiones empleadas y sus respectivos tiempos de duración. Para el prensado de los tableros se utilizó la prensa hidráulica calefactora del Laboratorio de Operaciones Unitarias que se observa en la Figura 2.24.

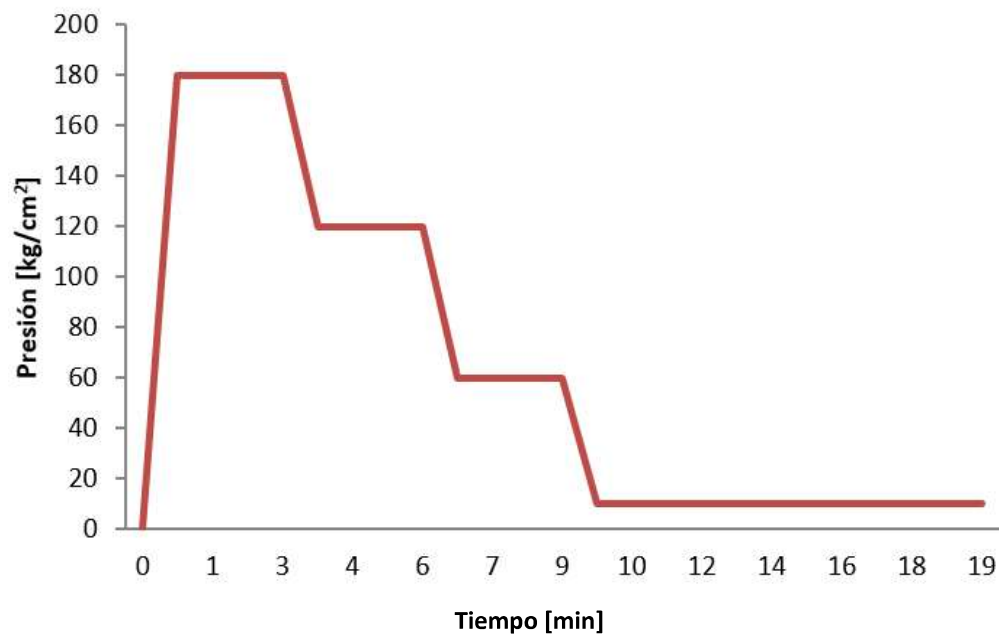


Figura 2.23. Diagrama del ciclo de presando.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.24. Prensado de los tableros.  
(Fuente: Propia)

#### **2.1.6.4. Desmolde de los tableros**

Para esta etapa el molde debía estar frío para tener una mejor maniobrabilidad del mismo. Se procedía a retirar la tapa superior y colocarlo en posición vertical para con ayuda de una espátula extraer el tablero del molde, concluyendo la elaboración del producto aglomerado como se ve en la Figura 2.25.



Figura 2.25. Tablero aglomerado.

(Fuente: Propia)

## **2.2. Caracterización física y mecánica de las probetas**

Para los ensayos de flexión, tracción paralela y perpendicular (cohesión interna) y dureza, se utilizó la norma ASTM D 1037-12 “Métodos de prueba estándar para evaluar las propiedades para materiales a base de fibra de madera y paneles de partículas”.

Los ensayos arriba mencionados se realizaron en la máquina universal de ensayos que se encuentra en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

### **2.2.1. Flexión estática**

Para realizar el ensayo de resistencia a la flexión estática se empleó un sistema de flexión de tres puntos. La probeta se evalúa como una viga simplemente apoyada con una carga puntual en el centro. Las dimensiones de las probetas para este ensayo según la norma utilizada son de 76 mm de ancho y 266 mm de longitud (Apartado número 9,2 de la norma ASTM D 1037-12).

Se fijaron los parámetros en la máquina universal de ensayos y para calcular la velocidad del cabezal móvil se utilizó la ecuación 2.3, una vez realizado el cálculo respectivo se obtuvo una velocidad de 4,32 mm/min. La distancia entre los apoyos donde se colocaron las probetas fue de 216 mm, adicionalmente los apoyos debían tener un diámetro de redondeo mínimo de 13,5 mm. (Apartado número 9,3 de la norma ASTM D 1037-12)

$$N = \frac{zL^2}{6d}$$

Ecuación 2.3. Cálculo de la velocidad del cabezal.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

N: velocidad del cabezal [mm/min].

z: 0.005 [mm/mm/min].

L: distancia entre apoyos [mm].

d: espesor de la probeta [mm].

Una vez verificadas todas las condiciones se centró la probeta entre los apoyos como se muestra en la Figura 2.26. La carga se aplicó hasta que se produzca la primera falla en el material. En la Figura 2.27, se pueden observar las 5 probetas que fueron ensayadas para determinar la resistencia a la flexión del tablero T2 B, que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) con un 30% de adhesivo.



Figura 2.26. Ensayo de flexión estática.

(Fuente: Propia)



Figura 2.27. Probetas para el ensayo de flexión estática.

(Fuente: Propia)

### 2.2.1.1. Diagrama carga vs. deflexión

Los datos que se observaron en el ensayo de flexión estática son la carga máxima y la deflexión de la probeta en el primer fallo. Con los resultados que se obtuvieron de este ensayo se procedió a realizar el diagrama carga vs deflexión y se calcularon los módulos de ruptura (MOR) y de elasticidad (MOE).

### 2.2.1.2. Módulo de ruptura

El módulo de ruptura es la carga máxima que una probeta rectangular puede soportar en una prueba de flexión de 3 puntos hasta llegar a su primera falla.

Para determinar el módulo de ruptura se utilizó la siguiente ecuación.

$$R_b = \frac{3P_{\max}L}{2bd^2}$$

Ecuación 2.4. Módulo de ruptura.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

$R_b$ : módulo de ruptura [MPa].

$P_{\max}$ : carga máxima [N].

$L$ : amplitud de los apoyos [mm].

$b$ : ancho de la probeta [mm].

$d$ : espesor de la probeta [mm].

### 2.2.1.3. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad es una relación entre la carga aplicada y la deformación generada (ecuación 2.5). Para calcular el  $\Delta P/\Delta y$  se realizó una regresión lineal de la curva de carga vs deflexión entre el 10% y 40% de  $P_{\text{máx}}$  según recomienda la norma utilizada.

Para determinar el módulo de elasticidad se empleó la siguiente ecuación.

$$E = \frac{L^3}{4bd^3} \frac{\Delta P}{\Delta y}$$

Ecuación 2.5. Módulo de elasticidad.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

E: módulo de elasticidad [MPa].

L: amplitud de los apoyos [mm].

b: ancho de la probeta [mm].

d: espesor de la probeta [mm].

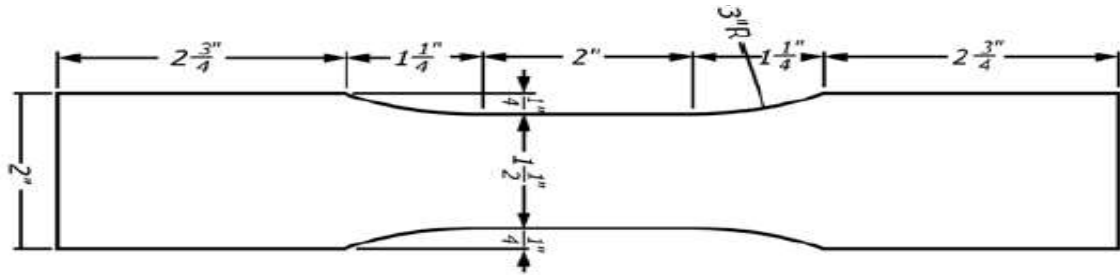
$\frac{\Delta P}{\Delta y}$ : pendiente de la curva carga vs deformación [N/mm].

### 2.2.2. Tracción paralela a la superficie

Se realizó el ensayo de tracción paralela a la superficie para medir la resistencia a la tracción en plano de la probeta. Las probetas que se utilizaron para este ensayo tenían que prepararse de acuerdo a las medidas que se muestran en la Figura 2.28, la sección reducida de las probetas se cortó con una sierra de banda como indica la norma.

El procedimiento que se siguió para este ensayo fue colocar la probeta en las empuñaduras de la máquina universal de ensayos (Figura 2.29). Las empuñaduras debían tener un área de 50 mm<sup>2</sup> mínimo para poder transmitir la carga desde la máquina a la muestra. La máquina universal se programó para que la cruceta móvil tenga una velocidad constante de 4 mm/min  $\pm$  50% la carga se aplicó continuamente hasta que se produjo la primera falla.

En caso de que la falla estuviera dentro de los 12 mm de cualquiera de las empuñaduras el valor de prueba sería descartado según menciona la norma utilizada. En la Figura 2.30, se pueden observar las 5 probetas que fueron ensayadas para determinar la tracción paralela a la superficie del tablero T3 B que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) y partículas grandes (tamiz # 14) con un 30% de adhesivo.



Equivalencias métricas

in	1/4	1	1 <sup>1</sup> / <sub>4</sub>	1 <sup>1</sup> / <sub>2</sub>	2	2 <sup>3</sup> / <sub>4</sub>	3	10
mm	6,00	25,40	32,00	38,00	51,00	70,00	76,00	254,00

Figura 2.28. Detalle de la probeta para la tracción paralela a superficie.

(Fuente: ASTM D1037-12)



Figura 2.29. Ensayo de tracción paralela a la superficie.

(Fuente: Propia)





Figura 2.30. Probetas para el ensayo de tracción paralela a la superficie.  
(Fuente: Propia)

Para calcular el esfuerzo de tracción máximo se utiliza la ecuación 2.6.

$$R_t = \frac{P_{max}}{bd}$$

Ecuación 2.6. Esfuerzo de tracción máximo  
(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

$R_t$ : esfuerzo a tracción máximo [MPa].

$P_{max}$ : carga máxima [N].

$b$ : ancho de la sección transversal reducida de la muestra [mm].

$d$ : espesor de la probeta [mm].

### 2.2.3. Tracción perpendicular a la superficie (Cohesión interna)

El ensayo de tracción perpendicular a la superficie se realizó con el objetivo de conocer la cohesión que tienen las partículas del aglomerado en la dirección perpendicular al plano del tablero. Las dimensiones de las probetas fueron de (50 x 50) mm, las mismas que fueron adheridas a los bloques de acero mediante un adhesivo epóxico marca Rally.

Para realizar este ensayo se usaron los accesorios que se encuentran enumerados en el apartado número 11 de la norma ASTM D 1037-12. Dichos accesorios debido a su forma y dimensiones tuvieron que ser fabricados en la Metalmecánica de San Bartolo de la Escuela Politécnica Nacional. Los accesorios que se fabricaron se acoplaron a la máquina de ensayos universales como se muestra en la Figura 2.31, los bloques de acero adheridos a las caras de la probeta se colocaron entre las dos mordazas como se observa en la Figura 2.32. La velocidad de la máquina universal de ensayos se programó para que el cabezal móvil baje 2 mm/min, separando los cabezales a una velocidad constante hasta que se produzca la falla en la probeta. La dirección de la carga debe ser lo más perpendicular posible a las caras de la probeta y el centro de carga debe pasar por el centro de la muestra.



Figura 2.31. Mordazas acopladas a la maquina de ensayos universales.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.32. Ensayo de tracción perpendicular a la superficie.  
(Fuente: Propia)

La cohesión interna de cada muestra, se calculó con la siguiente ecuación:

$$IB = \frac{P_{max}}{ab}$$

Ecuación 2.7. Cohesión Interna.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

a: ancho de la probeta medido en condición seca [mm].

b: longitud de la probeta medida en condición seca [mm].

Pmax: carga máxima [N].

IB: cohesión interna [MPa].

En la Figura 2.33 se puede observar el grupo de probetas que fueron ensayadas para determinar la cohesión interna del tablero T3 B que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) y partículas grandes (tamiz # 14) con un 30% de adhesivo PVA.



Figura 2.33. Grupo de probetas para el ensayo de tracción perpendicular a la superficie.

(Fuente: Propia)

#### 2.2.4. Ensayo de dureza

Para determinar la dureza del material se utilizó el ensayo de Janka-ball. Este ensayo constituye un método estándar que se utiliza en la industria para realizar una comparación de las diferentes maderas. Consiste en dejar una marca en la probeta ensayada al incrustar una esfera en ella y medir la fuerza necesaria para hacerlo. A través de este método se puede conocer la resistencia de la madera y saber cuál es más adecuada para cada uso, ya sea edificación, muebles o pisos.

Se prepararon las probetas para este ensayo con las siguientes dimensiones (76 x 152) mm, el espesor mínimo de las muestras según la norma debe ser de 25 mm, debido a que la mayoría de tableros en el mercado se fabrica en espesores menores a 25 mm se deben unir las capas que sean necesarias para cumplir con el espesor requerido.

El adhesivo que se debe utilizar para unir las capas, es una goma no sintética que no altere las propiedades de la muestra. En este estudio el espesor de los tableros fabricados de cuesco de palma y PVA son de 9 mm, razón por la cual se unió 3 capas de tablero con goma blanca para cumplir el espesor deseado.

Para realizar este ensayo se utilizó la máquina universal de ensayos; se colocó un acople como se observa en la Figura 2.34, que permite utilizar un indentador esférico de 11,33 mm de diámetro. El valor de la carga se registró una vez que penetró la mitad de la esfera del indentador en el material. Se realizaron dos indentaciones en cada cara teniendo un total de 4 indentaciones por probeta, la ubicación de los puntos de indentación debían estar al menos a 25 mm de los bordes y extremos de la muestra y lo suficientemente separados para que una indentación no afectara a la otra, la velocidad con la que se realizó el ensayo fue de 6 mm/min.



Figura 2.34. Ensayo de dureza Janka.

(Fuente: Propia)

Para evaluar la dureza de los tableros elaborados en este estudio, se ensayaron 5 probetas por cada tipo de tablero. En la Figura 2.35 se muestra el grupo de probetas que fueron ensayadas para determinar la dureza del tablero T1 B elaborado con partículas pequeñas (tamiz # 20) y partículas medianas (tamiz # 16) con un 30% de adhesivo.



Figura 2.35. Grupo de probetas para el ensayo de dureza.

(Fuente: Propia)

### 2.2.5. Densidad y gravedad específica (Densidad relativa)

Para el ensayo de gravedad específica y densidad se utilizó la norma ASTM D 2395 método A “Métodos de prueba estándar para densidad y gravedad específica (densidad relativa) de madera y materiales a base de madera.”

La norma ASTM D 1037-12 en la sección 8.3, establece que las probetas que se utilicen para determinar la densidad y gravedad específica deben tener una superficie de 58 cm<sup>2</sup>. La norma ASTM D 2395, no establece un número determinado de probetas que deben ser ensayadas, solo menciona que debe ser un número suficiente de probetas para realizar un análisis estadístico de los resultados. Es así que se decidió utilizar un total de 8 probetas para determinar la densidad, gravedad específica y contenido de humedad; las dimensiones de estas probetas y el procedimiento de los ensayos mencionados anteriormente es el mismo.

Las probetas fueron secadas en un horno de convección (Figura 2.36) a una temperatura de  $101 \pm 2^{\circ}\text{C}$ , el tiempo requerido en el horno fue función del equilibrio del peso de las probetas. Una vez que el peso de las probetas se estabilizó se procedió a tomar las medidas de ancho, largo y espesor de las probetas con un calibrador pie de rey (apreciación de 0,02 mm). Para determinar el peso de las probetas se utilizó una balanza marca ADAM PW 124 con una apreciación de 0,0001 g (Figura 2.37).



Figura 2.36. Horno de convección POL-EKO APARATURA.  
(Fuente: Propia)



Figura 2.37. Balanza marca ADAM PW 124.  
(Fuente: Propia)

Para determinar la densidad y gravedad específica de los tableros elaborados con cuesco de palma y adhesivo PVA, se ensayaron 8 probetas por cada tipo de tablero. En la Figura 2.38 se puede observar el grupo de probetas que fueron ensayadas para determinar la densidad y gravedad específica del tablero T2 A que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) con un 25% de adhesivo.



Figura 2.38. Grupo de probetas para el ensayo de contenido de humedad y densidad.  
(Fuente: Propia)

La ecuación 2.8, se utilizó para determinar la densidad y la ecuación 2.9 se utilizó para determinar la gravedad específica.

$$\rho_o = \frac{m_o}{V_o}$$

Ecuación 2.8. Densidad.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

$$S_o = \frac{Km_o}{V_o}$$

Ecuación 2.9. Gravedad específica.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

$\rho_o$ : densidad después del secado.

$m_o$ : masa de la probeta después del secado.

$V_o$ : volumen de la probeta después del secado.

$K$ : constante determinada por las unidades utilizadas para medir la masa y volumen  
1000 [mm<sup>3</sup>/g].

$S_o$ : gravedad específica después del secado.

### 2.2.6. Contenido de humedad

Para el ensayo de contenido de humedad se utilizó la norma ASTM D 4442 método B “Métodos de prueba estándar para medición directa del contenido de humedad de madera y materiales de madera.”

La norma ASTM D 4442 establece que para determinar el contenido de humedad en los tableros se debe ensayar un total 8 probetas. Las dimensiones de las probetas se encuentran en la norma ASTM D 1037-12 en la sección 8.4 y menciona que deben tener una superficie de 58 cm<sup>2</sup>.

Las probetas fueron secadas en un horno de convección de la marca POL-EKO APARATURA tipo SLN 115 STD a una temperatura de 101 ± 2°C, el tiempo requerido en el horno fue hasta que el peso de las probetas llegara a equilibrarse. Una vez que el peso de las probetas se estabilizó se procedió a determinarlo con una balanza marca ADAM PW 124 con una apreciación de 0,0001 g.

Para determinar el contenido de humedad se utiliza la siguiente expresión.

$$MC, \% = \frac{(A - B)}{B} \times 100$$

Ecuación 2.10. Contenido de Humedad.

(Fuente: Norma ASTM D1037-12)

Dónde:

MC, %(M): contenido de humedad [%].

A( $m_o$ ): masa inicial de la probeta [g].

B( $m_M$ ): masa de la probeta después del secado [g].



### 2.2.7. Determinación de absorción de agua e hinchamiento

Para realizar el ensayo de absorción de agua e hinchamiento se utilizaron probetas con las siguientes dimensiones (152 x 152) mm. Se midieron los espesores y se pesaron las probetas que posteriormente fueron sumergidas 25 mm por debajo del nivel del agua. La temperatura del agua que se utilizó para sumergir las probetas fue de 20°C que es lo que la norma ASTM D 1037-12 indica.

El procedimiento para realizar el ensayo tiene dos partes. Primero se sumergen las probetas durante un lapso de 2 h, se seca el exceso de agua e inmediatamente se pesa y se mide los espesores de las probetas. Posteriormente se vuelve a sumergir las probetas durante un lapso de 22 h repitiendo el proceso mencionado anteriormente.

Debido a que el adhesivo que se utilizó para fabricar los tableros aglomerados es soluble en agua, las probetas que se sumergieron en agua empezaron a deshacerse apenas se inició la prueba como se indica en la Figura 2.39, razón por la cual no se pudo realizar el ensayo de absorción de agua e hinchamiento.



Figura 2.39. Ensayo de absorción de agua e hinchamiento.

(Fuente: Propia)

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Caracterización mecánica de los tableros de partículas

De los datos que se obtuvieron de la caracterización mecánica se despreció una o dos probetas por cada ensayo, según fue necesario con el objetivo de obtener resultados válidos y sin dispersión.

##### 3.1.1. Flexión estática

##### 3.1.1.1. Comparación de los diagramas carga vs deflexión de los diferentes tipos de tableros

La Figura 3.1 muestra el diagrama carga vs. deflexión de los diferentes tipos de tableros elaborados con cuesco de palma y adhesivo PVA.

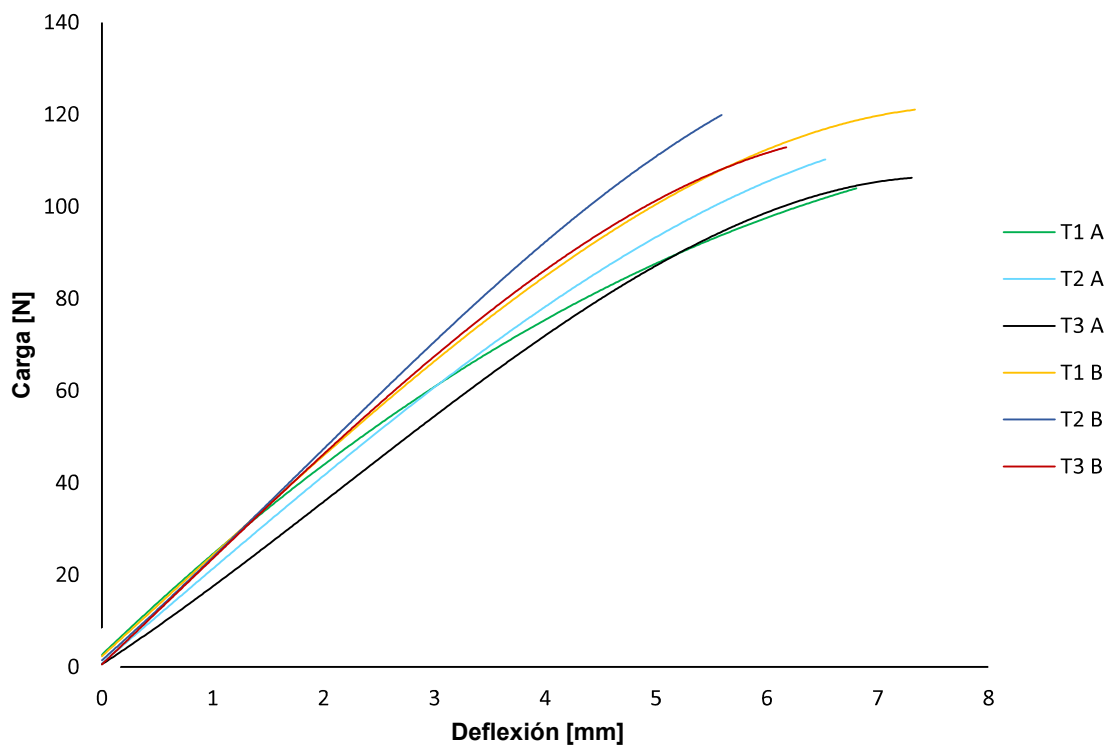


Figura 3.1. Diagrama carga vs. deflexión.  
(Fuente: Propia)

En la figura se observa que el tablero T1 B es el que presentó una mayor deflexión soportando más carga en comparación a los otros tableros fabricados para este estudio. Los tableros T2 B y T3 B son los que menor deflexión presentaron, este comportamiento fue debido a su alto módulo de elasticidad (MOE). Como mencionó Escobar [48] mientras mayor sea el valor del módulo de elasticidad más rígida será una madera.

### 3.1.1.2. Módulo de ruptura (MOR)

Para determinar el módulo de ruptura del tablero T1 A se ensayó un total de 5 probetas. De estas 5 probetas se eliminó 2 probetas, que fueron las que presentaron el mayor y menor módulo de ruptura. La eliminación de las dos probetas se realizó con el fin de obtener una mayor homogeneidad en los datos. Con los valores del módulo de ruptura de las tres probetas restantes se calculó un valor promedio de módulo de ruptura. Este valor promedio sería el módulo de ruptura del tablero T1 A, el mismo procedimiento se realizó para el resto de tableros.

Los datos que se obtuvieron para determinar el módulo de ruptura de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo III. En la Tabla 3.1, se presenta un resumen de los resultados del módulo de ruptura de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.1. Resumen de los resultados que se obtuvieron del módulo de ruptura de los tableros.

Tipo de tablero	T1 A	T2 A	T3 A	T1 B	T2 B	T3 B
<b>Probeta</b>	<b>Módulo de ruptura [MPa]</b>					
I	6,73	5,44	5,11	5,45	4,93	6,66
II	5,25	5,21	5,25	6,90	6,73	6,45
III	5,33	5,66	5,13	6,33	8,46	6,52
<b>Promedio</b>	5,77	5,44	5,16	6,23	6,70	6,54
<b>Desviación Estándar</b>	0,83	0,22	0,07	0,72	1,76	0,10
<b>Coefficiente de Variación</b>	14,44	4,09	1,50	11,67	26,29	1,58

(Fuente: Propia)

Los valores promedio del módulo de ruptura de cada tipo de tablero se muestran en la Tabla 3.2. Estos valores se evaluarón por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.2. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el MOR de los tableros fabricados para este estudio.

Tabla 3.2. Valores promedio del módulo de ruptura de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Módulo de ruptura [MPa]</b>
T1 A	5,77
T2 A	5,44
T3 A	5,16
T1 B	6,23
T2 B	6,70
T3 B	6,54

(Fuente: Propia)

De los tableros fabricados con un porcentaje del 25% de adhesivo, el tablero T1 A presentó el módulo de ruptura más alto mientras que el tablero T3 A, presentó el valor más bajo de MOR. Esto demostró que a medida que el tamaño de partícula aumentaba, el módulo de ruptura disminuía.

En la Figura 3.2 se observa que al haber aumentado el porcentaje de adhesivo del 25% al 30% incrementó el valor del MOR. Por ejemplo: el tablero T2 B presentó el mayor módulo de ruptura que fue 6,70 MPa, este valor fue un 18,89% mayor que el módulo de ruptura del tablero T2 A que fue elaborado con la misma combinación de partículas, pero con 25% de adhesivo.

El comportamiento del módulo de ruptura de los tableros elaborados para este estudio, fue igual al comportamiento del MOR de los tableros realizados para la investigación de Bazyar [49], por lo que se determinó que el aumento del MOR en flexión se debe a que cuando existía mayor cantidad de aglomerante se obtenía un mejor contacto entre las partículas y el adhesivo disminuyendo el volumen de espacios vacíos, razón por lo cual se transmitieron los esfuerzos de partícula a partícula de una manera más uniforme traduciéndolos en un aumento de la resistencia mecánica.

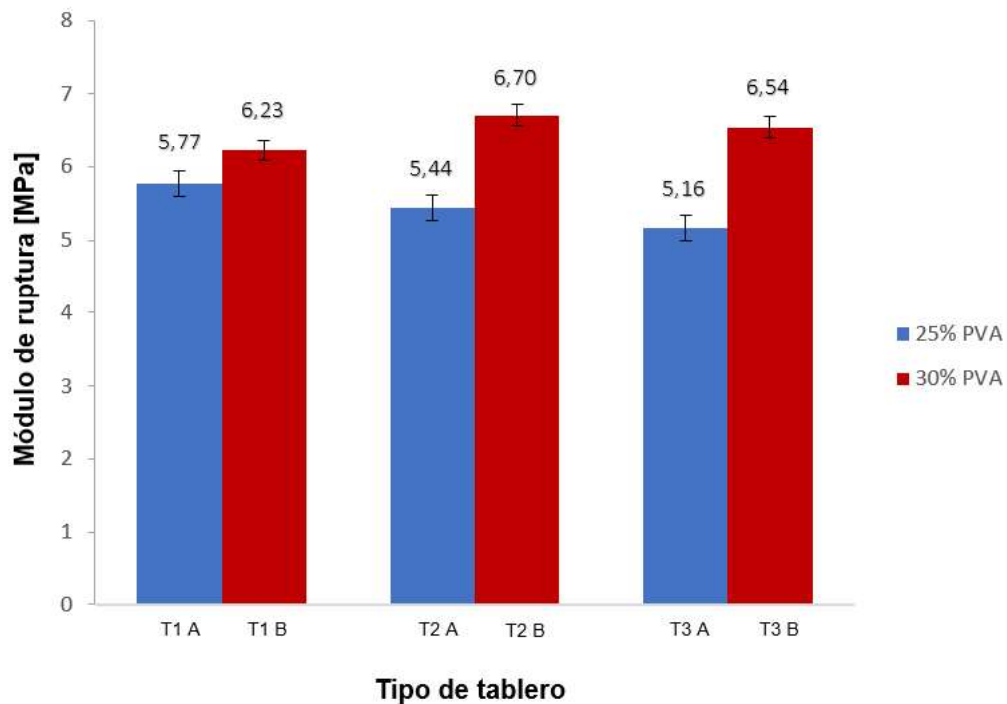


Figura 3.2. Efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el módulo de ruptura de los tableros aglomerados.

(Fuente: Propia)

### 3.1.1.3. Módulo de elasticidad (MOE)

En un ensayo de flexión, el módulo de elasticidad es la relación entre la carga aplicada y la deflexión unitaria en el rango elástico de la curva carga-deflexión del tablero aglomerado, en base al MOE se puede estimar la rigidez que tienen los tableros aglomerados.

Para el cálculo del módulo de elasticidad (MOE) se eliminó dos probetas, que fueron las que presentaron el mayor y menor módulo de elasticidad con el objetivo de tener homogeneidad en los datos. Con los valores del módulo de elasticidad de las tres probetas restantes se calculó su valor promedio que representa el módulo de elasticidad del tablero. Los datos que se obtuvieron para determinar el módulo de elasticidad de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo IV. En la Tabla 3.3, se presenta un resumen de los resultados del módulo de elasticidad (MOE) de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.3. Resumen de los resultados que se obtuvieron del módulo de elasticidad de los tableros.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>T1 A</b>	<b>T2 A</b>	<b>T3 A</b>	<b>T1 B</b>	<b>T2 B</b>	<b>T3 B</b>
<b>Probeta</b>	<b>Módulo de Elasticidad [MPa]</b>					
I	1034,54	841,00	947,42	880,59	966,30	1194,54
II	769,21	743,28	887,50	985,95	1217,28	1117,27
III	953,27	787,50	1171,08	980,48	1385,58	1209,42
<b>Promedio</b>	919,00	790,59	1002,00	949,01	1189,72	1173,74
<b>Desviación Estándar</b>	135,94	48,93	149,46	59,31	210,99	49,46
<b>Coefficiente de Variación</b>	14,79	6,18	14,91	6,25	17,73	4,21

(Fuente: Propia)

Los valores promedio del módulo de elasticidad de cada tipo de tablero se muestran en la Tabla 3.4. Estos valores se evaluarán por medio de un gráfico de barras (Figura 3.3). De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el módulo de elasticidad de los tableros aglomerados fabricados para este estudio.

Tabla 3.4. Valores promedio del módulo de elasticidad de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Módulo de elasticidad [MPa]</b>
T1 A	919,00
T2 A	790,59
T3 A	1002,00
T1 B	949,01
T2 B	1189,72
T3 B	1173,74

(Fuente: Propia)

En los tableros con 25% de adhesivo en su composición se observó, que el tablero T2 A elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) presentó el menor módulo de elasticidad (790,59 MPa) en comparación a los tableros T1 A y T3 A. Esto demostró que el módulo de elasticidad aumentaba cuando se combinaban diferentes tamaños de partículas.

Al observar el diagrama de barras en la Figura 3.3 se determinó que la variable más importante era el porcentaje de adhesivo, cuando se aumentó el porcentaje de adhesivo de un 25% a un 30% el módulo de elasticidad también incrementó su valor. Por ejemplo: el tablero T2 B presentó el mayor módulo de elasticidad que fue 1189,72 MPa, este valor fue un 33,54% mayor que el módulo de elasticidad del tablero T2 A que fue elaborado con la misma combinación de partículas con un 25% de adhesivo.

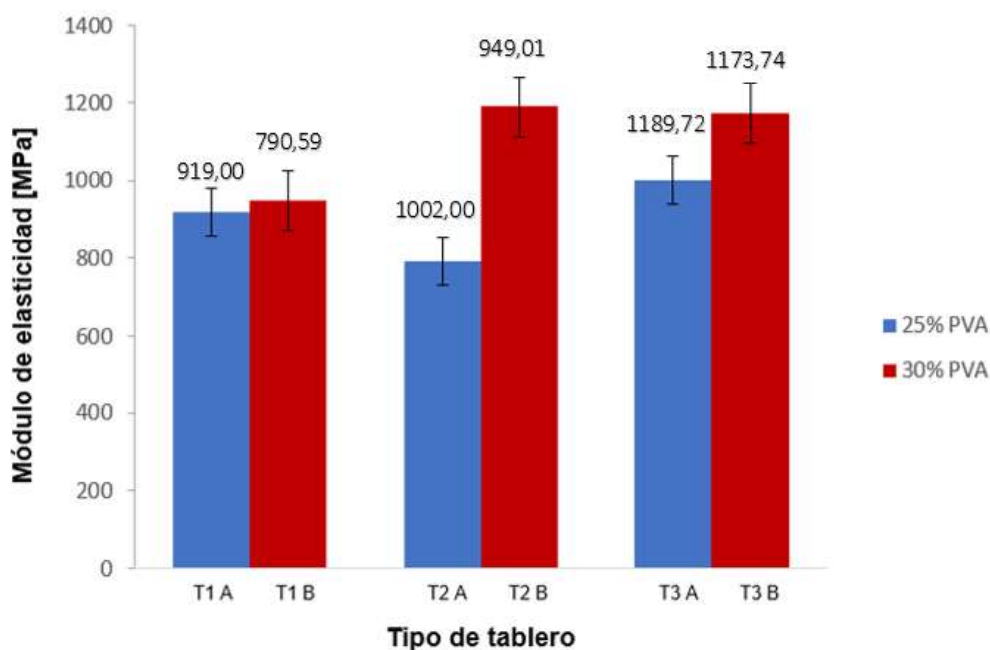


Figura 3.3. Efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el módulo de elasticidad de los tableros aglomerados.

(Fuente: Propia)

### 3.1.2. Tracción paralela a la superficie

Para el cálculo del esfuerzo máximo a tracción paralela se eliminó una probeta con el objetivo de tener homogeneidad en los datos. Con los valores del esfuerzo máximo a tracción paralela de las cuatro probetas restantes se calculó su valor promedio que representa el esfuerzo máximo a tracción paralela del tablero aglomerado.

Los datos que se obtuvieron para determinar el esfuerzo máximo de tracción paralela de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo V. En la Tabla 3.5, se presenta un resumen de los resultados del ensayo de tracción paralela a la superficie de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.5. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de tracción paralela a la superficie.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>T1 A</b>	<b>T2 A</b>	<b>T3 A</b>	<b>T1 B</b>	<b>T2 B</b>	<b>T3 B</b>
<b>Probeta</b>	<b>Esfuerzo máximo de tracción paralela Rt [MPa]</b>					
I	1,73	2,03	2,78	2,47	2,73	3,11
II	1,53	2,00	2,29	1,87	2,32	3,25
III	1,78	1,42	2,09	2,86	2,60	2,52
IV	1,81	1,61	2,31	-----	2,16	-----
<b>Promedio</b>	1,71	1,76	2,37	2,40	2,45	2,96
<b>Desviación Estándar</b>	0,12	0,30	0,29	0,50	0,25	0,38
<b>Coefficiente de Variación</b>	7,32	17,07	12,32	20,82	10,50	13,10

(Fuente: Propia)

Los valores promedio del esfuerzo máximo de tracción paralela de cada tipo de tablero se los presenta en la Tabla 3.6. Estos valores se evaluarán por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.4. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la tracción paralela de los tableros aglomerados fabricados para este estudio.

Tabla 3.6. Valores promedio de tracción paralela de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Esfuerzo Máximo de Tracción Paralela Rt [MPa]</b>
T1 A	1,71
T2 A	1,76
T3 A	2,37
T1 B	2,40
T2 B	2,45
T3 B	2,96

(Fuente: Propia)



Se observa en la Tabla 3.6 que la mayor resistencia a la tracción paralela (2,96 MPa) se obtuvo para las probetas del tablero T3 B que fue elaborado con una combinación de partículas medianas (tamiz # 16) y partículas grandes (tamiz # 14) con 30% de adhesivo. La menor resistencia a la tracción paralela (1,71 MPa) se obtuvo para las probetas del tablero T1 A que fue elaborado con una combinación de partículas pequeñas (tamiz # 20) y partículas medianas (tamiz # 16) con 25% de adhesivo.

En la Figura 3.4 se observa como el tamaño de partícula incide en la tracción paralela de los tableros elaborados con un 25% de adhesivo. El tablero T1 A presentó el valor más bajo de tracción paralela mientras que el tablero T3 A presentó el valor más alto de tracción paralela, esto indica que a medida que el tamaño de partícula aumenta, la tracción paralela también incrementa. La incidencia que tuvo el tamaño de partícula en la tracción paralela en los tableros elaborados con 30% de adhesivo fue la misma que en los tableros elaborados con 25% de adhesivo.

El diagrama de barras muestra que al aumentar el porcentaje de adhesivo en los tableros de 25% a 30%, la tracción paralela también incrementa su valor. Por ejemplo: el tablero T1 B presentó una tracción paralela de 2,40 MPa, este valor fue un 28,55% mayor que el valor de tracción paralela del tablero T1 A que fue elaborado con la misma combinación de partículas con un 25% de adhesivo.

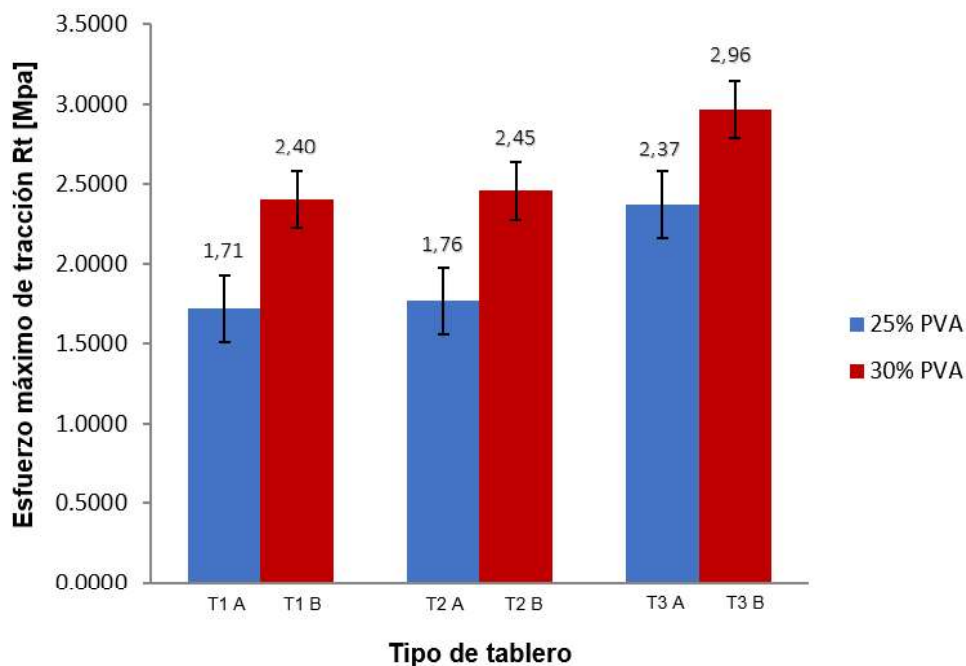


Figura 3.4. Efecto del tamaño de partícula y el adhesivo en la tracción paralela de los tableros.

(Fuente: Propia)

### 3.1.3. Tracción perpendicular a la superficie (Cohesión interna)

Se realizó el ensayo de tracción perpendicular para determinar la resistencia del tablero a la delaminación o separación de sus capas [50]. En la Figura 3.5 se puede observar los diferentes tipos de fallo que se pueden originar al realizar la prueba de cohesión interna [51].

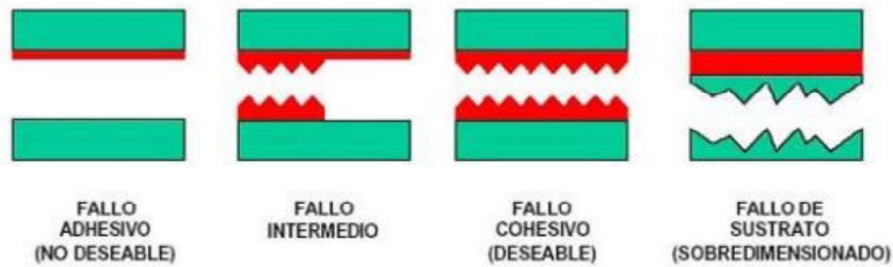


Figura 3.5. Tipos de fallo en el ensayo de tracción perpendicular.

(Fuente: Rodríguez, J; 2018)

En la Figura 3.6 se observa una de las probetas ensayadas para determinar la cohesión interna del material, la probeta ensayada tiene un fallo cohesivo (deseable). Este tipo de fallo es lo que se buscaba en este ensayo para que los resultados fueran válidos.

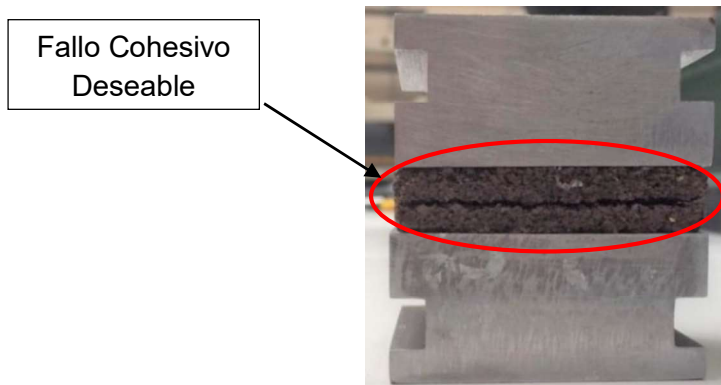


Figura 3.6. Probeta ensayada con un fallo cohesivo deseable.

(Fuente: Propia)

Para el cálculo de la tracción perpendicular se eliminó dos probetas, que fueron las que presentaron mayor y menor cohesión interna con el objetivo de tener homogeneidad en los datos. Con los valores de la tracción perpendicular de las tres probetas restantes se calculó el valor promedio que representa el esfuerzo máximo de tracción perpendicular del tablero aglomerado.

Los datos que se obtuvieron para determinar la tracción perpendicular de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo VI. En la Tabla 3.7, se presenta un resumen de los resultados del ensayo de tracción perpendicular de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.7. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de tracción perpendicular.

<b>Combinación de</b>	<b>T1 A</b>	<b>T2 A</b>	<b>T3 A</b>	<b>T1 B</b>	<b>T2 B</b>	<b>T3 B</b>
<b>Probeta</b>	<b>Tracción perpendicular IB [MPa]</b>					
I	0,44	1,01	0,93	0,79	1,61	2,00
II	0,60	1,06	1,25	1,27	1,13	2,17
III	0,94	1,54	1,49	1,05	1,22	2,16
<b>Promedio</b>	0,66	1,20	1,22	1,04	1,35	2,11
<b>Desviación Estándar</b>	0,25	0,29	0,27	0,24	0,22	0,09
<b>Coefficiente de Variación</b>	38,35	24,46	22,65	23,21	16,92	4,54

(Fuente: Propia)

En la Tabla 3.8 se observa los valores promedio de tracción perpendicular de cada tipo de tablero. Estos valores se evaluarán por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.7. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la tracción perpendicular de los tableros elaborados en este estudio.

Tabla 3.8. Valores promedio de tracción perpendicular de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Tracción Perpendicular IB [MPa]</b>
T1 A	0,66
T2 A	1,20
T3 A	1,22
T1 B	1,04
T2 B	1,35
T3 B	2,11

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.7 se observa como el tamaño de partícula incide en la tracción paralela de los tableros elaborados con 25% de adhesivo. El tablero T1 A presentó el valor más bajo (0,66 MPa) mientras que el tablero T3 A presentó el valor más alto (1,22 MPa), esto indica que a medida que el tamaño de partícula aumenta, la tracción paralela también aumenta. La incidencia del tamaño de partícula en la cohesión interna de los tableros elaborados con 30% de adhesivo es la misma que tuvieron los tableros elaborados con 25% de adhesivo.

El porcentaje de adhesivo también influyó en la tracción perpendicular a la superficie, se observó que al aumentar del 25% al 30% de adhesivo en el tablero mejoró la cohesión interna independientemente del tamaño de partícula utilizado en el tablero aglomerado. El aumento de cohesión interna se atribuyó a un mejor contacto entre las partículas y el adhesivo, además de una mejor distribución del aglomerante.

Los tableros elaborados para esta investigación, tuvieron una cohesión interna estaba dentro de los intervalos mencionados por Cai y Ross [50] de (0,31 a 1,17) MPa estos valores son para tableros de partículas de tipo industrial con densidad media. Se observa en la Figura 3.7, que los tableros T2 B y T3 B tuvieron una cohesión interna de 1,35 MPa y 2,11 MPa respectivamente, estos valores superaron los mencionados por Cai y Ross [50].

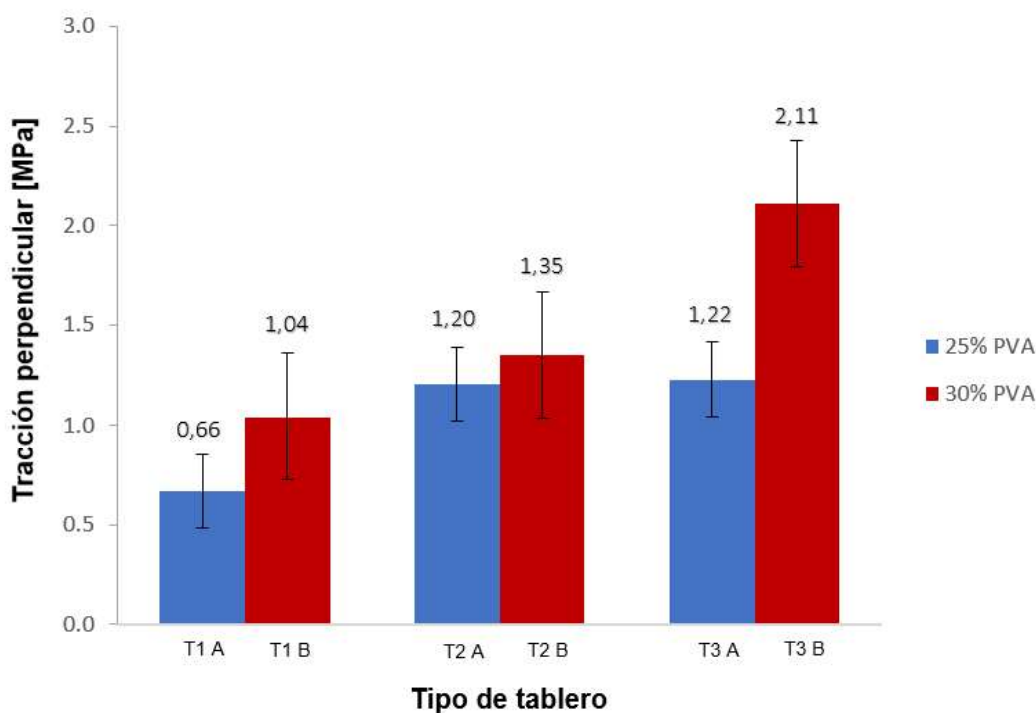


Figura 3.7. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la tracción perpendicular de los tableros.

(Fuente: Propia)

### 3.1.4. Ensayo de dureza Janka

Para el cálculo de la dureza se eliminó una probeta, con el objetivo de tener homogeneidad en los datos. Con los valores de la dureza de las cuatro probetas restantes se calculó el valor promedio que representa la dureza del tablero aglomerado.

Los datos que se obtuvieron para determinar la dureza de los diferentes tableros de cuesco y adhesivo PVA se pueden observar en el Anexo VII. En la Tabla 3.9, se presenta un resumen de los resultados de la dureza de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.9. Resumen de los resultados que se obtuvieron en el ensayo de dureza Janka.

Tipo de tablero	T1 A	T2 A	T3 A	T1 B	T2 B	T3 B
<b>Probeta</b>	<b>Carga máxima [N]</b>					
I	4567,90	4054,47	4830,20	4754,00	4305,80	4509,00
II	3933,25	4596,47	4255,62	5502,22	4593,45	4914,25
III	3988,05	4404,80	4924,47	5472,60	4565,65	4346,05
IV	4916,32	5185,32	5109,05	4807,35	5674,52	4543,82
<b>Promedio</b>	4351,38	4560,27	4779,84	5134,04	4784,86	4578,28
<b>Desviación Estándar</b>	589,93	763,05	592,99	842,50	718,02	403,61
<b>Coefficiente de Variación</b>	13,55	16,73	12,40	16,41	15,00	8,81

(Fuente: Propia)

Los valores promedio de la carga máxima que soportó cada tipo de tablero se presentan en la Tabla 3.10. Estos valores se evaluarán por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.8. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la dureza de los tableros aglomerados fabricados para este estudio.

Tabla 3.10. Valores promedio de la carga máxima de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Carga máxima promedio [N]</b>
T1 A	4351,38
T2 A	4560,27
T3 A	4779,84
T1 B	5134,04
T2 B	4784,86
T3 B	4578,28

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.8 se observa que la dureza de las probetas que tenían 25% de adhesivo, era mayor a medida que el tamaño de partícula aumentaba. Las probetas con 30% de adhesivo tuvieron un comportamiento contrario, a medida que aumentaba el tamaño de partícula, la dureza del material disminuía. El tamaño de partícula y la relación másica de aglomerante que se utilizó en la elaboración de tableros fueron los factores principales para que se hayan dado estos resultados.

Para los tableros que fueron elaborados con 25% de adhesivo se observó, que en el estudio elaborado por Rojas y Viejo [52] cuando realizaron la prueba de dureza en las probetas que tenían menos aglomerante era más probable que la huella de dureza haya penetrado exclusivamente en la partícula, sin alcanzar el aglomerante. Debido a esta afirmación se pudo conocer el motivo por que el tablero T3 A que tuvo en su composición partículas grandes (tamiz # 14) presentó mayor dureza con respecto a los tableros T1 A y T2 A.

Para los tableros que fueron elaborados con 30% de adhesivo cuando se evaluó su dureza (Figura 3.8), se pudo observar que el tablero T1 B presentó la mayor dureza (5134,04 N). Este valor de dureza fue un 15,24% mayor que la dureza del tablero T1 A que fue elaborado con la misma combinación de partículas, pero con 25% de adhesivo. El aumento de la dureza en el tablero T1 B se debió al tamaño de partícula que se utilizó y a la mayor cantidad de aglomerante que estaba presente en el tablero, al combinar partículas pequeñas (tamiz # 20) y partículas medianas (tamiz # 16) se disminuyó el volumen de espacios vacíos entre partículas y al aumentar la cantidad de aglomerante se logró una mejor cohesión entre las partículas dándole al material una mayor dureza.

Por los motivos explicados anteriormente se dedujo que el tablero T3 B que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) y partículas grandes (tamiz # 14) con 30% de adhesivo tenía un mayor volumen de espacios vacíos entre partículas, que se llenaron con aglomerante. Debido al aumento de relación másica del aglomerante fue más probable que la huella de dureza haya penetrado tanto en la partícula como en el aglomerante. De esta forma se pudo evidenciar que a medida que aumentaba el tamaño de partículas disminuía la dureza en los tableros.

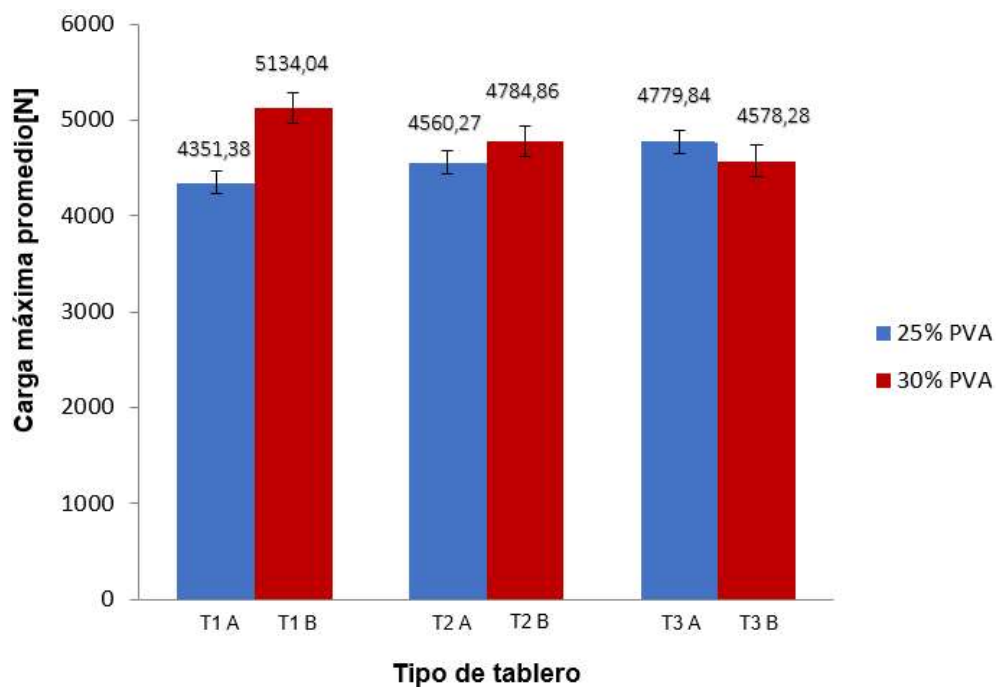


Figura 3.8. Efecto del tamaño de partícula y el adhesivo en la dureza de los tableros. (Fuente: Propia)

El valor mínimo de dureza entre todos los tipos de tableros fue de 4351,38 N, según la escala de valores para dureza Janka que se encuentra en la Tabla 3.11, indica que el material que se obtuvo fue “muy duro”, se infirió que esto se debía a que una de las principales características del cuesco es su alta dureza.

Tabla 3.11. Escala de valores para dureza Janka.

Clasificación	Dureza Janka
Muy blanda	< 150
Blanda	150 -350
Semidura	350-650
Dura	650-900
Muy dura	> 900

(Fuente: [53])

## 3.2. Caracterización física de los tableros de partículas

### 3.2.1. Densidad y gravedad específica

Con los valores de la densidad y la gravedad específica de las ocho probetas se calculó un valor promedio de densidad y gravedad específica. Estos valores promedio representan la densidad y la gravedad específica del tablero aglomerado. Los datos que se obtuvieron para determinar la densidad y la gravedad específica de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo VIII. En la Tabla 3.12, se presenta un resumen de los resultados de la densidad de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.12. Resumen de los resultados que se obtuvieron de densidad de los tableros.

Tipo de tablero	T1 A	T2 A	T3 A	T1 B	T2 B	T3 B
<b>Probeta</b>	<b>po Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>					
I	815,10	856,83	951,95	904,84	826,47	866,11
II	791,02	798,17	868,79	749,44	813,89	783,82
III	820,11	855,33	832,02	896,28	851,16	842,78
IV	817,48	711,44	818,26	757,70	783,34	835,35
V	854,71	849,87	842,26	879,84	836,69	853,41
VI	852,68	782,25	802,95	767,21	820,71	761,50
VII	846,95	805,48	840,37	840,97	806,21	829,40
VIII	801,81	800,86	776,51	837,94	774,92	785,84
<b>Promedio</b>	824,98	807,53	841,64	829,28	814,17	819,78
<b>Desviación Estándar</b>	23,90	48,57	52,48	63,60	25,70	37,76
<b>Coefficiente de Variación</b>	2,89	6,01	6,23	7,66	3,15	4,60

(Fuente: Propia)



Los valores promedio de la densidad de cada tipo de tablero se los presenta en la Tabla 3.13. Estos valores se evaluarón por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.10. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la densidad de los tableros aglomerados fabricados para este estudio.

Tabla 3.13. Valores promedio de densidad de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>po Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>
T1 A	824,98
T2 A	807,53
T3 A	841,64
T1 B	829,28
T2 B	814,17
T3 B	819,78

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.10 se observa que el tablero T3 A presentó la mayor densidad que fue 841,64 kg/m<sup>3</sup> y el tablero T2 A presentó la menor densidad que fue 807,53 kg/m<sup>3</sup>. Se comparó estos resultados con la densidad máxima (800 kg/m<sup>3</sup>), que deben tener los tableros de densidad media. El porcentaje de error fue de 4,94% y 0,93% respectivamente. Concluyendo que un error inferior al 5% puede considerarse despreciable. Con este análisis realizado se pudo concluir que los tableros de este estudio se podían catalogar como tableros de densidad media. En la Figura 3.9 se observa las barras de error porcentual de la densidad máxima y la densidad mínima de los tableros elaborados para esta investigación con respecto a la densidad máxima que deben tener los tableros de densidad media que es 800 kg/m<sup>3</sup>.

En la Figura 3.10 se observó que los tableros T2 A y T2 B presentaron las densidades más bajas 807,53 kg/m<sup>3</sup> y 814,17 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente mientras que los tableros T1 A, T3 A, T1B y T3B, presentaron una densidad mayor. Esto se debió principalmente a la combinación de partículas de diferente tamaño lo que ocasionó una disminución del volumen de espacios vacíos, generando una mayor compactación del tablero.

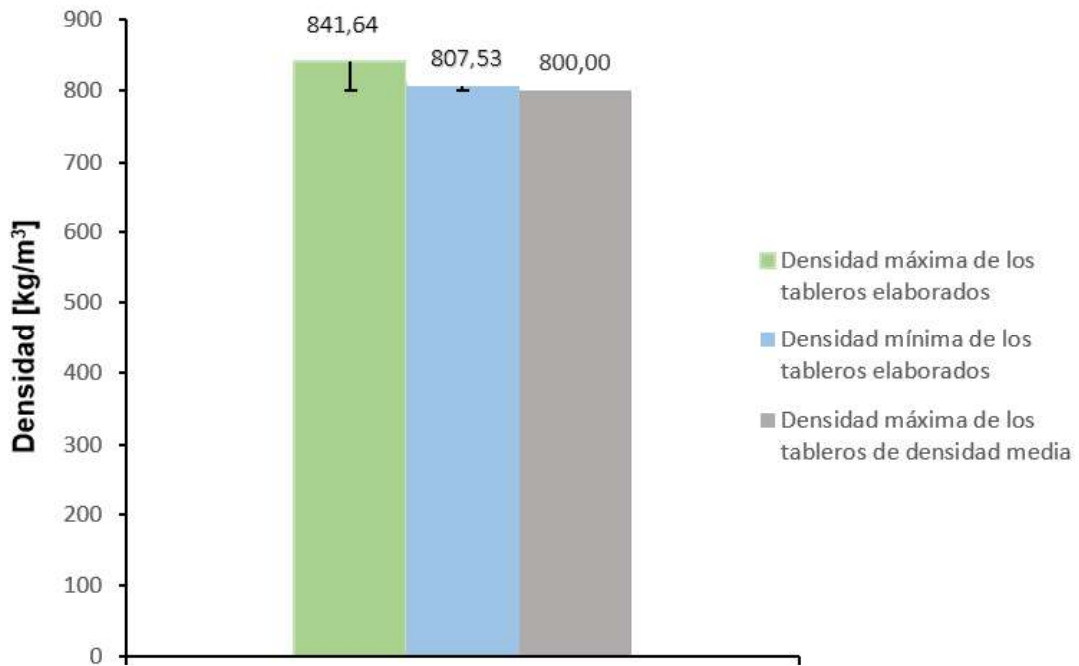


Figura 3.9. Barras de error porcentual de la densidad máxima y densidad mínima de los tableros elaborados con respecto a la densidad máxima que deben tener los tableros de densidad media.

(Fuente: Propia)

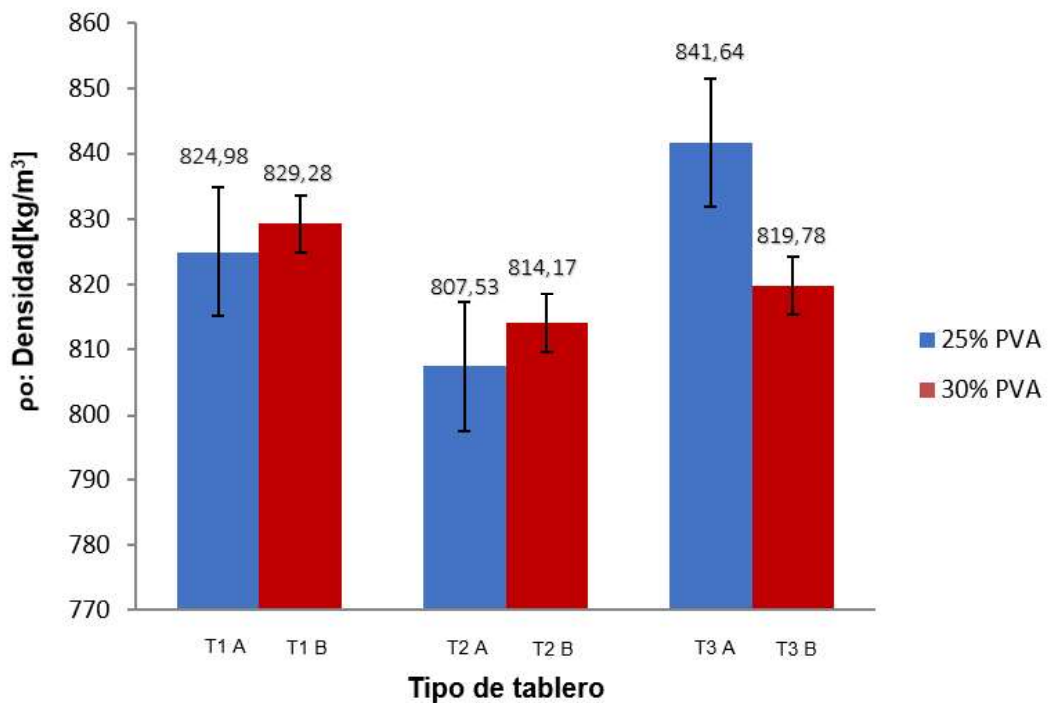


Figura 3.10. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en la densidad de los tableros aglomerados.

(Fuente: Propia)

### 3.2.2. Contenido de humedad

Con los valores del contenido de humedad que presentaron las ocho probetas se calculó un valor promedio de contenido de humedad. El valor promedio sería el contenido de humedad del tablero. Los datos que se obtuvieron para determinar el contenido de humedad de los diferentes tableros se pueden ver en el Anexo VIII. En la Tabla 3.14, se presenta un resumen de los resultados del contenido de humedad de los seis tipos de tableros elaborados para este estudio.

Tabla 3.14. Resumen de los resultados que se obtuvieron del contenido de humedad de los tableros.

Tipo de tablero	T1 A	T2 A	T3 A	T1 B	T2 B	T3 B
<b>Probeta</b>	<b>M Contenido de Humedad %</b>					
I	4,01	2,48	2,92	3,66	3,44	3,03
II	4,01	2,48	2,92	3,66	3,44	3,03
III	3,06	2,08	2,60	4,17	2,94	2,81
IV	3,06	2,08	2,60	4,17	2,94	2,81
V	3,21	2,73	2,82	4,06	2,56	3,17
VI	3,21	2,73	2,82	4,06	2,56	3,17
VII	2,98	2,34	3,08	4,86	3,12	3,58
VIII	2,98	2,34	3,08	4,86	3,12	3,58
<b>Promedio</b>	3,32	2,41	2,86	4,19	3,01	3,15
<b>Desviación Estándar</b>	0,44	0,25	0,18	0,46	0,33	0,29
<b>Coefficiente de Variación</b>	13,24	10,50	6,52	11,05	11,18	9,49

(Fuente: Propia)

Los valores promedio del contenido de humedad de cada tipo de tablero se presenta en la Tabla 3.15. Estos valores se evaluarán por medio del gráfico de barras que se observa en la Figura 3.11. De esta forma se determinó el efecto que tiene el tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el contenido de humedad de los tableros aglomerados fabricados para este estudio.

El contenido de humedad tiene una gran influencia sobre el peso de la madera y sus propiedades mecánicas, además de ser uno de los parámetros más importantes a considerar para los distintos propósitos en que será utilizada.

Tabla 3.15. Valores promedio del contenido de humedad de cada tipo de tablero.

<b>Tipo de tablero</b>	<b>Contenido Humedad</b> [%]
T1 A	3,32
T2 A	2,41
T3 A	2,86
T1 B	4,19
T2 B	3,01
T3 B	3,15

(Fuente: Propia)

En la Figura 3.11 se observó que los tableros T1 A y T1 B, presentaron los valores más altos de contenido de humedad. Este alto contenido de humedad se dio en los tableros que tenían en su estructura partículas pequeñas (tamiz # 20), estas partículas pequeñas no permitieron que el agua presente en el adhesivo se evaporara durante el proceso de prensado, quedando una mayor cantidad de humedad retenida en el tablero.

Al analizar los tableros elaborados con 25% de adhesivo se pudo observar que el tablero T2 A presentó el menor contenido de humedad en comparación a los tableros T1 A y T3 A. El mismo caso sucedió con los tableros elaborados con 30% de adhesivo, el tablero T2 B tenía el contenido de humedad más bajo que los tableros T2 A y T3 B. Esto indica que el contenido de humedad es menor cuando los tableros son elaborados con un mismo tamaño de partícula (tamiz # 16).

En el diagrama de barras de la Figura 3.11 se observa que las probetas que contenían 30% de adhesivo en su estructura, presentaban un aumento en el contenido de humedad en comparación a las probetas que tenían 25% de adhesivo en su estructura. El incremento de contenido de humedad se debía a que el aglomerante utilizado para la elaboración de tableros fue elaborado a base de agua, es decir que mientras mayor cantidad de aglomerante se haya utilizado en la fabricación de los tableros el contenido de humedad iba aumentar.

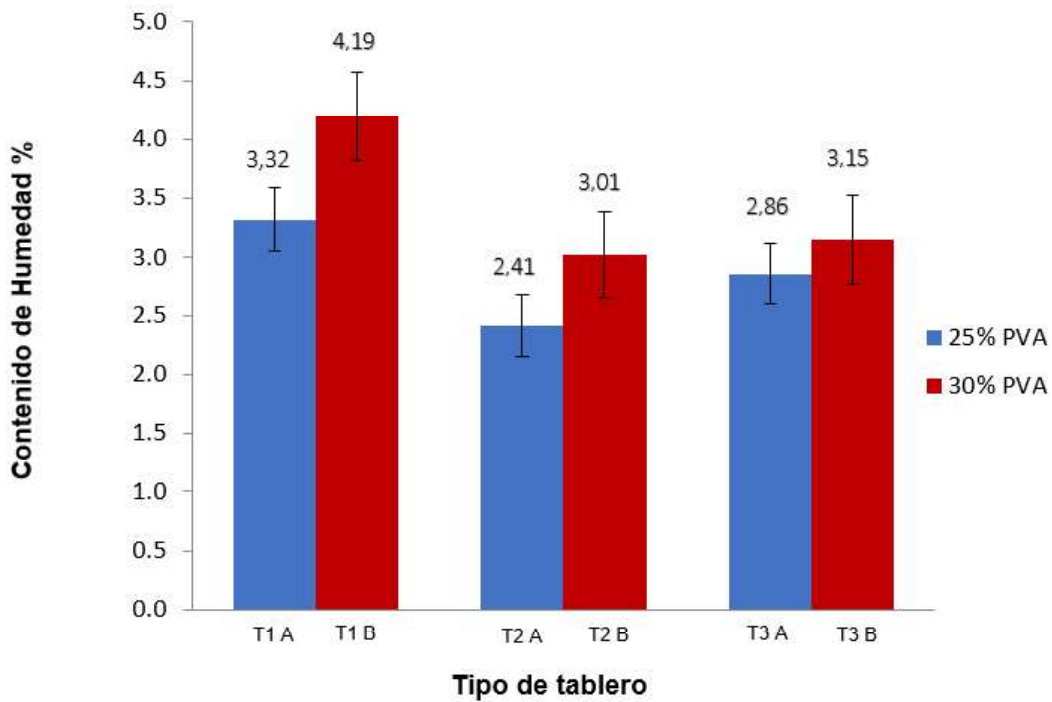


Figura 3.11. Efecto del tamaño de partícula y el porcentaje de adhesivo en el contenido de humedad de los tableros aglomerados

(Fuente: Propia)

### 3.3. Comparación de las propiedades de los tableros de partículas que se obtuvieron

En la Tabla 3.16, se presentan los datos del módulo de ruptura (MOR); módulo de elasticidad (MOE); tracción paralela a la superficie; tracción perpendicular a la superficie (cohesión interna); dureza; densidad y contenido de humedad de los diferentes tableros fabricados para este estudio.

En esta tabla se puede observar como las propiedades físicas incidieron en las propiedades mecánicas, de esta manera se determinó que composición de tablero presentó las mejores propiedades mecánicas y físicas, en función del tamaño de partícula y la relación másica del cuesco y adhesivo.

Tabla 3.16. Resumen de las propiedades obtenidas de los tableros elaborados.

Tipo de tablero	Módulo de Ruptura (Rb)	Módulo de Elasticidad (E)	Tracción Paralela (Rt)	Tracción Perpendicular (IB)	Dureza Janka	Densidad ( $\rho_0$ )	Contenido Humedad (M)
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[N]	[kg/m <sup>3</sup> ]	%
T1 A	5,77	919,00	1,71	0,66	4351,38	824,98	3,32
T2 A	5,44	790,59	1,76	1,20	4560,27	807,53	2,41
T3 A	5,16	1002,00	2,37	1,22	4779,84	841,64	2,86
T1 B	6,23	949,01	2,40	1,04	5134,04	829,28	4,19
T2 B	6,70	1189,72	2,45	1,35	4784,86	814,17	3,01
T3 B	6,54	1173,74	2,96	2,11	4578,28	819,78	3,15

(Fuente: Propia)

Tablero T2B seleccionado como el mejor tablero.

En la Tabla 3.16 se observa que al haber aumentado el porcentaje de adhesivo de 25% a 30% en la elaboración de los tableros, influyó de manera positiva en las propiedades mecánicas como: flexión, tracción paralela a la superficie, tracción perpendicular a la superficie y dureza, confirmando lo mencionado por Keil y Spavento [8]; “En la fabricación de tableros de partículas mientras mayor sea la cantidad de aglomerante que se utilice, tendrán una mayor resistencia mecánica”.

Al analizar los tableros elaborados con 25% de adhesivo se observó que el tablero T1 A presentó el mayor contenido de humedad en comparación a los tableros T2 A y T3 A. Al comparar los valores de resistencia mecánica se observó que el tablero T1 A, presentó una menor resistencia mecánica. Lo mismo sucede con los tableros elaborados con 30% de adhesivo, el tablero T1 B tenía el contenido de humedad más alto y presentó una menor resistencia mecánica, lo que indica que el contenido de humedad influye en las propiedades mecánicas.

El tamaño de partícula también influye en las propiedades mecánicas de los tableros; la tracción paralela y la tracción perpendicular tienen el mismo comportamiento, a medida que el tamaño aumentaba el material compuesto presenta un incremento en la resistencia a la tracción. Por este motivo el tamaño de partícula que se utilizó en la elaboración de los tableros de cuesco y adhesivo PVA fue una propiedad influyente en la resistencia a la tracción.

De los tableros elaborados para este estudio los que presentaron mejores propiedades mecánicas y físicas fueron aquellos que tenían mayor tamaño de partícula y mayor porcentaje de aglomerante. En los tableros aglomerados una de las propiedades más importantes es la de tracción perpendicular (cohesión interna). En la tabla 3.16 se puede observar que existen dos tableros que tuvieron los valores más altos de cohesión interna. El tablero T2 B tenía un valor de cohesión interna de 1,35 MPa y el tablero T3 B tenía un valor de cohesión interna de 2,11 MPa. El valor de cohesión interna del tablero T3 B superó hasta en cinco veces la cohesión interna de los tableros comerciales MDP de Edimca (0,40 MPa). El mejor tablero que se obtuvo en esta investigación en base a los resultados fue el tablero T2 B que fue elaborado con partículas medianas (tamiz #16) con 30% de adhesivo PVA. Este tablero presentó las mejores propiedades mecánicas en flexión, siendo el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad las características más importantes para determinar la aplicación de los tableros aglomerados, además el tablero T2 B presentó una alta cohesión interna, baja densidad y bajo contenido de humedad.

### 3.4. Comparación con la Norma INEN 3110

Los resultados que se obtuvieron del tablero T2 B se compararon con la norma INEN 3110 que establece los requisitos (propiedades mecánicas) para los tableros de partículas no revestidos por prensado plano o por cilindros. Se tomó en consideración que el procedimiento de evaluación para determinar las propiedades mecánicas que se aplica en la Norma INEN no es el mismo que se utilizó para este estudio. Por lo tanto, se realizó una comparación cuantitativa de los resultados de este estudio con la Norma INEN 3110.

Según la norma INEN 3110 los tableros de partículas pueden designarse como:

- P1 Tableros para utilización general en ambiente seco
- P2 Tableros para aplicaciones de interior (incluyendo mobiliario) en ambiente seco
- P3 Tableros no estructurales para utilización en ambiente húmedo
- P4 Tableros estructurales para utilización en ambiente seco
- P5 Tableros estructurales para utilización en ambiente húmedo
- P6 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente seco
- P7 Tableros estructurales de alta prestación para utilización en ambiente húmedo

(Fuente: INEN 3110:2016)

Los tipos P1 a P3 son para uso general, aplicación no estructural, los tipos P4 a P7 se destinan al cálculo y construcción de elementos de edificación estructurales o rigidizadores, los tableros elaborados para este estudio presentaron una baja resistencia al agua, además por los valores que se obtuvieron de los ensayos de flexión, los tableros no fueron comparados con tableros estructurales ni tableros que se utilicen en ambiente húmedo. Por estas razones los tableros elaborados en este estudio se compararon con tableros que se utilizan en ambiente seco como son los tableros tipo P1 y con tableros para aplicaciones de interior (incluyendo mobiliario) en ambiente seco como son los tableros tipo P2.

En la Tabla 3.17 se presentan los valores de resistencia a la flexión, módulo de elasticidad en flexión y tracción perpendicular de los tableros tipo P1 y tipo P2. En la norma INEN 3110, el método de ensayo EN 310 se utiliza determinar el módulo de ruptura y el módulo de elasticidad de los tableros. Mientras que el método de ensayo EN 319 se utiliza para determinar la tracción perpendicular de los tableros de madera.



Para conocer si los tableros elaborados en este estudio cumplían con los requisitos de la norma INEN 3110 y podían ser catalogados como tableros tipo P1 o tableros tipo P2, se seleccionó el tablero T2 B que presentó los valores más altos en el módulo de ruptura y en el módulo de elasticidad.

En la Tabla 3.18 se observan, los valores de módulo de ruptura, módulo de elasticidad y tracción perpendicular del tablero T2 B.

Tabla 3.17. Propiedades mecánicas de los tableros tipo (P1) y tipo (P2) INEN 3110.

Tablero Tipo	Espesor	Módulo de ruptura en	Módulo de elasticidad	Tracción perpendicular
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
P1	>6,00 a 13,00	10,50	-----	0,28
P2	>6 ,00 a 13,00	11,00	1800,00	0,40

(Fuente: Norma INEN 3110)

Tabla 3.18. Propiedades mecánicas del tablero T2 B.

Tablero Tipo	Espesor	Módulo de ruptura	Módulo de elasticidad	Tracción perpendicular
	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
T2 B	9,00	6,70	1189,72	1,35

(Fuente: Propia)

Al comparar los valores que se obtuvieron del tablero T2 B con los valores de los tableros tipo (P1) y tipo (P2) de la norma INEN 3110 se observó que:

- El valor del módulo de ruptura del tablero T2 B fue de 6,70 MPa. Este valor representó el 63,9% del valor del módulo de ruptura del tablero tipo P1 (10,5 MPa) y el 60,99% del valor de módulo de ruptura del tablero tipo P2 (11 MPa).
- El valor del módulo de elasticidad del tablero T2 B fue de 1189,72 MPa. Este valor representó el 66,09% del módulo de elasticidad del tablero tipo P2 que tiene un valor 1800 MPa.
- El valor de tracción perpendicular a la superficie del tablero T2 B fue de 1,35 MPa, Este valor representó el 482,14% del valor de tracción perpendicular del tablero tipo P1 (0,28 MPa) y el 337,50% del valor de tracción perpendicular del tablero tipo P2 (0,40 MPa).

Los tableros aglomerados elaborados para este estudio no cumplieron con los valores de módulo de ruptura en flexión y módulo de elasticidad en flexión que se mencionan en la norma INEN 3110 por lo tanto, no se pudieron catalogar como tableros tipo P1 ni tableros tipo P2.

### **3.5. Comparación de las propiedades con otras investigaciones**

Los resultados que se obtuvieron del tablero T2 B se compararon con otros estudios de elaboración y caracterización física y mecánica de tableros de partículas, teniendo en consideración que las condiciones de elaboración, materiales utilizados (tipos de partículas y adhesivos), concentraciones, procedimientos de fabricación y estándares de evaluación no fueron los mismos que se utilizó para este estudio. Por lo tanto, se realiza una comparación cuantitativa de los resultados de este estudio con las investigaciones de otros autores.

En el estudio de Lima et al [54] denominado "*Particleboard panels made from sugarcane bagasse*" evaluó las propiedades físicas y mecánicas de tableros producidos con bagazo de caña de azúcar y urea formaldehído siguiendo el estándar NBR 14810-3, la finalidad del estudio de Lima et al [54] fue investigar la posibilidad que su nuevo material se utilice en la producción de muebles, razón por la cual comparo sus resultados con tableros comerciales MDP (tablero de partículas de densidad media) hechos de pino y eucalipto.

Los tableros elaborados en el estudio de Lima et al [54] presentaron las siguientes propiedades físicas y mecánicas: densidad de 0,61 g/cm<sup>3</sup>; contenido de humedad de 9%; módulo de ruptura (MOR) de 15,30 MPa; módulo de elasticidad (MOE) de 2224,96 MPa; cohesión interna de 0,26 MPa y dureza Janka de 33,90 MPa.

El estudio de Mohd, M, et al [55] denominado "*Properties of particleboard made from rubberwood using modified starch as binder*" evaluó las propiedades físicas y mecánicas de tableros de partículas hechos de madera de caucho (*Hevea brasiliensis*) con almidón modificado como aglutinante. Los tableros se fabricaron con 15% de almidón de maíz modificado con glutaraldehído y se caracterizaron sus propiedades según el estándar japonés. Los tableros se obtuvieron por termocompresión con una presión de 5 MPa y una temperatura de 165°C durante 20 min.

Se elaboraron tableros con las siguientes densidades teóricas: 0,60 g/cm<sup>3</sup>; 0,70 g/cm<sup>3</sup> y 0,80 g/cm<sup>3</sup>. El tablero que tiene una densidad teórica de 0,80 g/cm<sup>3</sup> presentó las siguientes propiedades físicas y mecánicas: densidad real de 0,78 g/cm<sup>3</sup>; módulo de ruptura (MOR) de 20,38 MPa; módulo de elasticidad (MOE) de 3540,97 MPa y cohesión interna de 1,02 MPa. Este tablero se seleccionó para realizar la comparación con el tablero T2 B debido a que tiene una densidad similar.

En la tabla 3.19 se muestran las características obtenidas del tablero T2 B que fue elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) de cuesco con 30% adhesivo PVA y los resultados de los otros autores.

Tabla 3.19. Comparación de las propiedades físicas y mecánicas del tablero T2B con otras investigaciones.

Propiedad Autor	Densidad	Contenido de humedad	Módulo de ruptura (MOR)	Módulo de elasticidad (MOE)	Cohesión Interna	Dureza Janka
	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Tablero T2B	0,81	3,01	6,70	1189,72	1,35	47,84
Lima, S et al.	0,61	9,00	15,30	2294,60	0,26	33,90
Mohd, M et al.	0,78	-----	20,38	3540,97	1,02	-----

(Fuente: Propia)

Se observó que los resultados de Lima et al [54] superaron los valores del tablero T2 B en el módulo de ruptura, módulo de elasticidad y contenido de humedad en un 56,20%; 48,15% y 66,55% respectivamente. Mientras que el tablero T2B superó los valores de densidad, cohesión interna y dureza a los tableros de Lima et al. [54] en 24,69%; 80,74% y 29,13% correspondientemente.

Los resultados de esta investigación comparados con los de Mohd et al [55], presentaron valores de densidad y cohesión interna mayores en 4,17% y 24,58% respectivamente. Las propiedades de flexión de MOR y MOE que se obtuvieron por Mohd et al [55] fueron correspondientemente 67,12% y 66,40% mayores a los del tablero T2B.

## 4.CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Los objetivos planteados en este estudio se cumplieron con éxito, se logró la elaboración y caracterización de tableros de partículas con cuesco de palma africana y adhesivo biodegradable.
- Por medio del método de criterios ponderados se determinó que la matriz idónea para la elaboración de tableros con cuesco de palma es el alcohol polivinílico debido a su carácter biodegradable y a sus excelentes propiedades como adhesivo.
- El tamaño de partícula para la fabricación de tableros con cuesco y adhesivo biodegradable tenía que ser menor a 1,41 mm (tamiz # 14) para evitar la formación de una capa superficial de adhesivo en los tableros.
- La relación másica idónea para la elaboración de tableros fue de 70% de partículas y 30% de adhesivo, los tableros con esta relación másica presentaron mejores propiedades mecánicas.
- Los tableros aglomerados con cuesco tenían que ser prensados entre un rango de temperaturas de trabajo de 100°C a 150°C con el objetivo de que estos no queden crudos, y que el alcohol polivinílico no empiece a descomponerse.
- El tablero T2 B elaborado con partículas medianas (tamiz # 16) y 30% de adhesivo, presentó el 63,90% del valor del módulo de ruptura de los tableros comerciales tipo P1 y el 66,09% del valor del módulo de elasticidad de los tableros comerciales tipo P2.
- Al incrementar el porcentaje de adhesivo en la elaboración de los tableros, el comportamiento de las propiedades mecánicas mejoró en pruebas como: flexión, tracción paralela a la superficie, tracción perpendicular a la superficie y dureza.

- De los seis tipos de tableros realizados para este estudio, el tablero que presentó las mejores propiedades físicas y mecánicas que más se acercó a los valores del módulo de ruptura a la flexión, módulo de elasticidad en flexión, cohesión interna de los tableros comerciales tipo P1 y tipo P2 de acuerdo a la norma INEN 3110, fueron los tableros fabricados con partículas medianas (tamiz # 16) y 30% de adhesivo.

## **4.2. Recomendaciones**

- Para el proceso de mezclado de las partículas de cuesco con aglomerante se debe utilizar una mezcladora o un tambor rotatorio con sistema de aspersion con el fin de obtener una mezcla homogénea y que el adhesivo se esparza en todas las partículas.
- Se recomienda para el proceso de elaboración del adhesivo utilizar una mezcladora para obtener una mezcla homogénea de PVA en polvo y agua. Se debe mezclar en proporciones fijas para tener una viscosidad relativamente uniforme debido a que es un fluido no newtoniano reopéctico.
- Se podría experimentar con otro proceso de termo compresión variando presiones, temperaturas y tiempo de prensado, y ver la influencia de estas variables en el comportamiento de los materiales constituyentes y en las propiedades finales del material aglomerado.
- Para obtener una mejor vida útil en los tableros elaborados con cuesco de palma africana y PVA, no deben ser sometidos a ambientes húmedos debido que el PVA es un aglomerante de naturaleza hidrofílica.
- Implementar un recubrimiento o revestimiento al material aglomerado por una o ambas caras con resinas melamínicas con los siguientes objetivos:
  - Mejorar el acabado superficial y textura del tablero para que se pueda utilizar de una forma decorativa pues la melanina permite cualquier tipo de color y diseño.

- Al ser la melamina impermeable y cubrir con esta capa el tablero disminuye la probabilidad que el tablero tenga contacto con el agua, siendo más difícil que la humedad penetre en el material.
  - La superficie sería más fácil de limpiar con este recubrimiento y tiene la ventaja de ser antibacteriano.
- 
- Añadir al PVA un aditivo de tipo hidrofugante para minimizar la absorción de humedad en el material aglomerado, facilitando su aplicación en ambientes de interior húmedos con exposición ocasional a humedad.
  - El PVA es un adhesivo biodegradable por lo que se debería utilizar conjuntamente con un fungicida para evitar la proliferación de hongos.
  - Al ser el cuesco de origen biológico o natural y el PVA un compuesto biodegradable, se recomienda realizar un estudio de biodegradabilidad del material aglomerado.
  - Realizar un análisis de costos de los materiales constituyentes y el proceso de fabricación del material aglomerado para comparar con los precios de los tableros aglomerados de partículas existentes en el mercado, teniendo en cuenta que el costo aproximado de la tonelada de cuesco es 17 a 22 dólares americanos y el costo de un saco de 25 kg de PVA es de 75 dólares americanos

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] M. Vera, "Gestión de un sistema de control para la utilización del cuesco de la palma africana como parte de los áridos en la fabricación de hormigón compactado", Tesis de posgrado, Universidad Central Del Ecuador. Quito, Ecuador, 2016, pp. 2.
- [2] M. Domínguez y C. Londoño, "Elaboración de tableros aglomerados empleando diferentes formulaciones adhesivas a partir de proteína de soya", Tesis de pregrado, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 2014.
- [3] V. Guerrero, Ed., Nuevos Materiales: Aplicaciones Estructurales e Industriales. Quito, Ecuador: Editorial Imprefepp, 2011, pp. 29.
- [4] F. Calvo y J. Isac, "Introducción a la química de los polímeros biodegradables: una experiencia para alumnos de segundo ciclo de la ESO y Bachillerato," 2013, pp.39. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/272684275\\_Introduccion\\_a\\_la\\_quimica\\_de\\_los\\_polimeros\\_biodegradables\\_una\\_experiencia\\_para\\_alumnos\\_de\\_segundo\\_ciclo\\_de\\_la\\_ESO\\_y\\_Bachillerato](https://www.researchgate.net/publication/272684275_Introduccion_a_la_quimica_de_los_polimeros_biodegradables_una_experiencia_para_alumnos_de_segundo_ciclo_de_la_ESO_y_Bachillerato).
- [5] W. Callister, Materials Science and Engineering: An Introduction. 7ma. ed. Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc., 2007.
- [6] R. Costales, La industria de los productos aglomerados. Habana, Cuba: Editorial ICIDCA, 2013, pp. 5.
- [7] M. Mejía, "Elaboración de tableros aglomerados autoadheridos a partir de fibra de raquis de Palma Africana (*Elaeis guineensis* Jacq.)", Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador, 2012, pp.20.
- [8] D. Keil y E. Spavento, "Industria de Tableros de Partículas," 2009. [Online]. Available: [http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19385/mod\\_resource/content/1/INDUSTRIAS%20DE%20TABLEROS%20DE%20PART%C3%8DCULAS%202009.pdf](http://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/19385/mod_resource/content/1/INDUSTRIAS%20DE%20TABLEROS%20DE%20PART%C3%8DCULAS%202009.pdf).
- [9] AITIM, "TABLEROS DE PARTÍCULAS," 2011. [Online]. Available: AITIM Sitio web: [http://infomadera.net/uploads/productos/informacion\\_general\\_455\\_Tableros\\_PART%C3%8DCULAS\\_28.06.2011.pdf](http://infomadera.net/uploads/productos/informacion_general_455_Tableros_PART%C3%8DCULAS_28.06.2011.pdf).
- [10] A. Gaitán, G. Fonthal y H. Ariza, "Fabricación y propiedades físicas de aglomerados de *Pennisetum purpureum* schum, *Philodendron longirrhizum* y *Musa acuminata*", Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, pp.5, Ene-Mar. 2016.

- [11] E. Solano, "Proceso de producción de tableros aglomerados," 2015. [Online]. Available: <https://prezi.com/01ozg55hw0u9/proceso-de-produccion-de-tableros-aglomerado/>.
- [12] H. Maez, "Manual Técnico de Palma Africana," 2011. [Online]. Available: <http://www.coapalmaecara.com/files/02%20Botanica%20de%20Palma.pdf>.
- [13] S. Vásquez, "Una Historia sobre el grande de la Palma colombiana: Oleoflores," Universidad de los Andes Facultad de Administración, 2016. [Online]. Available: <https://agronegocios.uniandes.edu.co/2016/04/26/una-historia-sobre-el-grande-de-la-palma-colombiana-oleoflores/>.
- [14] Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias (INIAP). (s.f.), "Palma Africana," 12/02/2019. [Online]. Available: <http://www.iniap.gob.ec/pruebav3/palma-africana/>.
- [15] G. Quesada, "Cultivo e industria de la palma palma aceitera (*Elaeis guineensis*)," 25/02/2019, de Ministerio de Agricultura y Ganadería INTA. [Online]. Available: [http://www.mag.go.cr/biblioteca\\_virtual\\_ciencia/tec\\_palma.pdf](http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/tec_palma.pdf)
- [16] InfoAgro. (s.f.). El cultivo de la palma africana. 25/02/2019, de InfoAgro. [Online]. Available: [http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma\\_africana\\_aceitera\\_coroto\\_de\\_guinea\\_aabora.htm](http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_africana_aceitera_coroto_de_guinea_aabora.htm)
- [17] C. Borrero, "Cultivo de la palma de aceite," 2019. [Online]. Available: [http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma\\_aceite3.htm](http://www.infoagro.com/herbaceos/oleaginosas/palma_aceite3.htm)
- [18] Palma de Aceite. (s.f.). "Sitio de referencia sobre el cultivo de la palma de aceite," 27/10/2019, de Palma de aceite. [Online]. Available: <https://palmadeaceite.website/>
- [19] A. Granja, "Informe de calificación de riesgo tercer programa de papel comercial-extractora agrícola Rio Manso EXA S. A., de Class International Rating, 2018, pp. 25.[Online]. Available: [https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/sigcv/Opciones%20de%20Inversion/Renta%20Fija/Prospectos/Rio%20Manso%20Exa/Papel%20Comercial/Calific.%20\(3\)%20PC.%20Rio%20Manso%2010-12-18.pdf](https://www.bolsadevaloresguayaquil.com/sigcv/Opciones%20de%20Inversion/Renta%20Fija/Prospectos/Rio%20Manso%20Exa/Papel%20Comercial/Calific.%20(3)%20PC.%20Rio%20Manso%2010-12-18.pdf).
- [20] Ancupa. (s.f.). Palma la voz del palmicultor. 12/02/2019. [Online]. Available: <http://ancupa.com/wp-content/uploads/2018/06/PALMA-Abril ANCUPA .pdf>.
- [21] Danec, (2018). 15/02/2019, de Danec. [Online]. Available: <https://www.danec.com/extractoras/>.



- [22] J. Buzón, "Uso del Cuesco de la Palma Africana en la fabricación de Adoquines y Bloques de Mampostería", en LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, 2009, Sitio web: <http://www.laccei.org/LACCEI2009-Venezuela/p202.pdf>.
- [23] J. Álvarez, D. Nicolalde, "Impacto y potencialidades en la exportación de productos derivados de la palma con valor agregado del ecuador en el período 2010-2017", Tesis pregrado, Universidad Central Del Ecuador, Quito, Ecuador, 2018, pp.11.
- [24] J. Sierra, L. Sierra y J. Olivero, "Potencial económico de la palma aceitera (*Elaeis guineensis* Jacq)," de SciELO, 2017. [Online]. Available: <http://www.scielo.sa.cr/pdf/am/v28n2/43750618016.pdf>.
- [25] G. Rufino, "Determinación de mezclas de suelo estabilizado a partir de recursos de biomasa locales para mejorar la calidad de las viviendas construidas por la población del territorio de Uige," Angola, de SciELO, 2013. [Online]. Available: [https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-50732013000100004](https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732013000100004).
- [26] AEXPLAMA. (s.f). Cascarilla. 23/02/2019, de Asociación Ecuatoriana de Extractores de Palma y sus Derivados. [Online]. Available: <http://aexpalma.com/cascarilla/>
- [27] G. Gordillo, "Caracterización y comparación de adhesivos a base del vinil acetato pva-3025 y ea-8319 de la planta akzonobel Ecuador", Trabajo de grado para la obtención del título de ingeniera química, Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador, 2015, pp.6.
- [28] C. González, Anexo C: Polímeros biodegradables con aplicaciones en suturas quirúrgicas, 2004, pp. 27-31.
- [29] V. Alma, Obtención de un polímero biodegradable a partir de almidón de maíz. 1ª ed. San Salvador: ITCA Editores, 2015. pp. 21.
- [30] Plásticos hidrosolubles, "Plásticos solubles en agua Polivinil Alcohol PVOH," Revista de Plásticos Modernos, vol. 91, pp. 500, 2006. pág.500. [Online]. Available: [http://www.hidrosoluble.com/aplicacion/Revista\\_Plasticos\\_Modernos.pdf](http://www.hidrosoluble.com/aplicacion/Revista_Plasticos_Modernos.pdf).
- [31] Cosmos. (s.f.), "Alcohol de Polivinilo," 31/03/2019, de alcoholdepolivinilo.com [Online]. Available: <https://alcoholdepolivinilo.com/>
- [32] J. Pajak, M. Ziemski y B. Nowak, "Poly(vinyl alcohol)-biodegradable vinyl material," Faculty of Biology and Environmental Protection, 2010. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/289182668/PVA-Chemik>. CHEMIK 2010,64, 7-8,523-530.

- [33] M. Amann, O. Minge, "Biodegradability of Poly(vinyl acetate) and Related Polymers, 2012, pp. 155. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/287603466\\_Biodegradability\\_of\\_Polyvinyl\\_acetate\\_and\\_Related\\_Polymers](https://www.researchgate.net/publication/287603466_Biodegradability_of_Polyvinyl_acetate_and_Related_Polymers)´.
- [34] R.S. Fono-Tamo, O.O. Idowu, F.O. Koya, "Development of Pulverized Palm Kernel Shells Based Particleboard", International Journal of Material and Mechanical Engineering (IJMME), vol. 3, pp. 54, 2014
- [35] J. Sechage, D. Gómez, A. Meléndez, M. Mayorga, "Modelamiento matemático para la pirolisis del cuesco de palma aceitera", Ingenium, vol. 18, n.0 36, pp. 44 -56, junio de 2017
- [36] Alcopalma, "Palm Kernel Shell," de Alcopalma, 2018. [Online]. Available: <https://alcopalma.com/products-services/?lang=es>
- [37] F. Calero y L. Vásconez, "Desarrollo experimental de un aislante térmico utilizando cascarilla de arroz y aglutinantes naturales, en planchas rígidas", Tesis de pregrado, Escuela Politécnica del Ejército ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2012, pp. 40.
- [38] C. Riba. Diseño concurrente. Barcelona: Ediciones de la Universitat Politècnica de Catalunya, SL, 2002, pp. 60.
- [39] C. Tapia, "Elaboración de tableros de partícula fina a partir de residuos lignocelulósicos y resinas termoestables", Tesis de pregrado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2007, pp.64.
- [40] B. Buitrago, "Tableros de partículas de polvillo de aserrín reforzados con subproductos reciclados (TAR)". Informador Técnico, Colombia, Edición 76, 2012, pp. 84 – 92
- [41] K. Huilcapi, "Caracterización térmica de biomásas ecuatorianas en diferentes estados de compactación y humedad con vistas a su uso como asilamiento en viviendas", Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador, 2016, pp.58.
- [42] C. Nuñez, "En relación a los tamices normalizados," cenunez.com.ar, 2018. [Online]. Available: <http://www.cenunez.com.ar/archivos/55-Enrelacinalostamicesnormalizados.pdf>
- [43] L. Rangel, et al., "Propiedades de tableros aglomerados de partículas fabricados con madera de *Rucalyptus urophylla*", Maderas, Ciencia y tecnología 19(3): 373 – 386, 2017.
- [44] T. Ota y T. Okamoto, "Mechanical Properties of Particleboard Made from Rice Husk," Journal of Materials Science and Engineering, B 5 (7-8) (2015) 263-269.

- [45] H. Syed, et al., "Wood Adhesive from Crosslinked Poly(Vinyl Alcohol) and Partially Gelatinized Starch: Preparation and Properties," *Starch/Stärke* 51 (1999) Nr. 6, S. 225–229.
- [46] S. H. Imam et al., "Characterization of Biodegradable Composite Films Prepared from Blends of Poly(Vinyl Alcohol), Cornstarch, and Lignocellulosic Fiber," *Journal of Polymers and the Environment*, vol. 13, No. 1, pp. 47-55, January 2005.
- [47] Guochao Li et al., "Biodegradable Composites from Pinewood Sawdust and Polyvinyl Alcohol Adhesives," *Advanced Materials Research*, vol. 281, pp. 59-63, 2011.
- [48] O. Escobar, R. Rodríguez y J. Correa, *Conceptos básicos sobre la Resistencia de las maderas*, Antioquia, Colombia, 2015, pp.2.
- [49] B. Bazyar, *Particleboard made from Fast Growing Aspen Wood and Old Rail Road Ties*, Tehran, Iran, 2011.
- [50] Z. Cai y R. Ross, Mechanical properties of wood-based composite materials. In: R. J. Ross, ed. *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Centennial edition. General Technical Report FPL-GTR-190. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. Madison, Wisconsin, EUA. 12 p, 2010.
- [51] J. Rodríguez, "Ensayo de adherencia por tracción ("pull-off test"). Biodegradability of Poly(vinyl acetate)and Related Polymers," *MasScience*, 2018. [Online]. Available: <https://www.masscience.com/2018/08/10/ensayo-de-adherencia-por-tracción-pull-off-test/>.
- [52] L. Rojas y F. Viejo, *Obtención y Caracterización de materiales compactados a partir de cáscara de yuca para la fabricación de tableros de partículas*. Bucaramanga, Colombia, 2013, pp.4
- [53] J. De la Calle, "Análisis comparativo de diferentes métodos para la determinación de dureza en maderas," *Tesis de maestría*, Universidad de Valladolid, Palencia, España, 2013, pp. 15.
- [54] S. Lima, et al., "Particleboard Panels made from Sugarcane Bagasse: Characterization for Use in the Furniture Industry," *Materials Research*, 2016;19(4): 914-922.
- [55] M. Mohd, et al., "Properties of particleboard made from rubberwood using modified starch as binder". *Composites: Part B* 50(2013) 259-264.