



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DISEÑO DE FORMULACIÓN DE UN NUEVO COMPUESTO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC) Y  
RESIDUOS DE MADERA MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE ACEITE VEGETAL EPOXIDADO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE PISOS Y PERFILES**

**GONZÁLEZ CÓRDOVA, MARÍA DEL CISNE**

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA EN PETROQUÍMICA**

**Ph.D RODRÍGUEZ MAECKER, ROMAN NICOLAY**

**5 DE AGOSTO DEL 2020**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, ***“DISEÑO DE FORMULACIÓN DE UN NUEVO COMPUESTO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC) Y RESIDUOS DE MADERA MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE ACEITE VEGETAL EPOXIDADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PISOS Y PERFILES”*** fue realizado por la señorita ***González Córdova, María del Cisne***, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 05 de Agosto de 2020



Firmado electrónicamente por:  
ROMAN NICOLAY  
RODRIGUEZ  
MAECKER

Dr. Rer. Nat., Ph.D. Roman Nicolay Rodríguez Maecker

DIRECTOR

CC: 1712082120

## REPORTE URKUND

### Urkund Analysis Result

**Analysed Document:** TESIS - PETROQUIMICA - GONZALEZ MARIA.docx (D77336817)  
**Submitted:** 7/31/2020 2:49:00 AM  
**Submitted By:** terasalepou@gmail.com  
**Significance:** 2 %

#### Sources included in the report:

submission.pdf (D76181882)  
 TESIS-Alarcon-Santamaria.pdf (D45146766)  
 TESIS\_CRISTINA\_VILLACRESES\_URKUND (1).pdf (D65195455)  
 Tesis Francisco Malavé.docx (D36065937)  
 Tesis Vanessa Fuentes. ELABORACIÓN DE TABLEROS LIGNOCELULÓSICOS A BASE DE BAGAZO D  
 E CAÑA DE AZÚCAR Y PLÁSTICOS RECICLADOS (PET Y LDPE)." .docx (D77305620)  
 TESIS-  
 CARACTERIZACION MECANICA DEL COMPOSITE RESINA\_FOTOCURABLE\_UV\_ASTROCARYUM\_C  
 HAMBIRA.docx (D60285279)  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/14500/u753828.pdf?sequence=1>  
<https://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/7793/tmev.pdf?sequence=4&isAllowed=y>  
[https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/757/1/Mart%C3%ADnez-Encinas%20E%20G\\_MC\\_2016.docx](https://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1006/757/1/Mart%C3%ADnez-Encinas%20E%20G_MC_2016.docx)

#### Instances where selected sources appear:

21

*Revisado*



Verifique el estado de su documento por:  
**FORMA DIGITAL**  
 RECONOCIDA  
**RECONOCIDA**



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **González Córdova, María del Cisne**, portadora de la cédula de ciudadanía N° 050399601-9, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: ***“DISEÑO DE FORMULACIÓN DE UN NUEVO COMPUESTO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC) Y RESIDUOS DE MADERA MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE ACEITE VEGETAL EPOXIDADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PISOS Y PERFILES”*** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Latacunga, 05 de Agosto de 2020

González Córdova, María del Cisne

C.C.: 0503996019



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

AUTORIZACIÓN

Yo, **González Córdova, María del Cisne**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: ***“DISEÑO DE FORMULACIÓN DE UN NUEVO COMPUESTO DE POLICLORURO DE VINILO (PVC) Y RESIDUOS DE MADERA MEDIANTE LA INCORPORACIÓN DE ACEITE VEGETAL EPOXIDADO PARA LA PRODUCCIÓN DE PISOS Y PERFILES”*** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 05 de Agosto de 2020

González Córdova, María del Cisne

C.C.: 0503996019

**DEDICATORIA**

*A Dios.*

*A mi madre.*

## AGRADECIMIENTO

En primer lugar quiero agradecer a mi madre que es mi fortaleza y la persona más importante en mi vida, gracias por confiar en mí y apoyarme incondicionalmente, por sus esfuerzos para que pueda cumplir mis metas, este logro también es suyo.

A mi padre y a mis hermanos por estar presentes en todo momento demostrándome su cariño y apoyo.

Un agradecimiento especial a mi tutor el Dr. Román Rodríguez por ser mi guía, por motivarme e inspirarme en el desarrollo de este proyecto y en mi etapa universitaria. Gracias por los conocimientos y experiencias impartidas que cambiaron mi manera de pensar.

Al Ing. David Luna por estar presente en los momentos que más necesité, siempre con las palabras correctas.

Quiero agradecer al Ingeniero Manolo Holguín por confiar en mí desde que me conoció, por no dudar al permitirme realizar este proyecto en su empresa, brindándome su apoyo incondicional en todo momento.

Al ingeniero Francisco Holguín por estar pendiente del desarrollo del proyecto y por la confianza depositada en mí.

Al ingeniero Renato Noriega por la apertura y colaboración desinteresada, gracias por ser un buen amigo y por las experiencias compartidas.

Al ingeniero Juan Pablo por ayudarme a establecer mi tema de tesis y por la donación de los residuos de madera.

Al ingeniero Luis Chocho y todos los trabajadores de Holviplas por ayudarme en la ejecución del proyecto siempre con la mejor actitud.

Un inmenso agradecimiento a mi novio Cristian por motivarme todos los días a continuar a pesar de las adversidades, gracias por ser mi apoyo y por hacer de los momentos que compartimos juntos los mejores.

**ÍNDICE DE CONTENIDOS**

<b>CARÁTULA.....</b>	<b>1</b>
<b>CERTIFICACIÓN .....</b>	<b>2</b>
<b>REPORTE URKUND .....</b>	<b>3</b>
<b>AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD.....</b>	<b>4</b>
<b>AUTORIZACIÓN .....</b>	<b>5</b>
<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>6</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>ÍNDICE DE CONTENIDOS .....</b>	<b>9</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>17</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>19</b>
<b>ÍNDICE DE ABREVIATURAS.....</b>	<b>24</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>26</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>27</b>
<b>CAPÍTULO I .....</b>	<b>28</b>
<b>GENERALIDADES .....</b>	<b>28</b>
1.1. Introducción. ....	28
1.2. Planteamiento del problema de investigación. ....	31
1.3. Justificación e importancia. ....	33

	10
1.4. Objetivos.....	36
1.4.1. Objetivo general.....	36
1.4.2. Objetivos específicos.....	36
1.5. Variables dependientes e independientes.....	36
1.5.1. Variables dependientes.....	36
1.5.2. Variables independientes.....	37
1.6. Hipótesis.....	37
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>38</b>
<b>FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE .....</b>	<b>38</b>
2.1. Polímeros.....	38
2.1.1. Estructura esquelética.....	38
2.1.2. Homopolímeros y Copolímeros.....	39
2.1.2.1. Homopolímeros.....	39
2.1.2.2. Copolímeros. ....	40
2.1.3. Clasificación de los polímeros. ....	40
2.1.3.1. Termoplásticos. ....	40
2.1.3.2. Termoestables.....	40
2.1.3.3. Elastómeros.....	41
2.1.4. Procesos de polimerización.....	41
2.1.4.1. Polimerización de condensación o de reacción por etapas. ....	41

	11
2.1.4.2. Polimerización de adición o de reacción en cadena. ....	41
2.2. Policloruro de vinilo (PVC). ....	42
2.3. Madera. ....	43
2.3.1. Celulosa. ....	45
2.3.2. Hemicelulosa o poliosa. ....	46
2.3.3. Lignina. ....	46
2.4. Compuestos de plástico – madera (WPC). ....	47
2.5. Aditivos para la formulación de compuestos de PVC – madera (WPVC). ....	50
2.5.1. Lubricantes. ....	50
2.5.2. Estabilizantes térmicos. ....	51
2.5.3. Auxiliares de proceso. ....	51
2.5.4. Modificadores de impacto. ....	51
2.5.5. Estabilizantes UV. ....	52
2.5.6. Antioxidantes. ....	53
2.5.7. Pigmentos. ....	53
2.6. Agentes Espumantes. ....	53
2.6.1. Agentes espumantes físicos (PFA). ....	55
2.6.2. Agentes espumantes químicos (CFA). ....	55
2.6.2.1. Azodicarbonamida (AZDC). ....	55
2.7. Modificación de la interfaz matriz termoplástica – refuerzo de madera. ....	57

	12
2.7.1. Agentes de acoplamiento (CA).....	57
2.7.2. Aceites vegetales.....	60
2.7.3. Aceites vegetales epoxidados. ....	63
2.7.3.1. Aceite epoxidado de soya (ESO). ....	64
2.8. Procesos de producción de los WPC. ....	65
2.8.1. Proceso de extrusión.....	65
2.8.1.1. Extrusora de tornillo simple.....	66
2.8.1.2. Extrusora de doble tornillo contra-rotativo. ....	66
2.8.1.3. Extrusora de tornillo doble co-rotativo y tornillo simple de fusión en caliente. ....	67
2.8.1.4. WOODTRUDER™. ....	67
2.8.2. Operaciones de la unidad post-extrusora. ....	68
2.8.3. Moldeo por inyección. ....	68
2.9. Diseño experimental.....	69
2.9.1. Metodología de superficie de respuesta (RSM). ....	69
2.9.1.1. Diseño de Box-Behnken (BBD).....	71
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>73</b>
<b>METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL PROYECTO .....</b>	<b>73</b>
3.1. Equipos, materiales y reactivos. ....	73
3.1.1. Equipos.....	73

	13
3.1.2. Materiales. ....	74
3.1.3. Reactivos. ....	74
3.2. Recolección y determinación del contenido de humedad de la materia prima (Residuos de madera). ....	75
3.2.1. Recolección de los residuos de madera. ....	75
3.2.2. Determinación del contenido de humedad (%MC). ....	76
3.3. Análisis termogravimétrico (TGA) de los residuos de madera y azodicarbonamida. ....	77
3.3.1. Análisis termogravimétrico de los residuos de madera. ....	77
3.3.2. Análisis termogravimétrico de la azodicarbonamida (AZDC). ....	77
3.4. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC). ....	78
3.4.1. Desarrollo de formulación para la obtención del compuesto de PVC. ....	78
3.4.2. Proceso de mezcla. ....	80
3.4.3. Extrusión del compuesto de policloruro de vinilo. ....	81
3.5. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC) y residuos de madera mediante la incorporación de aceite vegetal epoxidado. ....	85
3.5.1. Diseño experimental para el desarrollo de la formulación del compuesto de PVC – madera. ....	85
3.5.2. Tratamiento de los residuos de madera. ....	87
3.5.3. Proceso de mezcla del PVC, residuos de madera y aditivos. ....	89
3.5.4. Proceso de extrusión de compuestos de PVC – madera. ....	89

	14
3.6. Propiedades físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera. ....	92
3.6.1. Densidad. ....	93
3.6.2. Compresión perpendicular a la dirección L. ....	95
3.6.3. Dureza. ....	96
3.6.4. Impacto. ....	97
3.7. Análisis ANOVA. ....	101
<b>CAPÍTULO IV</b> .....	<b>102</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIONES</b> .....	<b>102</b>
4.1. Contenido de humedad en los residuos de madera. ....	102
4.2. Análisis termogravimétrico (TGA) de los residuos de madera y AZDC. ....	103
4.2.1. Análisis TGA de los residuos de madera. ....	103
4.2.2. Análisis TGA de la azodicarbonamida. ....	104
4.3. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC). ....	106
4.4. Producción de los compuestos de PVC – madera. ....	107
4.4.1. Propiedades Físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera. ....	108
4.4.1.1. Densidad $g/cm^3$ . ....	108
4.4.1.2. Compresión. ....	110
a) Carga aplicada a la muestra para un desplazamiento de 0,5 y 1,00 mm. ....	110
b) Deformación de la muestra luego de la prueba de compresión. ....	113
4.4.1.3. Dureza. ....	115

	15
4.4.1.4. Impacto. ....	117
a) Energía de impacto.....	117
b) Profundidad de abolladura (d). ....	118
4.4.2. Selección de las variables de respuesta. ....	120
4.4.3. Estudio preliminar.....	122
4.5. Análisis Estadístico.....	123
4.5.1. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad $g/cm^3$ . ....	123
4.5.2. Análisis ANOVA para la deformación por compresión (mm).....	125
4.5.3. Análisis ANOVA para la dureza (Shore D). ....	127
4.5.4. Análisis ANOVA para la profundidad de abolladura (mm).....	129
4.6. Análisis de efectos estandarizados. ....	131
4.6.1. Análisis de efectos estandarizados para la densidad $g/cm^3$ . ....	131
4.6.2. Análisis de efectos estandarizados para la deformación por compresión (mm). ....	134
4.6.3. Análisis de efectos estandarizados para la dureza (Shore D). ....	136
4.6.4. Análisis de efectos estandarizados para la profundidad de abolladura (mm). ....	138
4.7. Análisis de la superficie de respuesta. ....	141
4.7.1. Análisis de la superficie de respuesta para la densidad $g/cm^3$ . ....	141
4.7.2. Análisis de la superficie de respuesta para la deformación por compresión (mm).....	144
4.7.3. Análisis de la superficie de respuesta para la dureza (Shore D). ....	146

4.7.4. Análisis de la superficie de respuesta para la profundidad de abolladura (mm).	148
4.8. Optimización de condiciones para la producción de compuestos de policloruro de vinilo (PVC) y residuos de madera .....	150
<b>CAPÍTULO V .....</b>	<b>152</b>
<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>152</b>
5.1. Conclusiones.....	152
5.2. Recomendaciones.....	154
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>155</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>166</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b> <i>Ventajas y desventajas de los WPC.</i> .....	49
<b>Tabla 2</b> <i>Clasificación de las espumas termoplásticas.</i> .....	54
<b>Tabla 3</b> <i>Clasificación de los agentes de acoplamiento.</i> .....	58
<b>Tabla 4</b> <i>Composición de ácidos grasos en aceites vegetales, expresado en: g ácido graso/100 g aceite vegetal.</i> .....	62
<b>Tabla 5</b> <i>Aditivos utilizados en el desarrollo de compuestos de PVC.</i> .....	79
<b>Tabla 6</b> <i>Condiciones de la extrusora en el procesamiento de compuestos de PVC.</i> .....	82
<b>Tabla 7</b> <i>Niveles de tratamiento para las variables independientes.</i> .....	86
<b>Tabla 8</b> <i>Diseño experimental Box-Behnken para la obtención del compuesto de PVC – madera.</i> .....	87
<b>Tabla 9</b> <i>Condiciones de la extrusora en el procesamiento de compuestos de PVC - madera.</i> .....	91
<b>Tabla 10</b> <i>Análisis estadístico de datos para el contenido de humedad de los residuos de madera.</i> .....	102
<b>Tabla 11</b> <i>Datos de la degradación térmica de los residuos de madera obtenidos de la curva TG.</i> .....	104
<b>Tabla 12</b> <i>Datos de la degradación térmica de la azodicarbonamida obtenidos de la curva TG.</i> .....	106
<b>Tabla 13</b> <i>Datos obtenidos en las pruebas realizadas al compuesto de PVC.</i> .....	107
<b>Tabla 14</b> <i>Análisis estadístico perteneciente a la densidad de los compuestos de PVC – madera.</i> .....	109
<b>Tabla 15</b> <i>Análisis estadístico correspondiente a la carga aplicada para comprimir 0,5 mm en los compuestos de PVC – madera.</i> .....	111

<b>Tabla 16</b> <i>Análisis estadístico correspondiente a la carga aplicada para comprimir 1,00 mm en los compuestos de PVC – madera.</i> .....	112
<b>Tabla 17</b> <i>Análisis estadístico para la deformación de las muestras luego de someterlas a la prueba de compresión.</i> .....	114
<b>Tabla 18</b> <i>Análisis estadístico para el ensayo de dureza.</i> .....	116
<b>Tabla 19</b> <i>Energía de impacto suministrada a cada muestra.</i> .....	118
<b>Tabla 20</b> <i>Análisis estadístico para la profundidad de abolladura.</i> .....	119
<b>Tabla 21</b> <i>Determinación de las variables de respuesta.</i> .....	121
<b>Tabla 22</b> <i>Niveles de tratamiento en las variables independientes correspondientes al estudio preliminar.</i> .....	122
<b>Tabla 23</b> <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad <math>g/cm^3</math>.</i> .....	124
<b>Tabla 24</b> <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la deformación por compresión (mm).</i> .....	126
<b>Tabla 25</b> <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la Dureza (Shore D).</i> .....	128
<b>Tabla 26</b> <i>Análisis de varianza (ANOVA) para la profundidad de abolladura (mm).</i> .....	130
<b>Tabla 27</b> <i>Puntos óptimos correspondientes a cada variable de respuesta.</i> .....	150

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Representación de estructuras esqueléticas de polímeros lineales, cíclicos, ramificados y de red. ....	39
<b>Figura 2</b> Monómero de cloruro de vinilo (cvm) (a), policloruro de vinilo (pvc) (b). ....	42
<b>Figura 3</b> Esquema de la estructura jerárquica de la madera blanda. ....	44
<b>Figura 4</b> Estructura molecular de la celulosa. ....	45
<b>Figura 5</b> Modelo estructural propuesto de lignina presente en la madera blanda. ....	47
<b>Figura 6</b> Estructura molecular de la AZDC. ....	56
<b>Figura 7</b> Estructura de la molécula de triglicérido. ....	61
<b>Figura 8</b> Epoxidación del aceite vegetal. ....	63
<b>Figura 9</b> Estructura molecular de un triglicérido de eso. ....	64
<b>Figura 10</b> Reacción del anillo oxirano con HCl. ....	65
<b>Figura 11</b> Esquema de una extrusora cónica doble tornillo. ....	67
<b>Figura 12</b> Equipo de moldeo por inyección. ....	69
<b>Figura 13</b> Perfiles de superficie de respuesta generados a partir de un modelo cuadrático en la optimización de dos variables, máximo dentro de la región experimental (a), meseta (b), máximo fuera de la región experimental (c), mínimo dentro de la región (d), superficie de silla de montar (e). ....	70
<b>Figura 14</b> Cubo que consiste en el punto central y puntos medios (a), tres diseños factoriales entrelazados $2^2$ y un punto central (b). ....	72
<b>Figura 15</b> Residuos de madera. ....	76
<b>Figura 16</b> Determinación del contenido de humedad en residuos de madera. ....	77

	20
<b>Figura 17</b> Mezcladora valtorta. ....	81
<b>Figura 18</b> Dimensiones de las muestras obtenidas en mm. ....	83
<b>Figura 19</b> Línea de producción de los compuestos de pvc - madera. tolva de alimentación (a), zonas de extrusión (b), sistema de vacío y enfriamiento (c), halador (d), mesa de recolección de perfiles (e), perfiles obtenidos (f). ....	84
<b>Figura 20</b> Residuos de madera triturados (a), incorporación del aceite epoxidado de soya y etanol (b), residuos de madera tratados (c). ....	89
<b>Figura 21</b> Determinación de densidad de las muestras de pvc – madera. ....	93
<b>Figura 22</b> Máquina universal de ensayos (a), ensayo de compresión (b), medida de la deformación final (c). ....	96
<b>Figura 23</b> Probeta (a), ensayo de dureza (b). ....	97
<b>Figura 24</b> Dispositivo de prueba de impacto por caída de peso, dispositivo diseñado en solidworks 2017 (a), dispositivo fabricado (b). ....	100
<b>Figura 25</b> Determinación del espesor (a), medida de la profundidad de abolladura producida por el impacto (b). ....	101
<b>Figura 26</b> Termograma perteneciente a los residuos de madera. ....	103
<b>Figura 27</b> Termograma perteneciente a la azodicarbonamida. ....	105
<b>Figura 28</b> Carga aplicada vs. desplazamiento de los compuestos de pvc – madera. ....	113
<b>Figura 29</b> Extrusión de compuesto de pvc – madera sin aceite epoxidado de soya. ....	123
<b>Figura 30</b> Gráfica de probabilidad normal para la densidad $g/cm^3$ . ....	132
<b>Figura 31</b> Diagrama de pareto estandarizada para la densidad $g/cm^3$ . ....	133
<b>Figura 32</b> Gráfica de efectos principales para la densidad $g/cm^3$ . ....	133
<b>Figura 33</b> Gráfica de probabilidad normal para la deformación por compresión (mm). ....	135

<b>Figura 34</b> <i>Diagrama de Pareto estandarizada para la deformación por compresión (mm).</i> .....	135
<b>Figura 35</b> <i>Gráfica de efectos principales para la deformación por compresión (mm).</i> .....	136
<b>Figura 36</b> <i>Gráfica de probabilidad normal para la dureza (shore d).</i> .....	137
<b>Figura 37</b> <i>Diagrama de Pareto estandarizada para la dureza (shore d).</i> .....	138
<b>Figura 38.</b> <i>Gráfica de efectos principales para la dureza (shore d).</i> .....	138
<b>Figura 39</b> <i>Gráfica de probabilidad normal para la profundidad de abolladura (mm).</i> .....	140
<b>Figura 40</b> <i>Diagrama de Pareto estandarizada para la profundidad de abolladura (mm).</i> .....	140
<b>Figura 41</b> <i>Gráfica de efectos principales para la profundidad de abolladura (mm).</i> .....	141
<b>Figura 42</b> <i>Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la densidad de los compuestos de pvc – madera</i> .....	143
<b>Figura 43</b> <i>Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la deformación por compresión de los compuestos de pvc – madera.</i> .....	145
<b>Figura 44</b> <i>Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la dureza de los compuestos de pvc – madera.</i> .....	147
<b>Figura 45</b> <i>Superficie de respuesta, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs.</i>	

*azodicarbonamida (c), sobre la profundidad de abolladura de los compuestos*

*de pvc – madera. .... 149*

**ÍNDICE DE ECUACIONES**

<b>Ecuación 1</b> Gravedad específica.....	94
<b>Ecuación 2</b> Densidad de la muestra. ....	94
<b>Ecuación 3</b> Energía de impacto. ....	99
<b>Ecuación 4</b> Altura de caída.....	99
<b>Ecuación 5</b> Modelo ajustado para la densidad $g/cm^3$ . ....	125
<b>Ecuación 6</b> Modelo ajustado para la deformación por compresión (mm). ....	127
<b>Ecuación 7</b> Modelo ajustado para la dureza (Shore D). ....	129
<b>Ecuación 8</b> Modelo ajustado para la profundidad de abolladura (mm). ....	131

## ÍNDICE DE ABREVIATURAS

**%MC.** Contenido de humedad.

**AZDC.** Azodicarbonamida.

**BBD.** Diseño Box-Behnken.

**CA.** Agentes de acoplamiento.

**CFA.** Agente espumante químico.

**$C_E$ .** Relación especificada entre la energía de impacto y el espesor de la probeta.

**CVM.** Monómero de cloruro de vinilo.

**$d$ .** Profundidad de abolladura.

**D.** Densidad.

**ECA.** Evaluación de cumplimiento ambiental.

**ESO.** Aceite epoxidado de soya.

**$g$ .** Aceleración debida a la gravedad.

**$h$ .** Espesor de la probeta.

**H.** Altura de caída del impactador.

**$m_d$ .** Masa del impactador para el cálculo de la altura de caída.

**PFA.** Agente espumante físico.

**Phr.** Partes por cien de resina.

**Phw.** Partes por cien de madera.

**PNUMA.** Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.

**PVC.** Policloruro de vinilo.

**RSM.** Metodología de superficie de respuesta.

**RPM.** Revoluciones por minuto.

**sp gr.** Gravedad específica.

**TAG.** Triacilglicerol.

**TCAC.** Tasa de crecimiento anual compuesto.

**TG.** Termogravimétrica.

**TGA.** Análisis termogravimétrico.

**WPC.** Compuesto de plástico – madera.

**WPVC.** Compuesto de policloruro de vinilo – madera.

## RESUMEN

Se obtuvo la fórmula adecuada para producir compuestos de PVC – madera por medio del proceso de extrusión, para lo cual se modificó químicamente a los residuos de madera con aceite epoxidado de soya, lo que mejoró la compatibilidad de la madera con el PVC, además se incluyó el agente químico azodicarbonamida a la formulación para disminuir la densidad de los compuestos, los tratamientos para el proceso se determinaron por medio de un diseño experimental de superficie de respuesta de tipo Box-Behnken, las variables independientes para la elaboración de compuestos de PVC – madera fueron: cantidad de residuos de madera, aceite epoxidado de soya y azodicarbonamida obteniéndose como cantidades óptimas: 18,94 phr, 35,35 phw y 0,20 phr, respectivamente, con estos parámetros se obtienen las mejores propiedades físicas y mecánicas en los compuestos, con valores de densidad:  $1,20 \frac{g}{cm^3}$ , una deformación por compresión de: 0,117 mm, dureza: 71,4 shore D y una profundidad de abolladura de: 5,828 mm. Los resultados experimentales indican que los compuestos de PVC – madera poseen propiedades superiores a los compuestos de PVC sin refuerzo, permitiendo su posterior uso como material estructural que requiere bajo mantenimiento y presenta menor impacto ambiental, lo que genera una gran oportunidad para el aprovechamiento de residuos a escala industrial.

### PALABRAS CLAVE:

- RESIDUOS DE MADERA
- ACEITE VEGETAL EPOXIDADO
- AZODICARBONAMIDA
- COMPUESTOS DE PVC – MADERA

## ABSTRACT

The formula appropriate was obtained to produce PVC – wood compounds by means of the extrusion process, for which the wood waste were chemically modified with epoxidized soybean oil to improve the compatibility of wood with PVC, also the chemical agent azodicarbonamide was included to the formulation to reduce the density of the compounds, the treatments for the process were determined through a response surface design experimental of Box – Behnken type, the independent variables for the PVC – wood compounds elaboration were: quantity of wood residues, epoxidized soybean oil and azodicarbonamide obtained as optimal quantities: 18,94 phr, 35,35 phw and 0,20 phr, respectively, with these parameters the best physical and mechanical properties are obtained in the compounds, with density values:  $1,20 \frac{g}{cm^3}$ , a compression deformation of: 0,117 mm, hardness: 71,4 shore D and a dent depth of: 5,828 mm. The experimental results indicate that PVC – wood compounds have superior properties to unreinforced PVC compounds, allowing its later use as a structural material that requires low maintenance and presents less environmental impact, which generates a great opportunity for the use of waste on an industrial scale.

### KEYWORDS:

- WASTE WOOD
- EPOXIDIZED VEGETABLE OIL
- AZODICARBONAMIDE
- PVC – WOOD COMPOUNDS

## CAPÍTULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1. Introducción.

El Policloruro de vinilo (PVC) a lo largo de los años ha desempeñado un papel muy importante en la industria termoplástica, es uno de los polímeros más producidos a nivel mundial a pesar de utilizar la mayor cantidad de aditivos en comparación con otros plásticos, es sintetizado a partir del monómero de cloruro de vinilo descubierto en 1835 por Liebig y su alumno Regnault. La polimerización del monómero inducida por luz se observó por primera vez en 1878 por Baumann pero años más tarde Klatté en su investigación describió la polimerización mediante oxígeno, además descubrió la procesabilidad del PVC bajo la influencia de presión y calor (Deutsches Kunststoff-Institut, 2001).

Al inicio del desarrollo de los plásticos, se pretendió abaratar costos y modificar las propiedades, en el siglo XX Baekeland inventor del primer plástico utilizó fibras de madera como refuerzo en la "baquelita". En los siglos XIX y XX los aglutinantes inorgánicos también fueron reforzados con fibras de madera (Stadlbauer, 2010). Las fibras naturales perdieron importancia con la aparición de las fibras minerales, como fibra de vidrio, carbonato de calcio, talco, micas, etcétera, debido a que presentan buena procesabilidad y excelentes propiedades mecánicas, no obstante el empleo de estas fibras ha sido muy criticado por su falta de degradación y la dificultad para separarlas de la matriz polimérica luego de su uso, esto limita el reciclaje de los compuestos generando graves problemas medioambientales (Djidjelli, Kaci, Martínez-Vega, &

Benachour, 2004). Por otra parte las fibras naturales en comparación con las fibras minerales presentan varias ventajas como: menor costo, mayor dureza, estabilidad dimensional, biodegradación, aislamiento acústico, menor densidad, menor irritación a la piel y a las vías respiratorias, y por último una mejor separación al concluir la vida útil de los compuestos (Xu, Wu, Lei, Yao, & Zhang, 2008).

En la década de 1970 se retomaron las fibras naturales vegetales como refuerzos en plásticos, conocidos como compuestos de plástico – madera (WPC por sus siglas en inglés), estos compuestos se originaron en Italia como un concepto moderno, dado que exhiben la ventaja estética de la madera y el procesamiento como material plástico. En el ámbito comercial, el grupo Ovattifici Riunitti (GOR) en 1972 produjo WPC con el nombre “Woodstock” para los carros Fiat, un año más tarde en Suecia Sonneson AB elaboró baldosas de PVC y fibra de madera. En la década de 1990 los WPC se popularizaron en América del Norte comenzando a utilizarse en paneles de decking y ya para inicios del siglo XXI se extendió a India, Singapur, Malasia, Japón y China (Ashori, 2008).

El desarrollo de WPC implica la interconexión de dos industrias muy diferentes como son la industria de productos forestales y la industria del plástico, por un lado las compañías de productos forestales encuentran a los plásticos como un material para realizar construcciones con ventajas que la madera no posee, como la resistencia a la humedad e insectos, mientras que las compañías de la industria plástica consideran a la madera como un material que puede reducir costos de resina además de incrementar rigidez a los productos (Patterson, 2001).

Existen varios motivos por los cuales los WPC están ganando terreno en los mercados globales, principalmente se debe a que son resistentes y más livianos en comparación a otros

metales (Dávila et al., 2011). Desde la aparición de los WPC se han realizado varias investigaciones, que incluyen: composición, optimización de los aditivos, interacción entre matriz – refuerzo y procesamiento (Kositchaiyong, Rosarpitak, Hamada, & Sombatsompop, 2014).

En la fabricación de WPC es primordial la utilización de agentes de acoplamiento, con la finalidad de generar unión entre la superficie de la madera y la superficie del termoplástico. Posiblemente Meyer (1968) fue el primero en sugerir el uso de un agente acoplante, llamándolo agente reticulador. En la década de 1980 se emitieron una serie de patentes para la aplicación de agentes acoplantes en los WPC utilizando isocianatos y anhídrido maleico (MA), más tarde se utilizaron silanos y óxido de propileno (PO) (Wu, Lu, & McNabb Jr, 2000). Entre los productos provenientes de recursos agrícolas, los aceites vegetales pueden ser materias primas útiles para el tratamiento de la madera en los WPC, lo que ha despertado un gran interés debido a ventajas como baja toxicidad, biodegradabilidad y bajo costo, industrialmente el aceite de soya es el más utilizado (Liu, Erhan, & Calvert, 2004).

Por otro lado, para reducir la densidad de los WPC se apunta al desarrollo de compuestos espumados o por medio del diseño de perfiles huecos, ofreciendo menores costos de procesamiento sin comprometer significativamente las propiedades, los polímeros espumados se producen utilizando un agente espumante físico o químico, también se utilizan partículas de polímero térmicamente expandibles con un líquido de hidrocarburo encapsulado, los WPC espumados son ampliamente utilizados en la industria aeroespacial y automotriz (Soares & Nachtigall, 2013).

En condiciones exteriores los parámetros que influyen en la durabilidad biológica de los WPC son: el contenido de madera, tipo de especies de madera y procesamiento del compuesto, con el aumento del contenido de madera la durabilidad disminuye, sin embargo los hongos no degradan al polímero puro, en general las especies de madera con mayor durabilidad también agregan mayor durabilidad al compuesto (Müller, Gellerich, Militz, & Krause, 2013).

Finalmente, el mercado global de los WPC está impulsado por la gran disponibilidad de residuos de madera y desechos plásticos, en 2016 este mercado se evaluó en \$2551 millones, se espera que para 2023 alcance los \$6584 millones con un TCAC del 12,6%. EEUU y Asia poseen el máximo crecimiento en los WPC debido a su gran demanda en el sector de la construcción y automotriz, la perspectiva es que Alemania, Francia y Reino Unido presenten una gran demanda de estos compuestos debido a las estrictas regulaciones en evaluación de cumplimiento ambiental (ECA) para componentes automotrices (Dwivedi, s. f.).

## **1.2. Planteamiento del problema de investigación.**

El Ecuador cuenta con una gran variedad de especies maderables tropicales que proceden de la Amazonía Ecuatoriana, actualmente el país posee 44000 km<sup>2</sup> de selva, consecuencia de un índice de deforestación del 4 % anual (Halberstadt, s. f.). La elaboración de muebles, pisos, puertas, ventanas, casas, etcétera, ha generado por varias décadas grandes cantidades de residuos de madera considerados inofensivos debido a su carácter natural pero cuyo problema es la disposición final de los mismos, como el relleno sanitario y la incineración descontrolada que produce gases y partículas contaminantes, causando graves problemas medioambientales.

Por otro lado, la producción en grandes cantidades y variedades de productos plásticos son plenamente reconocidos como un gran problema global de contaminación, la razón se debe a

que estos productos se han convertido en parte indispensable de nuestro estilo de vida y entorno, siendo utilizados y desechados al medio ambiente, al ser desechos no degradables contaminan grandes masas de tierra y volúmenes de agua, pero a su vez la eliminación por incineración produce aumento de dióxido de carbono y gases tóxicos (Liu, Erhan, Akin, & Barton, 2006). Aproximadamente, al año 100 millones de toneladas de plástico se incorporan en la naturaleza como contaminación terrestre y marina debido al mal manejo de los desechos (Telégrafo, s. f.). El PNUMA calcula que existen 18000 fragmentos de desechos plásticos flotando por cada kilómetro cuadrado de océano siendo incontable la cantidad de animales y aves que mueren por estrangulamiento, asfixia e inanición al ser atrapados entre estos desechos (Dávila et al., 2011).

Bajo este enfoque, como resultado del gradual aumento en la conciencia ambiental para promover la preservación y protección de la calidad del medio ambiente, existe la necesidad de nuevos materiales que presenten la funcionalidad y versatilidad de los plásticos convencionales y que incluyan materias primas renovables, como son los WPC formados por una matriz polimérica y harina o partículas de madera provenientes de desechos, estos compuestos resultan en una solución factible al desarrollar un producto rentable que presenta una combinación de interesantes propiedades mecánicas y físicas junto con un carácter sostenible. Los WPC están muy presentes en Europa y EEUU, mientras que a nivel nacional se desea incursionar en el mercado. Entre sus ventajas incluyen: la elaboración de productos con valor agregado a partir de residuos, biodegradabilidad, reciclabilidad, procesamiento amigable, buenas propiedades de aislamiento acústico y térmico, etc (Delgado Neira, 2003).

A pesar de las ventajas que presentan los WPC, existe limitación en la estabilidad térmica de la madera y una mala adhesión interfacial debido a la compatibilidad inherentemente baja entre

la matriz polimérica hidrófoba (baja tensión superficial) y el refuerzo de madera hidrofílica (alta tensión superficial), como consecuencia presentan propiedades mecánicas más débiles en comparación a los compuestos plásticos sin relleno lo que dificulta su uso como material estructural, por lo tanto es primordial el uso de agentes acoplantes y modificaciones químicas que bloqueen o minimicen los grupos  $-OH$  presentes en la madera, como consecuencia los enlaces de hidrógeno intermoleculares se reducen permitiendo que los residuos de madera se dispersen correctamente en los termoplásticos (Shah, Matuana, & Heiden, 2005). Respecto al procesamiento de los WPC los trabajos de investigación realizados se han enfocado en los procesos por compresión e inyección con menos énfasis en el proceso de extrusión, a pesar de ser el proceso más común para el desarrollo de estos compuestos.

Por lo anteriormente expuesto es de vital importancia desarrollar una alternativa económica y sostenible con el medio ambiente, como es la elaboración de compuestos de PVC – madera (WPVC, por sus siglas en inglés) que involucren materias primas recicladas, presenten un bajo costo de producción, tecnología ecológica, adhesión interfacial mejorada y que ofrezcan buenas propiedades mecánicas, lo que resulta en una transformación de la industria del plástico en el Ecuador.

### **1.3. Justificación e importancia.**

La contaminación originada por los desechos de la madera y los desperdicios de la industria plástica ha ocasionado a lo largo de los años una grave afectación ambiental, siendo este el principal argumento para desarrollar compuestos que involucren materiales de desechos y sean más amigables con el medio ambiente, a su vez reduzcan los costos de eliminación y aumenten los beneficios, tal es el caso de los WPC que presentan una tecnología moderna de polímeros

orientada al medio ambiente. Los WPC combinan las propiedades de los plásticos y la madera, presentando ventajas que incluyen alta rigidez y resistencia, bajo costo, biodegradabilidad, baja conductividad eléctrica, estabilidad térmica, reciclabilidad, requieren bajo mantenimiento, fácil instalación, manipulación como madera (lijar, teñir, cortar y perforar) y procesamiento como material plástico con técnicas convencionales como extrusión, inyección y moldeo por compresión.

HOLVIPLAS S.A. ha visto la necesidad de disminuir el impacto ambiental al reutilizar los desechos generados en la industria maderera del país incursionado en el desarrollo de WPC por medio de la presente investigación, con el fin de ampliar su línea de producción considerando un costo de producto aceptable en un entorno de recesión económica. Esta línea de producción no existe a nivel nacional lo que permitirá desarrollar y elaborar nuevos productos en base a polímeros de madera, utilizar materiales reciclados, así como brindar servicios de asesorías a pequeñas y medianas empresas sobre la manufactura de materiales de reciclaje. Cabe recalcar que con el desarrollo en la industria de estos compuestos se esperaría que se constituyan protocolos para la clasificación y recolección de residuos de madera provenientes de aserraderos, carpinterías, fábricas, etcétera.

Si bien es cierto las matrices de poliolefinas PE y PP son utilizadas a menudo en el desarrollo de WPC, el PVC está recibiendo buena aceptación en el mercado Europeo, existen varias razones técnicas que hacen del PVC una mejor opción que las poliolefinas, principalmente presenta gran flexibilidad lo que permite el desarrollo de productos versátiles, sin olvidar sus propiedades contra el fuego, resistencia química, alta rigidez, mayor resistencia a la intemperie y reciclaje, razones por las cuales en este trabajo se desarrolla una formulación de compuestos de PVC y madera (Hajji, Marchand, & Pirri, 2008).

En la presente investigación se ha considerado el uso de aceites de origen vegetal como el aceite epoxidado de soya para modificar la superficie de la madera, proporcionando características mejoradas en los WPVC, siendo una solución innovadora al reemplazar el uso de agentes de acoplamiento químicos como silanos, isocianatos, anhídrido maleico, etcétera. El aceite epoxidado de soya es económico, disponible en grandes cantidades, presenta biodegradabilidad y baja toxicidad.

Por otra parte, el desarrollo de estructuras celulares espumadas por medio de extrusión ha mostrado mejoras en la disminución de densidad de los WPC con propiedades mecánicas aceptables especialmente buena resistencia al impacto y fuerza de tensión, siendo la azodicarbonamida (AZDC) el agente espumante químico más utilizado comercialmente y el que se emplea en este trabajo (Soares & Nachtigall, 2013).

El objetivo del presente trabajo de investigación está focalizado en el diseño de una formulación de compuestos de PVC – madera, a su vez investigar el efecto del contenido de madera en los compuestos, el tratamiento de la misma con aceite epoxidado de soya y la adición de un agente espumante como la azodicarbonamida sobre las propiedades físicas, mecánicas y térmicas de los compuestos, con la finalidad de obtener productos que sean amigables con el medio ambiente y a su vez presenten buenas propiedades para su posterior comercialización como un producto de alta calidad que incluye materias primas provenientes de desechos. Este proyecto se enfoca en la química verde al obtener productos y procesos químicos que reducen la utilización y generación de sustancias peligrosas, y a su vez aumentan el uso de materias primas y disminución de residuos.

#### **1.4. Objetivos.**

##### **1.4.1. Objetivo general.**

Diseñar la formulación de un nuevo compuesto de policloruro de vinilo (PVC) y residuos de madera mediante la incorporación de aceite vegetal epoxidado para la producción de pisos y perfiles.

##### **1.4.2. Objetivos específicos.**

- Acondicionar los residuos de madera para su utilización como material de refuerzo en el desarrollo de compuestos de PVC – madera.
- Desarrollar compuestos de PVC – madera con aceite vegetal epoxidado de soya utilizando los parámetros establecidos en el diseño experimental.
- Caracterizar los compuestos mediante pruebas físicas, mecánicas y térmicas en base a la normativa vigente para determinar la mejor formulación.

#### **1.5. Variables dependientes e independientes.**

##### **1.5.1. Variables dependientes.**

- Densidad.
- Deformación por compresión.
- Dureza.
- Profundidad de abolladura.

**1.5.2. Variables independientes.**

- Cantidad de residuos de madera.
- Cantidad de aceite epoxidado de soya.
- Cantidad de azodicarbonamida.

**1.6. Hipótesis.**

La adición del aceite vegetal epoxidado de soya a los residuos de madera permite un mayor acoplamiento entre matriz (PVC) – refuerzo (madera).

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA Y ESTADO DEL ARTE

#### 2.1. Polímeros.

Un polímero es una macromolécula conformada por la unión repetida de una o varias moléculas unidas entre sí mediante enlaces primarios, comúnmente enlaces covalentes. Los polímeros pueden ser naturales y sintéticos, los naturales o conocidos también como biopolímeros (por ejemplo: ADN, celulosa, etcétera.), presentan estructuras más complejas que los polímeros sintéticos (Beltrán & Marcilla, s. f.-a).

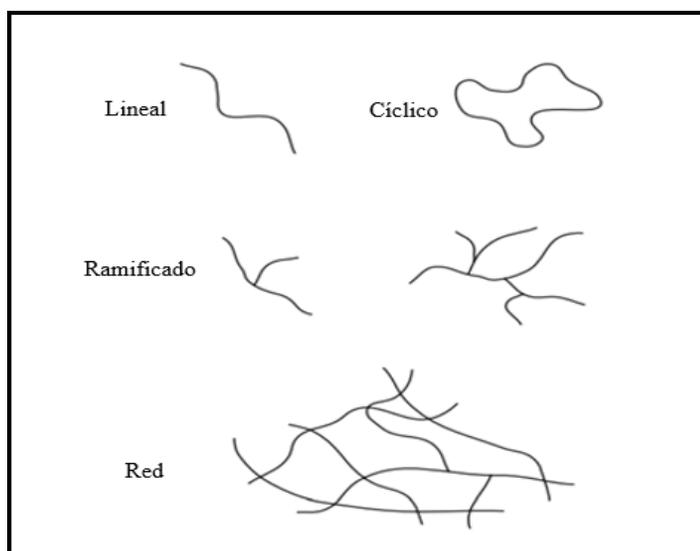
##### 2.1.1. Estructura esquelética.

En la figura 1 se muestran las diferentes estructuras esqueléticas de los polímeros, lineales y no lineales. Los polímeros lineales están representados por una cadena con dos extremos. Los polímeros cíclicos no presentan extremos de cadena y exhiben propiedades diferentes a los lineales. Los polímeros ramificados poseen cadenas laterales unidas a la cadena principal en los puntos de ramificación, se caracterizan en términos de número y tamaño de ramificaciones. Los polímeros de red muestran estructuras tridimensionales en las cuales cada cadena se encuentra conectada a las demás por medio de una secuencia de puntos de unión, estos polímeros están reticulados y se caracterizan por su grado o densidad de reticulación, que es la relación entre el número de puntos de unión por unidad de volumen. Los polímeros ramificados y en red se forman por polimerización o reticulación de cadenas preexistentes (R. J. Young & Lovell, 2011).

Las variaciones en las estructuras esqueléticas dan lugar a considerables diferencias en las propiedades. Por ejemplo los polímeros de red no se disuelven y no se funden con el calentamiento a diferencia de los polímeros lineales y ramificados, la densidad de reticulación también es importante debido a que a bajas densidades se obtiene un producto elastómero flexible, mientras que a altas densidades se tiene un material rígido (R. J. Young & Lovell, 2011).

**Figura 1**

*Representación de estructuras esqueléticas de polímeros lineales, cíclicos, ramificados y de red.*



Nota: (R. J. Young & Lovell, 2011).

## **2.1.2. Homopolímeros y Copolímeros.**

**2.1.2.1. Homopolímeros:** Son polímeros que se constituyen por la repetición múltiple de un solo tipo de unidad de monómero (Beltrán & Marcilla, s. f.-a).

**2.1.2.2. Copolímeros:** Son polímeros constituidos por dos o más tipos de unidades repetitivas.

La clasificación de los copolímeros se da según la secuencia de los monómeros, siendo copolímeros de bloque, injerto y al azar (Beltrán & Marcilla, s. f.-a).

### **2.1.3. Clasificación de los polímeros.**

En términos de comportamiento térmico y mecánico los polímeros se clasifican en termoplásticos, termoestables y elastómeros.

#### **2.1.3.1. Termoplásticos.**

Son polímeros lineales o ramificados, los cuales al aplicarles calor se ablandan y se funden, se pueden moldear empleando técnicas de procesamiento como extrusión y moldeo por inyección. Estos polímeros son semicristalinos, es decir muestran regiones cristalinas y amorfas, las fases cristalinas se caracterizan por la temperatura de fusión  $T_m$ , mientras que las fases amorfas se caracterizan por la temperatura de transición vítrea  $T_g$ , temperatura a la cual se transforma abruptamente del estado duro al estado blando, entre los polímeros termoplásticos se encuentran el polietileno y policloruro de vinilo (Beltrán & Marcilla, s. f.-a).

#### **2.1.3.2. Termoestables.**

Los polímeros termoestables son materiales rígidos insolubles, restringidos por un alto grado de reticulación (R. J. Young & Lovell, 2011). Al aplicar calor no se derriten, al contrario, comienza su proceso de descomposición, una vez provocada la reacción de reticulación no se pueden volver a procesar fácilmente, siendo su reciclaje muy difícil de llevar a cabo, entre estos se incluyen resinas epóxicas y fenólicas (Askeland, Fulay, & Wright, 2010).

### **2.1.3.3. Elastómeros.**

También conocidos como cauchos, resisten deformaciones elásticas superiores al 200%, pueden ser termoplásticos o termoestables levemente reticulados, las cadenas de los polímeros se encuentran en forma de espiral, al aplicar una fuerza se estiran de forma reversible (Askeland et al., 2010).

### **2.1.4. Procesos de polimerización.**

Los procesos de polimerización pueden ser por: polimerización de condensación y polimerización de adición.

#### **2.1.4.1. Polimerización de condensación o de reacción por etapas.**

Esta polimerización produce estructuras y propiedades que se asemejan a las obtenidas en los polímeros de adición, las reacciones a menudo implican moléculas de partida o precursores, como resultado se generan también subproductos como agua, metanol, etcétera (Billmeyer, 2004). La reacción de polimerización termina cuando uno de sus reactivos ha sido consumido en su totalidad.

#### **2.1.4.2. Polimerización de adición o de reacción en cadena.**

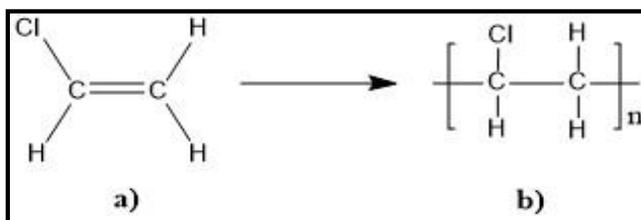
Esta polimerización conlleva reacciones en cadena en las que el conductor de la cadena puede ser un ion o una sustancia con un electrón desapareado denominado radical libre, un ejemplo es la polimerización del cloruro de vinilo, en el cuál, el radical libre rompe el doble enlace del monómero y se adiciona a él para formar un nuevo radical libre de tamaño superior y continuar con la reacción, la misma que termina cuando dos radicales libres reaccionan (Billmeyer, 2004).

## 2.2. Policloruro de vinilo (PVC).

El PVC es un polímero termoplástico versátil, conformado por un 57% de cloro, derivado del cloruro de sodio ( $NaCl$ ) o sal común y un 43% de etileno proveniente del GLP, en principio se obtiene dicloro etano, el mismo que a altas temperaturas se convierte en gas cloruro de vinilo (Suarez, 2008). Mediante la polimerización del monómero de cloruro de vinilo se obtiene el policloruro de vinilo, como se muestra en la figura 2, se puede obtener productos rígidos o flexibles dependiendo del proceso de polimerización.

**Figura 2**

*Monómero de cloruro de vinilo (cvm) (a), policloruro de vinilo (pvc) (b).*



Nota: (Vicuña-Vicuña, 2016)

El valor K característico del PVC se relaciona con el peso molecular y la viscosidad específica, este parámetro es importante en la selección de un material debido a que propiedades como estabilidad térmica y procesabilidad se encuentran influenciadas por el peso molecular del PVC, el valor de K incrementa con el aumento del peso molecular (Guastaferró, s. f.).

La densidad del PVC se encuentra en el rango de  $1,2 - 1,4 \frac{g}{cm^3}$ , presenta varias características como: material aislante, impermeable, inerte, larga vida útil, peso específico bajo, elevada resistencia química (soporta sustancias ácidas y alcalinas), resistencia a la

corrosión, al ataque biológico, a la intemperie, al fuego y al impacto (Suarez, 2008). El policloruro de vinilo es un termoplástico amorfo muy utilizado, su producción es la tercera más grande a nivel mundial luego del polietileno y polipropileno, entre sus aplicaciones incluyen elaboración de tuberías, perfiles de ventanas, paneles, cables eléctricos, juguetes, etcétera.

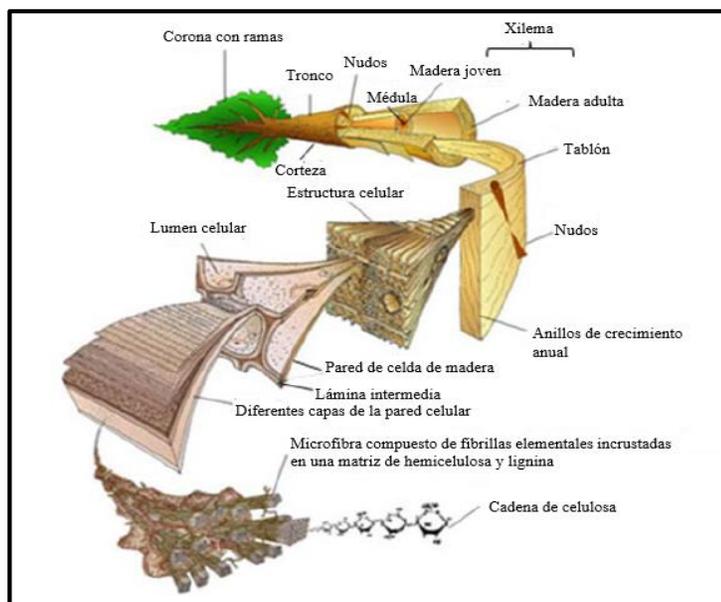
Una formulación para un compuesto de PVC puede incluir varios aditivos diferentes, el PVC se degrada térmicamente y se adhiere al equipo, por lo tanto es importante que todas las formulaciones contengan al menos un estabilizador de calor, uno o varios lubricantes y aditivos como: auxiliares de proceso, modificadores de impacto, plastificantes, absorbentes UV, rellenos y pigmentos, los mismos que se introducen dependiendo de la aplicación final o del procesamiento (Disson & Girois, 2003).

### **2.3. Madera.**

La madera es un polímero natural compuesto principalmente de celulosa, hemicelulosa, lignina y en menor cantidad minerales y sustancias extraíbles como: alcoholes, fenoles, hidrocarburos aromáticos y alifáticos, ceras, compuestos nitrogenados, etcétera, según el tipo de madera varía la composición y cantidad de hemicelulosa y lignina (Taj, Munawar, & Khan, 2007). Las especies de madera se clasifican como madera dura y madera blanda, las fibras de madera blanda provenientes de los árboles como pino y abeto son más flexibles en comparación con las fibras de madera dura como roble, teca, nogal, abedul (Borah & Kim, 2016). La estructura de la madera se observa en la siguiente figura.

**Figura 3**

*Esquema de la estructura jerárquica de la madera blanda.*



Nota: (Teischinger, 2016).

Los componentes de la madera son fácilmente degradables por microorganismos y también son susceptibles a sufrir daños por el fuego. La madera es de naturaleza hidrófila y susceptible a cambios dimensionales, por lo que al secarse la madera se contrae y al penetrar el agua la pared de celda se hincha acelerando las reacciones de oxidación, este fenómeno de absorción de humedad se da por la interacción entre el hidrógeno presente en las moléculas de agua y los grupos hidroxilo de la celulosa (Bouza-Padín, 2008).

Según (Matuana & Mengelloglu, 2002) el agua presente en la madera se encuentra como:

- Agua libre: Localizada en los lúmenes celulares, está sujeta a la porosidad de la madera.

- Agua ligada: Se encuentra en la pared celular por conexiones Van Der Waals o puentes de hidrógeno.
- Agua de constitución: Forma parte de la estructura molecular de la madera, su extracción solo puede darse por degradación térmica.

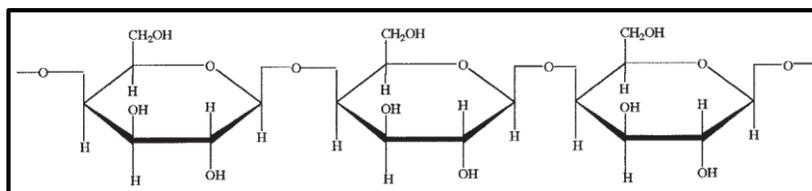
### 2.3.1. Celulosa.

Polisacárido constituido por una cadena lineal de cientos a miles de unidades de glucosa entrelazadas mediante enlaces glucosídicos  $\beta - (1, 4)$  (Borah & Kim, 2016). La celulosa es un homopolímero orgánico natural, biodegradable, térmicamente estable, altamente cristalino, insoluble en agua, solventes orgánicos y álcalis. Este polímero es el componente más abundante de la naturaleza, constituye la pared celular de la madera en un 40 a 60 % (Fonseca, 2006). Cabe mencionar que las propiedades mecánicas y la eficiencia de refuerzo de las fibras naturales están relacionadas con la naturaleza de la celulosa y también con su cristalinidad (Khalil et al., 2013).

La fórmula empírica de la celulosa es  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , donde  $n$  representa el grado de polimerización siendo su valor mínimo 200, en la figura 4 se presenta su estructura molecular.

**Figura 4**

*Estructura molecular de la celulosa.*



Nota: (Shah et al., 2005).

### **2.3.2. Hemicelulosa o poliosa.**

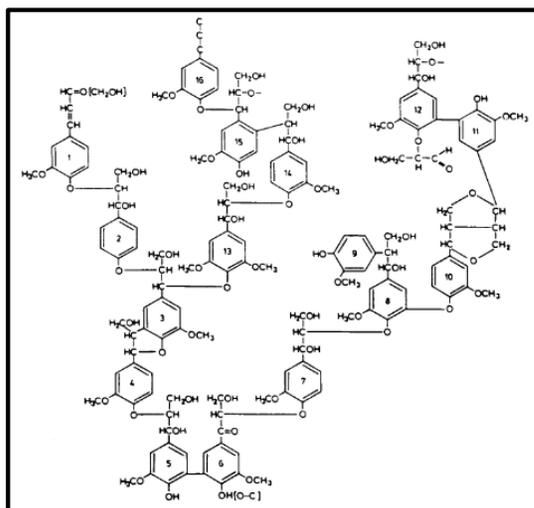
Polisacárido constituido por diversas unidades de monosacáridos como pentosas, hexosas y ácidos urónicos mediante enlaces glucosídicos, puede ser un homopolímero como los xilanos o un heteropolímero como los glucomananos (Bouza-Padín, 2008). La hemicelulosa se encuentra entre un 15 y 30 % en las paredes celulares de la madera, se comporta como agente acoplante entre la celulosa y lignina, en su estructura incluyen grupos como carboxilo, metilo o acetilo sustituidos (Shebani, van Reenen, & Meincken, 2009). La hemicelulosa es responsable de la biodegradación, la microabsorción y la degradación térmica de la fibra (Taj et al., 2007).

### **2.3.3. Lignina.**

Posteriormente a la celulosa la lignina es uno de los polímeros más abundantes en la naturaleza, su contenido en la madera varía de 18 a 35 %, presentando mayor porcentaje en la madera blanda en comparación a la madera dura, la función de la lignina es proporcionar soporte estructural a las plantas, es más hidrófoba que la celulosa y hemicelulosa además es térmicamente estable pero propensa a la degradación UV. La lignina es un polímero complejo conformado por unidades de fenilpropano unidos mediante enlaces alquil-aril-éter o carbono-carbono, en su estructura incluye grupos carbonilos, carboxilos, hidroxilos y metoxilos, como se muestra en la figura 5, se asocia a la hemicelulosa mediante enlaces covalentes estableciendo complejos de lignina carbohidratada a través de formación de grupos éter y éster. (Yáñez-Pacios, 2016).

Figura 5

Modelo estructural propuesto de lignina presente en la madera blanda.



Nota: (R. A. Young, 2008).

#### 2.4. Compuestos de plástico – madera (WPC).

El término WPC describe a los materiales compuestos de matriz polimérica generalmente plásticos termoestables o termoplásticos reforzados con madera como aserrín, astillas, virutas, restos de tableros, recortes de madera, etcétera. En los compuestos termoestables de madera las resinas más empleadas son Fenol formaldehído (*PF*) y Urea formaldehído (*UF*), donde su aplicación incluye la elaboración de adhesivos para tableros de fibras y madera contrachapada. Por otra parte los compuestos termoplásticos de madera se elaboran esparciendo fibras o partículas (polvo) de madera en plásticos fundidos para formar compuestos mediante técnicas de procesamiento como extrusión, termoformado, inyección y moldeo por compresión, los termoplásticos más utilizados en el desarrollo de los WPC son polipropileno (PP), polietileno (PE) y policloruro de vinilo (PVC) (Jiang & Kamdem, 2004a).

Los compuestos de polímero de madera también se originan incorporando madera junto a monómeros, iniciadores o pre polímeros, donde las polimerizaciones inician a través de radiación gamma, reacción térmica o catalizadores químicos, para obtener polímeros de alto peso molecular (Jiang & Kamdem, 2004a).

En un material compuesto la matriz al ser la fase continua envuelve y soporta los elementos de refuerzo, proporcionando continuidad y consistencia al material. Según (Dávila et al., 2011) las funciones básicas de la matriz son:

- Contener los refuerzos.
- Preservar la superficie de los refuerzos de la abrasión mecánica.
- Suministrar al refuerzo de una barrera contra los efectos del medio ambiente.
- Transferir las cargas aplicadas sobre la matriz a los refuerzos.

Los WPC presentan varias ventajas y desventajas como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 1***Ventajas y desventajas de los WPC.*

<b>VENTAJAS</b>	<b>DESVENTAJAS</b>
Alto nivel de cargas de relleno	Absorben humedad
Anticorrosivos	Baja estabilidad dimensional
Baja emisión de $CO_2$	Disminución de propiedades mecánicas
Bajo mantenimiento	Incompatibilidad de las fibras vegetales con las matrices poliméricas
Biodegradables	Limitada temperatura de procesamiento
Disminución de costos de producción	
No abrasivos	

Las propiedades de los WPC dependen de la forma, tamaño y características de la madera, se prefieren tamaños cortos debido a que proporcionan una mayor superficie específica y una distribución más homogénea en la matriz polimérica, además disminuyen el hinchamiento y roturas durante el procesamiento. Otros factores presentes en los WPC como composición química, densidad, porcentaje de fibra, tiempo de mezcla, temperatura de procesamiento, tipo y cantidad de agente acoplante, también influyen en las propiedades físicas y mecánicas del producto (Ashori, 2008). Por lo tanto las propiedades finales obtenidas no son igual a la suma simple de las propiedades de cada material sino que dependerán de varios factores.

Los compuestos de madera y policloruro de vinilo (WPVC, por sus siglas en inglés) son los WPC más comunes como consecuencia de su alta resistencia química y propiedades retardantes, tiene una gran aplicación arquitectónica y estructural, son apropiados para decoraciones de exteriores, industria de la construcción, productos de automoción e infraestructura (Chaochanchaikul & Sombatsompop, 2011).

### **2.5. Aditivos para la formulación de compuestos de PVC – madera (WPVC).**

En el diseño de una formulación de WPVC se debe tener en cuenta el uso de varios aditivos que ayudan en el procesamiento del compuesto con la finalidad de alcanzar un desempeño óptimo y prolongar su vida útil, cabe resaltar que la clasificación de los aditivos se da en relación a la función que desempeñan y no de su composición química (Kositchaiyong et al., 2014).

#### **2.5.1. Lubricantes.**

Existen dos tipos de lubricantes: internos y externos. Se clasifican como lubricantes internos cuando son solubles en PVC, disminuyen la viscosidad del fundido y no presentan consecuencia sobre el tiempo de fusión, entre estos se tiene, estearatos metálicos, alcoholes de ácidos grasos y ésteres de ácidos grasos. Por otro lado los lubricantes externos son insolubles en PVC, retrasan la fusión y mejoran la lubricación entre la mezcla y la superficie metálica de la máquina de procesamiento, como son, cera de parafina, aceite mineral y polietileno (Rabinovitch, Lacatus, & Summers, 1984). En los WPVC los lubricantes aumentan la dispersión de la madera en la matriz de PVC y mejoran el procesamiento de extrusión, la cantidad sugerida es de 2 a 8 phr (Jiang & Kamdem, 2004a).

### **2.5.2. Estabilizantes térmicos.**

Antes del descubrimiento de los estabilizantes térmicos, el PVC no era un polímero industrialmente útil, debido a su degradación a elevadas temperaturas. Los estabilizantes térmicos impiden la formación de iones de cloruro de hidrogeno capturándolos y estabilizándolos, con ello se evita la reacción de degradación de la cadena polimérica durante el procesamiento. Los principales estabilizadores térmicos son las sales de plomo, compuestos organoestaño y jabones metálicos, siendo más eficientes las sales de plomo pero presentan la desventaja de ser tóxicas (Folarin & Sadiku, 2011). La cantidad sugerida para máquinas de doble tornillo son niveles de 0.3–0,4 phr, mientras que para extrusoras monotornillo se aconseja niveles de 0.8–1 phr.

### **2.5.3. Auxiliares de proceso.**

Los auxiliares de proceso acrílicos son copolímeros de metacrilato de metilo y otros tipos de monómeros como acrilato de etilo, acrilato de butilo y metacrilato de butilo, obtenidos mediante polimerización en emulsión. Este aditivo permite un mejor procesamiento de los WPVC asegurando un mejor acabado del producto final evitando el desgarro y efecto piel de tiburón, favorece un postprocesamiento como el termoformado, además son considerados como agentes promotores de fusión, presentan la capacidad de aumentar la elasticidad y resistencia de la masa fundida, la cantidad sugerida es de 5 a 8 phr (Disson & Girois, 2003).

### **2.5.4. Modificadores de impacto.**

Para incrementar la resistencia al impacto en los compuestos de PVC se incorpora modificadores de impacto a la formulación, las micropartículas de estos modificadores se

dispersan en la estructura molecular del PVC, de manera que cuando los compuestos reciben un impacto las micropartículas absorben la energía del impacto y evitan daños al producto (Khalil et al., 2013). Generalmente los modificadores de impacto son termoplásticos flexibles con características de elastómeros, los más utilizados para PVC rígido son: Metacrilato-butadieno-estireno (MBS), acetato de etileno y vinilo (EVA), polietileno clorado (CPE), y elastómero totalmente acrílico (ACR). En los compuestos de PVC – madera, MBS y ACR son más eficientes y efectivos en la resistencia al impacto que los modificadores de CPE (Mengelglu, Matuana, & King, 2000). Las proporciones de uso varían entre 3 y 6 phr.

#### **2.5.5. Estabilizantes UV.**

El policloruro de vinilo (PVC) en estado puro no absorbe luz con longitudes de onda mayores a 220 nm, pero la presencia de impurezas y grupos formados en la polimerización originan los cromóforos necesarios para la foto-degradación a mayores longitudes de onda, esto provoca depreciación en las propiedades mecánicas y químicas además de un deterioro físico evidente (Bonilla, 2016). Los WPC perciben una decoloración mayor que un compuesto de PVC sin relleno cuando se expone a la luz UV, esto se debe a que la madera es susceptible a la foto-degradación, induciendo a la formación de cromóforos como ácidos carboxílicos, carbonilos, radicales hidroperóxidos, quinonas, etcétera. Los aditivos UV capturan la energía a una longitud de onda que provocaría daño en el polímero y lo expide a una longitud de onda diferente, los aditivos UV más empleados son: benzotriazoles, acrilonitrilos sustituidos, 4-alcoxibenzofenonas, etcétera (Beltrán & Marcilla, s. f.-b). La cantidad sugerida depende del proveedor.

### **2.5.6. Antioxidantes.**

Los antioxidantes se adhieren con los radicales libres o con peróxidos formados, para impedir las reacciones de degradación que sufre el compuesto durante el procesado, como consecuencia se obtiene especies no reactivas, además ayuda en la protección del producto final contra la fotooxidación, la mayoría de antioxidantes son aminas aromáticas o fenoles estéricamente impedidos (Beltrán & Marcilla, s. f.-b).

### **2.5.7. Pigmentos.**

La adición de pigmentos a los WPVC se da por razones estéticas debido a que no alteran las propiedades mecánicas de los compuestos, presentan un tamaño de partícula pequeño logrando una mejor dispersión en el polímero, algunos pigmentos incluyen aditivos UV. Se utilizan concentraciones muy bajas de 0,1 a 0,5 partes por cien de resina (phr), entre los pigmentos se tiene el negro de humo (negro), dióxido de titanio (blanco), óxidos de hierro (marrones), cromatos de plomo y zinc (amarillo y verde) (Beltrán & Marcilla, s. f.-b).

### **2.6. Agentes Espumantes.**

Los agentes espumantes o de expansión son utilizados para disminuir la densidad de los WPC generando celdas vacías en la matriz polimérica (Spear, Eder, & Carus, 2015). Indistintamente del tipo de agente espumante un proceso de expansión involucra tres pasos fundamentales: nucleación, crecimiento de burbujas y estabilización, es decir las partículas de agente espumante dispersas en la matriz polimérica proveen sitios de nucleación, cuando la burbuja alcanza un tamaño crítico sigue creciendo hasta la ruptura, las propiedades de las espumas

poliméricas están vinculadas con la morfología de las celdas, tamaño, forma y densidad (Soares & Nachtigall, 2013).

En la tabla 2 se muestra la clasificación de las espumas termoplásticas tomando en cuenta el tamaño de celda.

**Tabla 2**

*Clasificación de las espumas termoplásticas.*

<b>Nombre</b>	<b>Tamaño de Celda</b>	<b>Aplicaciones</b>
Espuma Comercial	100 y 500 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Embalajes.</li> </ul>
Espuma de poliolefina reticulada	20 y 100 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aislamiento térmico.</li> <li>• Construcción civil.</li> </ul>
Espuma microcelular	5 y 20 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industria aeroespacial.</li> </ul>
Espuma ultramicrocelular	0,1 y 5 $\mu\text{m}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Automotriz.</li> </ul>

Nota: (Soares & Nachtigall, 2013)

Para la elaboración de los WPVC con agentes espumantes es importante tener en cuenta el peso molecular del PVC, un peso molecular bajo  $K=51$  inhibe la encapsulación del gas producido por los agentes espumantes en la matriz como consecuencia a una menor resistencia a la fusión, mientras que un peso molecular alto  $K=66$  impide el crecimiento celular debido a una mayor resistencia de fusión, por lo tanto el PVC con un  $K$  de 57 a 60 es el más adecuado para la formación de espumas de WPVC (Mengeloglu & Matuana, 2001).

### **2.6.1. Agentes espumantes físicos (PFA).**

Los PFA, por sus siglas en inglés, producen expansión al sufrir cambios en su estado físico cuando son incorporados al polímero, implica volatilización de un líquido o liberación de un gas comprimido bajo presión, entre estos se tiene el dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y nitrógeno ( $N_2$ ) (Soares & Nachtigall, 2013).

### **2.6.2. Agentes espumantes químicos (CFA).**

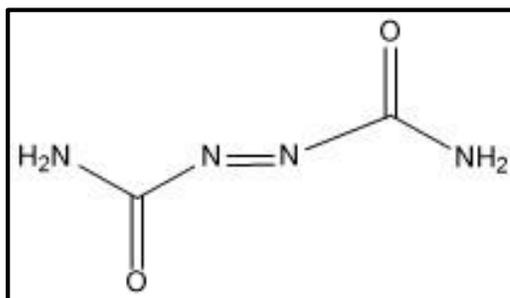
Los CFA, por sus siglas en inglés, son sustancias orgánicas e inorgánicas sólidas que originan un gas o mezcla de gases mediante una reacción química, difieren en la reacción y tipo de gas generados, la reacción puede absorber energía (endotérmica) o liberar energía (exotérmica) (Bledzki & Faruk, 2006). En la actualidad el uso de agentes espumantes químicos se ha extendido en la industria, entre estos los más comunes son azodicarbonamida ( $C_2H_4O_2N_4$ ) y bicarbonato de sodio ( $NaHCO_3$ ) (Soares & Nachtigall, 2013).

#### **2.6.2.1. Azodicarbonamida (AZDC).**

Es un sólido orgánico de color amarillo, se emplea como agente espumante químico en la industria del plástico especialmente en la producción de PVC, en la figura 6 se observa su estructura molecular.

**Figura 6**

*Estructura molecular de la AZDC.*



Nota: (Rice et al., 1997)

La AZDC presenta una densidad de  $1,65 \frac{g}{cm^3}$  a  $20\text{ }^\circ\text{C}$ , en estado puro se descompone a temperaturas mayores a  $215\text{ }^\circ\text{C}$ , pero mediante la selección adecuada de un activador su descomposición se aproxima entre los  $150$  y  $200\text{ }^\circ\text{C}$ , estos activadores pueden ser: cadmio, plomo y zinc, como benzoatos, estearatos, naftenatos y octoatos, independientemente de la concentración del activador, la velocidad de descomposición incrementa con el aumento de la temperatura de procesamiento (Waki & Yamashita, 1972).

Una mala expansión de la AZDC puede ser consecuencia de:

- a) Activación inadecuada del agente espumante.
- b) Pérdida de gas antes de la fusión óptima del compuesto.
- c) Viscosidad de fusión muy baja.

## **2.7. Modificación de la interfaz matriz termoplástica – refuerzo de madera.**

Debido a la incompatibilidad entre el refuerzo de madera y la matriz polimérica en el desarrollo de los WPC se aplican modificaciones químicas a la superficie de la madera como: Acetilación, acrilación, benzoilación, cianoetilación, metilación, silación, tratamiento con peróxido, hidrofobización e incorporación de agentes de acoplamiento (Sombatsompop, Chaochanchaikul, Phromchirasuk, & Thongsang, 2003). Estas modificaciones permiten convertir la superficie hidrofílica de la madera en más hidrofóbica con la finalidad de disminuir la tensión superficial, como consecuencia mejora la humectación y adhesión en la interfaz (Shah et al., 2005).

### **2.7.1. Agentes de acoplamiento (CA).**

Los agentes de acoplamiento generalmente se utilizan para mejorar la unión entre matriz y fibras formando puentes químicos. Los CA contienen grupos funcionales que en los WPC reaccionan y forman enlaces químicos con los grupos hidroxilo de la celulosa creando una buena compatibilidad entre el refuerzo de madera y la matriz termoplástica, mejoran la transferencia de tensión entre los materiales incrementando las propiedades mecánicas y físicas del compuesto final (Tserki, Zafeiropoulos, Simon, & Panayiotou, 2005).

Los agentes de acoplamiento se clasifican en inorgánicos, orgánicos y orgánicos-inorgánicos, como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3

*Clasificación de los agentes de acoplamiento.*

<b>Agentes de acoplamiento</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplos</b>
<b>Inorgánicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Actúan como agentes dispersantes para reducir la polaridad de la superficie de la madera.</li> </ul>	Silicatos
<b>Orgánicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Poseen grupos bi o multifuncionales en su estructura molecular, interactúan con los grupos hidroxilo de la celulosa y lignina presente en la madera formando enlaces covalentes o de hidrógeno.</li> <li>• Modifica la matriz polimérica mediante copolimerización de injerto dando como consecuencia una fuerte adhesión.</li> </ul>	<p>Ácidos orgánicos, acrilatos, amidas, anhídridos, clorotriazinas, copolímeros, epóxidos, imidas, isocianatos, monómeros y polímeros.</p>
<b>Orgánicos-Inorgánicos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Son de estructura híbrida es decir actúan como agentes orgánicos e inorgánicos.</li> </ul>	Silanos y titanatos

Nota: (Wu et al., 2000)

Un agente de acoplamiento puede ser tipo monomérico o polimérico, un agente polimérico implica copolímeros de bloque o injerto que se ubican en la interfaz y se comporta como agente emulsionante, en general los agentes de acoplamiento abarcan agentes de unión, agentes dispersantes y compatibilizadores (Wu et al., 2000). Para el desarrollo de los compuestos de PVC – madera se han investigado los efectos de acoplamiento del ácido linoleico, anhídrido maleico (MA), poli [metileno (isocianato de polifenilo)] (PMPPIC), polipropileno maleado (MAPP), silanos, quitosano, etcétera (Jiang & Kamdem, 2004a).

Según (Wu et al., 2000) para el tratamiento de fibras de madera y polímeros se han utilizado los siguientes métodos de recubrimiento en la producción de WPC:

- **Composición:** Se mezcla los agentes de acoplamiento con las fibras de madera y los polímeros a elevadas temperaturas en una extrusora.
- **Mezcla:** El agente de acoplamiento se coloca en la superficie de la fibra de madera, polímero o ambos en un agitador magnético o molino de rodillos a baja o alta temperatura.
- **Remojo:** La fibra de madera se impregna en forma de hojas de papel con una solución de agente de acoplamiento que contiene iniciadores u otros aditivos, posteriormente, el papel se retira de la solución y se coloca entre dos piezas de película de liberación de polímero para moldeo.
- **Pulverización:** En este método los agentes de acoplamiento se emulsionan y pulverizan sobre las superficies de las fibras de madera. La pulverización y mezcla son las más adecuadas para el recubrimiento previo de la fibra y polímeros antes de mezclar.

En general las propiedades mecánicas de los WPC mejoran con el aumento de la concentración del agente de acoplamiento hasta cierto límite y luego disminuyen, esto se puede deber a: formación de diferentes subproductos, interferencia en la reacción de acoplamiento o aumento en la concentración de agentes de acoplamiento que no se injertan o no reaccionan, por lo tanto un exceso de agente de acoplamiento es perjudicial para la reacción debido a que actúa como un inhibidor (Wu et al., 2000).

A diferencia del PE y PP, el PVC es una matriz polar por lo que la compatibilidad con la fibra de madera polar no debería presentar problemas, sin embargo estudios realizados se centran en el desarrollo de un agente de acoplamiento específico para WPVC que mejore la dispersión de las partículas de madera en la matriz de PVC e incremente la adhesión interfacial entre el PVC y la madera (Hajji et al., 2008).

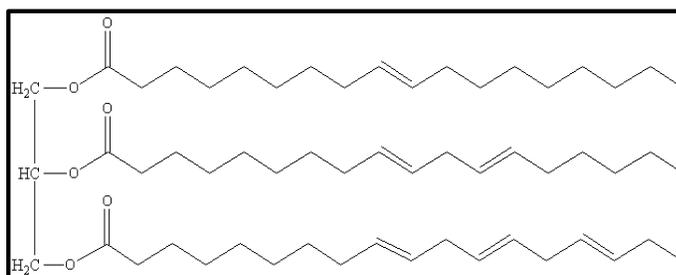
### **2.7.2. Aceites vegetales.**

Los aceites vegetales pertenecen a la familia de grasas o lípidos, son moléculas de triglicéridos o también conocidos como triacilglicerol (TAG), la estructura general del triglicérido se muestra en la figura 7 donde se observa que la molécula de glicerol se encuentra unida a tres cadenas de ácidos grasos. Los ácidos grasos saturados contienen un enlace simple entre dos átomos de carbono – carbono mientras que los ácidos grasos insaturados contienen enlaces dobles o triples entre dos átomos de carbono – carbono como ácido oleico, ácido linoleico y ácido linolénico (Saurabh, Patnaik, Bhagt, & Renge, 2011). Los principales parámetros que interfieren en las propiedades de los aceites vegetales son: la estereoquímica de los dobles enlaces, grado de insaturación y longitud de la cadena carbonada (Cruz et al., 2015).

El uso de aceites vegetales en aplicaciones poliméricas es extendido, se utilizan como aditivos, unidades conformadoras de polímero en materiales termoplásticos y para la síntesis de materiales termoestables, además presentan ventajas como biodegradabilidad, baja toxicidad, bajos costos, etcétera.

### Figura 7

*Estructura de la molécula de triglicérido.*



Nota: (Cruz et al., 2015)

La hidrofobización de las partículas de madera con aceites vegetales es una modificación respetuosa con el medio ambiente, se da a través de una reacción de transesterificación catalizada por ácidos o bases (Jang & Kim, 2016). Los aceites vegetales de colza, girasol, linaza, ricino, y soya son lo más utilizados, en la tabla 4 se muestra la composición de los mismos incluido también el valor de índice de yodo (I), cuando se tiene  $I > 170$  se denominan aceites secantes,  $100 < I < 170$  aceites semisecantes y  $I < 100$  aceites no secantes.

**Tabla 4**

*Composición de ácidos grasos en aceites vegetales, expresado en: g ácido graso/100 g aceite vegetal.*

<b>Ácido graso</b>	<b>C:DE</b>	<b>Colza</b>	<b>Girasol</b>	<b>Linaza</b>	<b>Ricino</b>	<b>Soya</b>
<b>Mirístico</b>	14:0	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1
<b>Palmítico</b>	16:0	4,1	6,1	5,5	1,5	11,0
<b>Palmitoleico</b>	16:1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
<b>Esteárico</b>	18:0	1,8	3,9	3,5	0,5	4,0
<b>Oleico</b>	18:1	60,9	42,6	19,1	5,0	23,4
<b>Linoleico</b>	18:2	21,0	46,4	15,3	4,0	53,2
<b>Linolénico</b>	18:3	8,8	1,0	56,6	0,5	7,8
<b>Ricinoleico</b>	18:1	0,0	0,0	0,0	87,5	0,0
<b>Araquídico</b>	20:0	0,7	0,0	0,0	0,0	0,3
<b>Gadoleico</b>	20:1	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Behénico</b>	22:1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,1
<b>Erúcico</b>	22:1	0,7	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Lignocérico</b>	24:0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>DE/triglicérido</b>		3,9	4,7	6,6	2,7	4,6
<b>Índice de yodo (I)</b>		91-108	110-143	168-204	82-88	117-143

Nota: Nomenclatura, C=número de átomos de carbono, DE=número de dobles enlaces C=C.

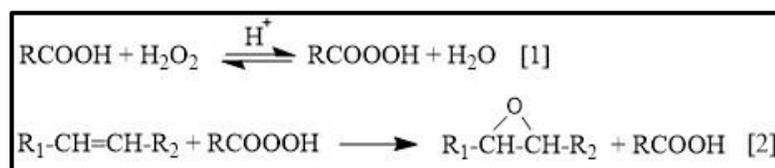
(Bueno-Ferrer, 2012)

### 2.7.3. Aceites vegetales epoxidados.

Los dobles enlaces en los aceites vegetales se utilizan como sitios reactivos y se funcionalizan químicamente a través de una reacción denominada *epoxidación*. La figura 8 exhibe la formación de grupos epoxi con la utilización de reactivos como ácido peracético y peróxido de hidrógeno, la reacción 1 pertenece a la formación de ácido peracético que implica una reacción catalizada por ácido, mientras que la reacción 2 conlleva la formación del grupo epoxi, siendo una reacción no catalizada, los triglicéridos modificados se pueden utilizar en reacciones de reticulación o se pueden modificar nuevamente (Bueno-Ferrer, Garrigós, & Jiménez, 2010). Los métodos de epoxidación son: método convencional, con resina de intercambio iónico, utilizando enzimas, con catalizador metálico, etcétera (Saurabh et al., 2011).

**Figura 8**

*Epoxidación del aceite vegetal.*



Nota: (Saurabh et al., 2011)

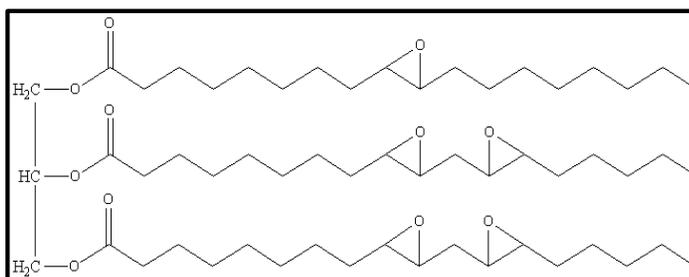
Los aceites vegetales epoxidados pueden ser utilizados como materia prima para la síntesis de productos químicos como alcoholes, glicoles, compuestos olefínicos, en la industria son manejados como estabilizantes, lubricantes y plastificantes, siendo el aceite epoxidado de soya el más utilizado.

### 2.7.3.1. Aceite epoxidado de soya (ESO).

El aceite epoxidado de soya se deriva de la soya, una legumbre proveniente de la familia *papilionoideae*, abarca un gran contenido de ácidos grasos insaturados como linoleico y oleico, su estructura molecular se muestra en la figura 9 (Bueno-Ferrer, 2012).

**Figura 9**

*Estructura molecular de un triglicérido de eso.*



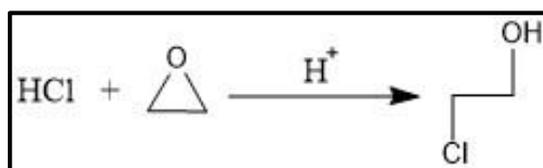
Nota: (Bueno-Ferrer, 2012)

ESO es un líquido amarillo, viscoso, cuyo punto de fusión es cercano a  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ , posee un elevado peso molecular, aproximadamente  $1000\frac{\text{g}}{\text{mol}}$ , se utiliza en numerosas aplicaciones como plastificante, estabilizante, lubricantes, en recubrimientos y como agente acoplante (Rahmah, Mohd Nurazzi, Nordyana, & Anas, 2017).

Otra ventaja del aceite vegetal epoxidado de soya es que protege al PVC de una posterior pérdida de color y deshidrocloración, en este proceso el cloruro de hidrógeno formado de la degradación del polímero reacciona con el anillo epóxido de las cadenas de los ácidos grasos, recuperando el átomo de cloro débil en la cadena polimérica como se observa en la figura 10.

**Figura 10**

*Reacción del anillo oxirano con HCl.*



Nota: (Bueno-Ferrer, Garrigós, & Jiménez, 2012)

## **2.8. Procesos de producción de los WPC.**

Las propiedades finales de los WPC dependen de la composición del material, una buena mezcla y procesamiento (Zhang, Gao, Xin, & Kim, 2012). Los sistemas de procesamiento más utilizados son extrusión y moldeo por inyección. En general los equipos utilizados presentan algunas variables operativas como: diseño del tornillo, velocidad del tornillo, relación L/D, perfil de temperaturas, etcétera (Jiang & Kamdem, 2004a).

### **2.8.1. Proceso de extrusión.**

Proceso mediante el cual se suministra calor y fuerzas de cizallamiento a un material dentro del barril de una extrusora, el proceso se puede emplear para mezclar polímeros con fibras, formar pellets del material compuesto, extruir perfiles sólidos, perfiles huecos y láminas planas (Spear et al., 2015). Según el diseño se clasifican en extrusoras de tornillo, extrusoras de pistón y extrusoras de disco (Guastaferrero, s. f.).

Existen cuatro tipos de sistemas de extrusión para procesar los WPC utilizando principalmente extrusoras de tornillo como:

- Tornillo simple
- Doble tornillo contra – rotativo

- Doble tornillo co – rotativo
- Woodtruder™

#### **2.8.1.1. Extrusora de tornillo simple.**

La extrusora de un solo tornillo es el sistema más simple para producir WPC, generalmente tiene una relación de longitud de barril y diámetro (L/D) de 34:1, incluye una sección de ventilación para descartar los volátiles producidos durante el procesamiento, la alimentación es por gravedad en una tolva y el material generalmente presenta forma de pellets. El método de fusión/mezcla es por cizallamiento del tornillo y calor del barril, este tipo de extrusora cuenta con el costo de adquisición más bajo en comparación con las otras extrusoras (Kim & Pal, 2010).

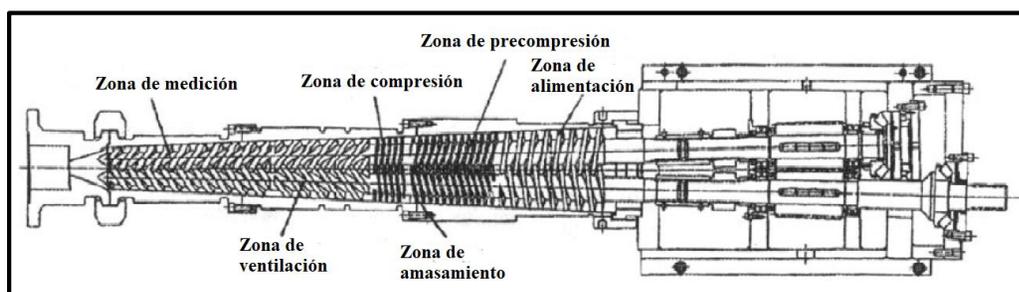
#### **2.8.1.2. Extrusora de doble tornillo contra-rotativo.**

Se utiliza principalmente para: materiales sensibles a la degradación térmica como el PVC, extrusión a bajas temperaturas como el caso de fibras y espumas, mezclas de polvo, materiales que requieren desgasificación, reacciones químicas, etcétera (Guastaferrero, s. f.). El tornillo doble puede presentar configuraciones cónicas o paralelas, cuenta con un alimentador abarrotado, el mecanismo de fusión/mezcla es la mezcla de tornillo y el calor del barril, la eliminación de humedad se da por un sistema de vacío (Kim & Pal, 2010).

A continuación se muestra el esquema de una extrusora cónica doble tornillo contra-rotativo.

**Figura 11**

*Esquema de una extrusora cónica doble tornillo.*



Nota: (Jiang & Kamdem, 2004a)

### **2.8.1.3. Extrusora de tornillo doble co-rotativo y tornillo simple de fusión en caliente.**

Este sistema cuenta con una extrusora de tornillo doble co-rotativo paralelo con una relación L/D 40:1, acoplada con una extrusora de tornillo simple de fusión en caliente con una relación L/D 10:1, en este proceso el material de alimentación no requiere un acondicionamiento inicial, los alimentadores son gravimétricos y laterales. La fusión/mezcla implica mezcla de tornillo, velocidad del tornillo y calor del barril, la eliminación de humedad se da por ventilación atmosférica y de vacío (Kim & Pal, 2010).

### **2.8.1.4. WOODTRUDER™.**

Este sistema incluye una extrusora de doble tornillo paralelo contra-rotativo, una relación L/D 28:1 y un tornillo simple de 75 mm, cuenta con unidad de mezcla, sistema computarizado de control de la mezcladora, sistema de herramientas del troquel, tanque de enfriamiento por aspersión, sierra de corte móvil y mesa de terminado (Kim & Pal, 2010). En este proceso la madera es secada dentro del tornillo doble y a su vez los plásticos se funden de manera separada de la fibra, la madera se mezcla con PVC derretido que es inyectado continuamente

por un extrusor lateral, esta separación en el transporte de la madera y los plásticos garantiza que las fibras no se quemen y que el plástico fundido encapsule por completo las fibras (Jiang & Kamdem, 2004a).

### **2.8.2. Operaciones de la unidad post-extrusora.**

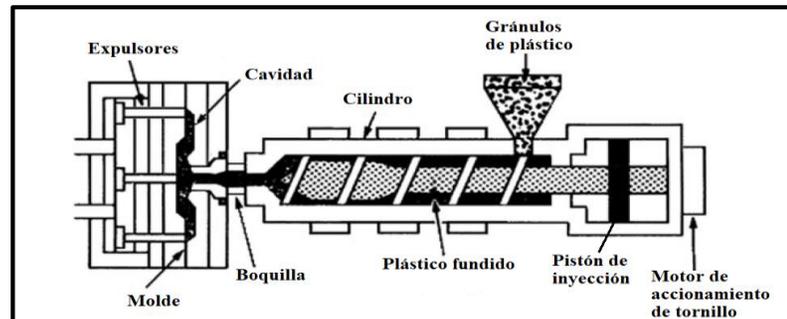
Conjuntamente con la extrusora, la matriz es muy importante en el sistema de extrusión de los WPC ya que define las dimensiones y formas de los perfiles que se van a producir, posteriormente se tiene el tanque de enfriamiento para “congelar” el perfil extruido basado en un sistema transportador con rociado de agua, a continuación pasa por una sierra de corte para seccionar el compuesto de longitud requerida (Kim & Pal, 2010).

### **2.8.3. Moldeo por inyección.**

Este proceso pertenece a la categoría de producción a gran escala, involucra varios campos de la ciencia e ingeniería como: ciencia de polímeros, dinámica de fluidos, fricción, teoría de control, transferencia de calor y reología (Kim & Pal, 2010). Los pellets obtenidos por extrusión se procesan con gran facilidad en una máquina de inyección alcanzando diferentes formas dependiendo del molde, el cual está a una temperatura más baja que el material fundido lo que causa un enfriamiento rápido consiguiendo un material sólido, el molde se abre y el material se retira, entre los factores limitantes en este proceso se tiene el grosor de la pared del compuesto moldeado y el índice de flujo de fusión de la mezcla (Spear et al., 2015). En la figura 12 se muestra el esquema de un equipo de moldeo por inyección.

**Figura 12**

*Equipo de moldeo por inyección.*



Nota: (Kim & Pal, 2010)

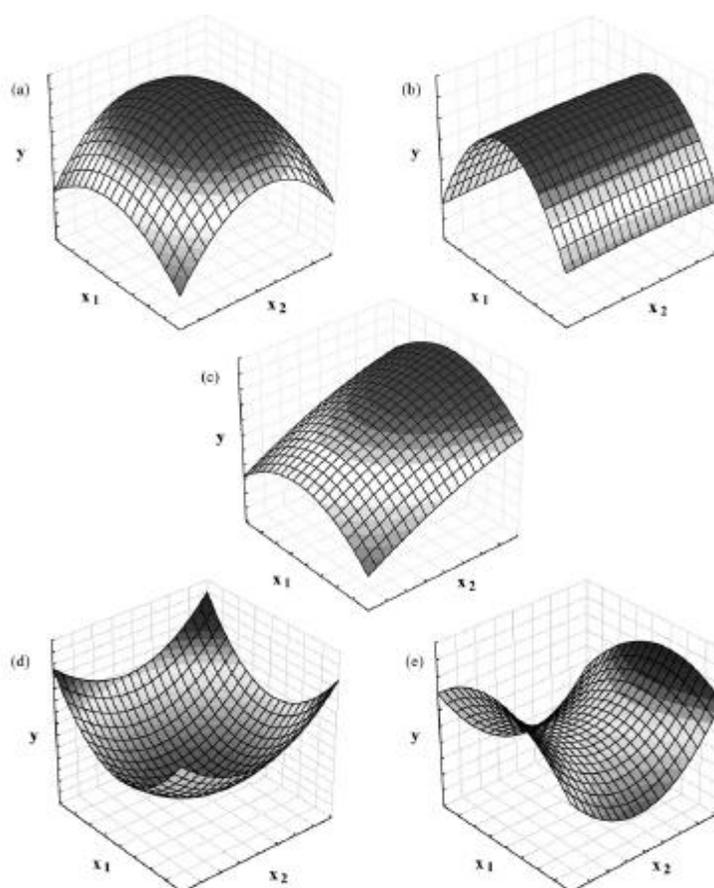
## 2.9. Diseño experimental.

### 2.9.1. Metodología de superficie de respuesta (RSM).

Es un conjunto de métodos estadísticos y matemáticos que ayudan en el análisis y modelamiento de problemas de ingeniería, su objetivo primordial consiste en optimizar la superficie de respuesta que se encuentra influenciada por algunos parámetros del proceso, además esta metodología cuantifica la relación de los parámetros controlables de entrada y las superficies de respuesta alcanzadas, se utilizan funciones polinómicas lineales o cuadráticas para describir el sistema estudiado (Aslan & Cebeci, 2007). Por lo general la superficie de respuesta se puede representar gráficamente como se observa en la figura 13.

**Figura 13**

*Perfiles de superficie de respuesta generados a partir de un modelo cuadrático en la optimización de dos variables, máximo dentro de la región experimental (a), meseta (b), máximo fuera de la región experimental (c), mínimo dentro de la región (d), superficie de silla de montar (e).*



Nota: (Bezerra, Santelli, Oliveira, Villar, & Escaleira, 2008)

Dependiendo del caso, si la respuesta está bien moldeada por una función lineal de las variables independientes, la función de aproximación es el modelo de primer orden, si el sistema presenta curvatura se utiliza el modelo de segundo orden. Entre los diseños de superficie de respuesta más importantes se encuentran: Diseño de Box Behnken, Diseño Equirradial y diseño central compuesto (Montgomery, 2004).

Según (Bezerra et al., 2008) la aplicación de la metodología de superficie de respuesta como técnica de optimización presenta el siguiente procedimiento:

- Seleccionar las variables independientes mediante análisis de delimitación y detección de la región experimental en concordancia con el objetivo de estudio y experiencia del investigador.
- Elegir el diseño de superficie de respuesta y la ejecución de los experimentos en base a la matriz experimental seleccionada.
- Realizar el tratamiento matemático-estadístico de los datos experimentales obtenidos por medio del ajuste de una función polinómica.
- Evaluar la idoneidad del modelo.
- Examinar la necesidad y posibilidad de efectuar un desplazamiento en dirección a la región óptima.
- Alcanzar valores óptimos para las variables estudiadas.

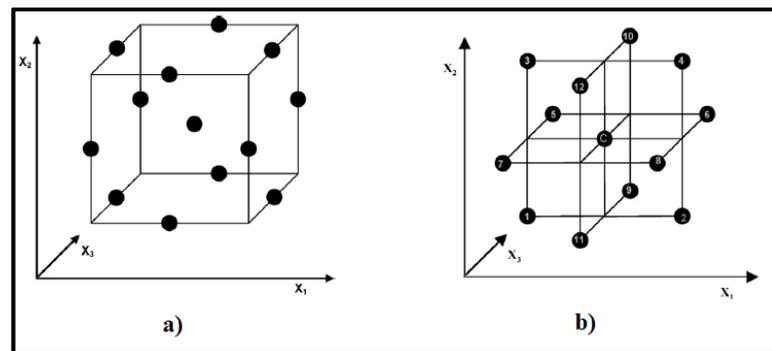
#### **2.9.1.1. Diseño de Box-Behnken (BBD).**

Es un diseño rotativo o casi rotativo de segundo orden que se fundamenta en diseños factoriales incompletos de tres niveles que permiten un ajuste con modelos cuadráticos (Ferreira et al., 2007). Los diseños resultantes suelen ser muy eficientes en términos de números

de corridas siendo menor a otros modelos, además el BBD presenta una configuración de diseño esférico, es decir, los puntos límites se encuentran a una distancia de  $\sqrt{2}$  a partir del centro del diseño, por lo tanto no incluye experimentos realizados en condiciones extremas lo que es una ventaja al evitar resultados insatisfactorios como se muestra en la figura 14 (Huertas-García, Gázquez-Abad, Martínez-López, & Esteban-Millat, 2014).

#### Figura 14

*Cubo que consiste en el punto central y puntos medios (a), tres diseños factoriales entrelazados  $2^2$  y un punto central (b).*



Nota: (Ferreira et al., 2007)

El diseño Box-Behnken permite:

- Estimar los parámetros del modelo cuadrático.
- Elaborar diseños secuenciales.
- Descubrir la falta de ajuste en el modelo.
- Utilizar bloques.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA DE DESARROLLO DEL PROYECTO

#### 3.1. Equipos, materiales y reactivos.

El trabajo de investigación se realizó en la planta de producción de la empresa Holviplas S.A. ubicada en el Km 11 ½ vía a baños y en los laboratorios de Petroquímica de la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE sede Latacunga. A continuación se enlistan los equipos, materiales y reactivos empleados en la ejecución del trabajo de titulación.

##### 3.1.1. Equipos.

- Analizador halógeno de humedad – METTLER TOLEDO – Modelo HB43-S.
- Analizador termogravimétrico – Perkin Elmer – Modelo Pyris 1 TGA.
- Balanza de Analítica – BOECO – Modelo BPS 51 plus, Máx. 4500 g.
- Balanza de pesaje industrial – CAMRY – Modelo Tcs-300-Ze11.
- Balanza mecánica universal – ACCU WEIGH.
- Cortadora – JWELL – YFG600.
- Durómetro shore D – PTC – Modelo 307L.
- Esmeriladora angular – Dewalt – DWE490.
- Extrusora doble tornillo cónico – JWELL – SJZ80/156.
- Unidad de halado – JWELL – YFY240.
- Unidad de halado – JWELL – YFY600.
- Máquina de ensayo de impacto – Norma ASTM D7136/D7136M – 15.

- Máquina universal de ensayos.
- Mezcladora – CACCIA – CP/200, Capacidad 135 L.
- Mezcladora – VALTORTA – V30-RO, Capacidad 180 L.
- Micrómetro – Mitutoyo.
- Tanque de vacío – JWELL – YFD240.
- Tanque de vacío – JWELL – YFD600.
- Tolva de alimentación.

### **3.1.2. Materiales.**

- Tanques de cartón – Recicladora, Quito, Ecuador.
- Tanque tipo botella – Holviplas – Capacidad 600 L.
- Termómetro de mercurio con una escala de -10 °C hasta 110 °C.
- Vaso de precipitación de 600 ml.
- Piceta plástica de 500 ml.
- Pinzas, espátula y soporte universal.

### **3.1.3. Reactivos.**

- Aceite epoxidado de soya (ESO) – Varteco – Índice de oxirano del 6,5%.
- Agua destilada.
- Ayuda de proceso – LG Chem.
- Azodicarbonamida – MainChem.
- Estabilizante de calor – POLYSTAB® E-176.
- Estearato de calcio – CIAQUILUB CAS 102.

- Etanol anhidro 99,79 °GL – Ovalcohol.
- Lubricante externo tipo parafínico – POLYLUB® 75.
- Modificador de impacto – BARODUR R-531.
- Pigmentos.
- Residuos de madera – Arboriente S.A., Puyo, Ecuador.
- Resina comercial de policloruro de vinilo PVC-450, K=67, Mexichem.

### **3.2. Recolección y determinación del contenido de humedad de la materia prima (Residuos de madera).**

#### **3.2.1. Recolección de los residuos de madera.**

Los residuos de madera fueron recolectados de la empresa Arboriente S.A. ubicada en la ciudad del Puyo, estos residuos son resultado de la fabricación de tableros contrachapados utilizando maderas provenientes de la región amazónica como: seique, cedro, mascarey, sande, sapote, laurel, etimoe y haya. Los residuos de madera fueron compactados por presión formando una especie de bloques para facilitar el transporte como se muestra en la figura 15, se transportó un total de 400 kg de residuos de madera a la empresa Holviplas S.A. distribuidos en sacos cerrados para evitar su contaminación.

**Figura 15**

*Residuos de madera.*



### **3.2.2. Determinación del contenido de humedad (%MC).**

El ensayo de determinación del contenido de humedad en los residuos de madera se realizó en el analizador halógeno de humedad METTLER TOLEDO – Modelo HB43-S, este equipo realiza la medición en base al principio termogravimétrico (Mettler-Toledo, 2014). Para el ensayo se fijó una temperatura final de 105 °C, se colocó aproximadamente 4 g de polvo de residuos de madera en el plato portamuestras y se distribuyó uniformemente, el equipo inició el ensayo determinando el peso de la muestra, posteriormente se calentó hasta la temperatura fijada calculando continuamente el peso como se muestra en la figura 16, una vez concluida la desecación el valor del contenido de humedad se refleja en la pantalla del equipo. El ensayo se realizó por triplicado para un mejor resultado.

**Figura 16**

*Determinación del contenido de humedad en residuos de madera.*



### **3.3. Análisis termogravimétrico (TGA) de los residuos de madera y azodicarbonamida.**

#### **3.3.1. Análisis termogravimétrico de los residuos de madera.**

El comportamiento de degradación térmica de los residuos de madera se examinó en el analizador termogravimétrico (Perkin Elmer – Modelo Pyris 1 TGA), para llevar a cabo el análisis se siguió el procedimiento descrito por (Boukerrou, Beztout, Djidjelli, Krim, & Hammiche, 2012). Se pesó entre 9 a 10 mg de muestra en la microbalanza del equipo, posteriormente se utilizó un barrido de calentamiento desde 20 °C hasta 700 °C en una atmósfera de nitrógeno a una velocidad de  $10 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$  y un flujo de  $50 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ .

#### **3.3.2. Análisis termogravimétrico de la azodicarbonamida (AZDC).**

El comportamiento de degradación térmica de la AZDC se examinó en el analizador termogravimétrico (Perkin Elmer – Modelo Pyris 1 TGA) utilizando el procedimiento descrito por (Soares & Nachtigall, 2013). Se pesó entre 9 a 10 mg de muestra en la microbalanza del equipo,

se utilizó un barrido de calentamiento desde 35 °C hasta 800°C en una atmósfera de nitrógeno a una velocidad de  $20 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{min}}$  y un flujo de  $50 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$ .

### **3.4. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC).**

#### **3.4.1. Desarrollo de formulación para la obtención del compuesto de PVC.**

En la tabla 5 se detallan los aditivos industriales utilizados en la fórmula para el desarrollo del compuesto de policloruro de vinilo, misma que sirve como fórmula base para el desarrollo de compuestos de PVC – madera. La formulación se desarrolló conforme a investigaciones en la literatura y fórmulas propias de la empresa, la cantidad de aditivos añadidos se expresan en partes por cien de resina de PVC (phr). El PVC empleado tiene un valor K=67 que corresponde al mismo utilizado en el estudio realizado por (Hajji et al., 2008), donde se demostró que a mayor valor de peso molecular del PVC el compuesto de PVC – madera presentaba mayor resistencia al impacto. El estabilizador térmico y la ayuda de proceso fueron manejados en niveles superiores a los que se utilizaría en un producto típico de PVC con el objetivo de mejorar ciertos inconvenientes en el procesamiento propios de los compuestos de PVC–madera como: baja resistencia a la fusión, baja estabilidad térmica, etcétera (Guffey & Sabbagh, 2002).

**Tabla 5**

*Aditivos utilizados en el desarrollo de compuestos de PVC.*

<b>NÚMERO</b>	<b>ADITIVO</b>
<b>1</b>	PVC-450 (K=67) (Matriz polimérica)
<b>2</b>	POLYSTAB® E-176 (Estabilizador de calor)
<b>3</b>	CIAQUILUB CAS 102 (Estearato de calcio)
<b>4</b>	POLYLUB® 75 (Lubricante externo)
<b>5</b>	BARODUR R-531 (Modificador de impacto)
<b>6</b>	Ayuda de proceso
<b>7</b>	Pigmento (Café)

A continuación se describe cada aditivo empleado:

- POLYSTAB® E-176: estabilizante de butil estaño con azufre, logra excelente estabilidad al calor y retención de color, levemente lubricado, permite un fácil reproceso, además presenta alta eficiencia y bajo costo.
- CIAQUILUB CAS 102 (estearato de calcio): estabilizante no tóxico y lubricante interno para PVC plastificado y rígido, promueve suavemente la fusión del PVC.
- POLYLUB® 75: lubricante externo tipo parafínico, su composición permite una apropiada lubricación en el proceso de obtención de compuestos de policloruro de vinilo, mejora las propiedades de flujo del compuesto de PVC, provee buen deslizamiento y brillo al producto final.

- BARODUR R-531: modificar de impacto de alta viscosidad a base de polímero etilénico, provee una excelente estabilidad dimensional sin afectar la estabilidad térmica del producto terminado. Este tipo de modificador de impacto se prefiere para compuestos con una carga de relleno alta de 20 phr o más (Khalil et al., 2013).
- AYUDA DE PROCESO: mejora la resistencia de fusión del polímero y disminuye la viscosidad extensional considerablemente. En compuestos que contienen agentes espumantes cuando la viscosidad es baja favorece la difusión de gas a través de la matriz, reduciendo la densidad e incrementando el tamaño de la celda generada (Mengeloglu & Matuana, 2001).

#### **3.4.2. Proceso de mezcla.**

Para mezclar los aditivos del compuesto de PVC se utilizó la mezcladora Valtorta que tiene una capacidad de 180 L, una velocidad baja de 650 rpm y una velocidad alta de 1300 rpm, esta mezcladora incluye un mezclador enfriador, como se muestra en la figura 17. Para el proceso de mezcla se utilizó el procedimiento descrito por (Guffey & Sabbagh, 2002) como se detalla a continuación:

- Se añadió el PVC al mezclador y se mezcló hasta que alcanzó una temperatura de 55 °C.
- Posteriormente se añadió el estabilizador de calor y se continuó mezclando hasta alcanzar los 75 °C.
- Se agregó los demás aditivos: lubricante externo, estearato de calcio, ayuda de proceso, modificador de impacto y pigmento, se continuó mezclando hasta que la mezcla alcanzó una temperatura de 120 °C.

- Automáticamente el mezclador se apagó y la mezcla descendió al mezclador – enfriador, cuando alcanzó una temperatura de 20 °C el enfriador se vació y se recogió la mezcla.

**Figura 17**

*Mezcladora valtorta.*



### **3.4.3. Extrusión del compuesto de policloruro de vinilo.**

En este trabajo los compuestos fueron producidos a escala industrial, la mezcla del PVC ingresó a la tolva de alimentación a través de un succionador, la tolva presenta espas para evitar que la mezcla se adhiera a las paredes, el material fluyó a través de un dosificador hasta llegar a la extrusora de doble tornillo cónico contra – rotatorio, los tornillos tienen un diámetro menor de 80 mm y un diámetro mayor de 150 mm, el rango de perfil de temperaturas y los parámetros de procesamiento se muestran en la tabla 6, la eliminación de volátiles emanados durante el procesado se dio por un sistema de vacío.

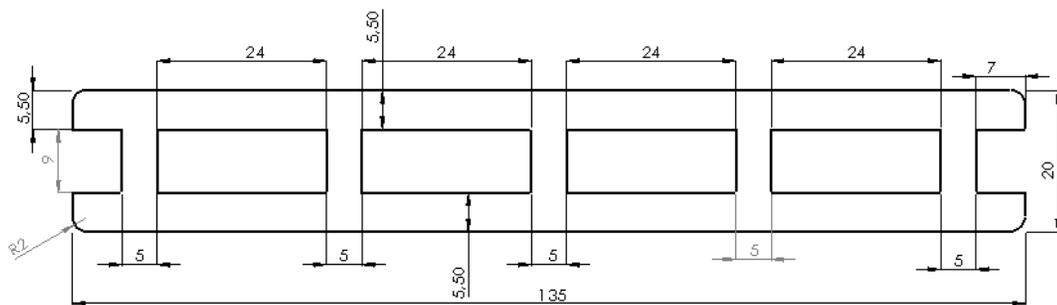
**Tabla 6***Condiciones de la extrusora en el procesamiento de compuestos de PVC*

<b>Perfil de temperaturas (°C)</b>			
Barril 1	130 – 140	Die 1	140 – 150
Barril 2	135 – 145	Die 2	135 – 145
Barril 3	140 – 150	Die 3	145 – 155
Barril 4	145 – 155	Die 4	145 – 155
Barril 5	145 – 155	Die 5	145 – 155
Oil term	55	Die 6	145 – 155
Join core	135 – 145	Die 7	135 – 145
		Die 8	135 – 145
<b>Parámetros de Procesamiento</b>			
Presión de la mezcla		~11 MPa	
Temperatura de la mezcla		~160 °C	
Carga del tornillo		~38 A	
Velocidad del tornillo		~13 rpm	
Carga del dosificador		~1 A	
Velocidad del dosificador		~7 rpm	

La matriz de la extrusora permitió obtener perfiles diseñados con vacíos, las dimensiones se observan en la figura 18, posteriormente los perfiles pasaron a través de un sistema de vacío y se solidificaron en un sistema de enfriamiento por inmersión, continuaron a una sierra de corte móvil automática que cortó a la longitud programada y finalmente llegaron a una mesa de recolección de perfiles. La línea del proceso de producción empleada para los compuestos de PVC y los compuestos de PVC – madera se muestra en la figura 19.

**Figura 18**

*Dimensiones de las muestras obtenidas en mm.*



**Figura 19**

*Línea de producción de los compuestos de PVC - madera. tolva de alimentación (a), zonas de extrusión (b), sistema de vacío y enfriamiento (c), jalador (d), mesa de recolección de perfiles (e), perfiles obtenidos (f).*

**(a)****(b)****(c)****(f)****(e)****(d)**

### **3.5. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC) y residuos de madera mediante la incorporación de aceite vegetal epoxidado.**

Para mejorar la interacción entre la matriz polimérica y el refuerzo se planteó tratar a los residuos de madera con aceite epoxidado de soya y para disminuir la densidad de los compuestos se consideró la adición del agente espumante químico azodicarbonamida, por lo tanto resultó indispensable el desarrollo de un diseño experimental con el objetivo de encontrar las cantidades óptimas para la formulación de WPVC. La cantidad de aditivos añadidos se expresa en partes por cien de resina de PVC (phr) a excepción del aceite epoxidado de soya que se expresa en partes por cien de madera (phw).

#### **3.5.1. Diseño experimental para el desarrollo de la formulación del compuesto de PVC – madera.**

Se estableció el diseño experimental de metodología de superficie de respuesta (RSM) tipo Box-Behnken (BBD), mismo que permite determinar la influencia de factores como: cantidad de residuos de madera, cantidad de aceite epoxidado de soya y cantidad de azodicarbonamida, sobre las variables de respuesta que en este caso corresponden a las pruebas realizadas a los compuestos: densidad  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ , deformación por compresión (mm), dureza (shore D) y profundidad de abolladura (mm).

En la tabla 7 se observan los valores codificados de las variables independientes: residuos de madera (A), aceite epoxidado de soya (B) y azodicarbonamida (C), exponiéndose en niveles inferior (-1), central (0) y superior (1). El diseño Box-Behnken establece como puntos centrales: residuos de madera 20 phr, aceite epoxidado de soya 30 phw y azodicarbonamida 0,3 phr.

**Tabla 7**

*Niveles de tratamiento para las variables independientes.*

<b>VARIABLES INDEPENDIENTES</b>			
	<b>Residuos de madera</b>	<b>Aceite epoxidado de soya</b>	<b>Azodicarbonamida (C)</b>
	<b>(A)</b>	<b>(B)</b>	
<b>Baja (-1)</b>	10	20	0,1
<b>Media (0)</b>	20	30	0,3
<b>Alta (1)</b>	30	40	0,5

La matriz de diseño experimental fue generada por el software Statgraphics mediante el diseño tipo Box-Behnken como se muestra en la tabla 8, la matriz presenta 15 corridas en total que corresponden a 3 corridas centrales y 12 combinaciones diferentes.

**Tabla 8**

*Diseño experimental box-behnken para la obtención del compuesto de PVC – madera.*

<b>Bloque</b>	<b>Residuos de madera (phr)</b>	<b>Aceite epoxidado de soya (phw)</b>	<b>Azodicarbonamida (phr)</b>
<b>1</b>	20	30	0,3
<b>2</b>	20	30	0,3
<b>3</b>	30	30	0,5
<b>4</b>	10	30	0,5
<b>5</b>	20	20	0,1
<b>6</b>	30	20	0,3
<b>7</b>	20	30	0,3
<b>8</b>	20	40	0,1
<b>9</b>	10	30	0,1
<b>10</b>	30	30	0,1
<b>11</b>	20	40	0,5
<b>12</b>	10	40	0,3
<b>13</b>	10	20	0,3
<b>14</b>	30	40	0,3
<b>15</b>	20	20	0,5

### **3.5.2. Tratamiento de los residuos de madera.**

La madera es de naturaleza hidrofílica y tiende a ligarse entre sí mediante enlaces de hidrógeno en lugar de dispersarse en la matriz termoplástica, por lo tanto es necesario modificar la superficie de los residuos de madera convirtiéndola en más hidrófoba y con ello mejorar la adhesión interfacial entre matriz y refuerzo, razón por la cual la madera se trató con aceite

epoxidado de soya, siguiendo el procedimiento descrito por (Jang & Kim, 2016) con varias modificaciones:

- Los bloques de madera se colocaron en la mezcladora CACCIA que tiene una capacidad de 135 L, una velocidad baja de 650 rpm y una velocidad alta de 1300 rpm, los residuos de madera fueron triturados hasta obtener harina de madera como se muestra en la figura 20 (a), se prefirió un tamaño de fibra corto debido a que mejora la resistencia de los WPC al proporcionar un área de superficie específica más alta y una distribución más homogénea en comparación a un tamaño de fibra mayor (Ashori, 2008).
- Posteriormente se colocó la solución de etanol – aceite epoxidado de soya en la mezcladora como se observa en la figura 20 (b). Para que se dé la reacción entre los residuos de madera y el aceite epoxidado de soya se mezcló durante una hora hasta 125 °C, a estas condiciones la madera se secó por evaporación del disolvente, figura 20 (c).
- Una vez concluido el tiempo, la mezcla descendió al enfriador hasta reducir la temperatura de la mezcla a temperatura ambiente, los residuos de madera tratados fueron reservados en tanques de cartón sellados, mismos que absorbieron humedad restante de la mezcla.
- Se realizó el mismo tratamiento para los diferentes niveles de residuos de madera y de aceite epoxidado de soya, siguiendo el diseño experimental planteado (Tabla 8).

**Figura 20**

*Residuos de madera triturados (a), incorporación del aceite epoxidado de soya y etanol (b), residuos de madera tratados (c).*



### **3.5.3. Proceso de mezcla del PVC, residuos de madera y aditivos.**

El PVC, los residuos de madera tratados y los demás aditivos fueron mezclados en seco en la mezcladora VALTORTA, siguiendo el orden descrito en el apartado 3.4.2. con la diferencia que se incluyó el PVC y los residuos de madera tratados con aceite epoxidado de soya al comienzo de la mezcla, lo que permitió facilitar el proceso de mezcla y tener un aumento eficiente de la temperatura, la azodicarbonamida se añadió cuando la mezcla tenía una temperatura de 110 °C. Para cada mezcla se varió los niveles de: residuos de madera, aceite epoxidado de soya y azodicarbonamida como se detalla en el diseño experimental (Tabla 8), la cantidad de los demás aditivos se mantuvo constante.

### **3.5.4. Proceso de extrusión de compuestos de PVC – madera.**

Para el proceso de extrusión de los compuestos de PVC – madera se siguió el procedimiento detallado en el apartado 3.4.3., las temperaturas de extrusión se conservaron por debajo de los

200 °C, temperatura que puede soportar la madera sin sufrir degradación como establece el análisis TGA (Martínez-López, Benigno-Paes, & Martínez-Rodríguez, 2018). Otro parámetro a considerar fue la presencia de AZDC, de igual manera previamente se realizó el análisis TGA de la azodicarbonamida, mismo que estableció una temperatura de descomposición superior a los 200°C, pero la presencia de estearato en la formulación ayudó como activador para que la descomposición de AZDC se diera a una temperatura inferior y dentro del rango de procesamiento.

En la tabla 9 se detalla el rango de temperaturas y parámetros de procesamiento utilizados en el proceso de extrusión de los compuestos de PVC – madera, estos valores fueron ajustados dependiendo de la fórmula procesada. Se utilizó una bomba de vacío en el procesamiento de los WPVC para eliminar los vapores de agua y extractivos generados por los residuos de madera.

**Tabla 9**

*Condiciones de la extrusora en el procesamiento de compuestos de PVC - madera.*

<b>Perfil de temperaturas</b>			
Barril 1	140 – 150	Die 1	150 – 160
Barril 2	145 – 155	Die 2	160 – 170
Barril 3	150 – 160	Die 3	165 – 175
Barril 4	155 – 165	Die 4	175 – 185
Barril 5	160 – 170	Die 5	175 – 185
Oil term	55	Die 6	175 – 185
Join core	135 – 145	Die 7	165 – 175
		Die 8	165 – 175
<b>Parámetros de Procesamiento</b>			
Presión de la mezcla		~13 MPa	
Temperatura de la mezcla		~160 °C	
Carga del tornillo		~31 A	
Velocidad del tornillo		~14 rpm	
Carga del dosificador		~1 A	
Velocidad del dosificador		~8 rpm	

El barril 1 pertenece a la zona de alimentación, en esta zona los filetes del tornillo son muy grandes con el objetivo de trasladar una gran cantidad de mezcla sin fundir hacia el interior de la extrusora, la temperatura debe ser baja para evitar una posible descomposición prematura de la AZDC y una pérdida de gas a través de la tolva. El barril 2 corresponde a la zona de compresión,

aquí los filetes decrecen progresivamente generando compactación de la mezcla, en esta zona la mezcla se funde pero la temperatura no debe ser muy alta por la presencia de los residuos de madera. El barril 3 pertenece a la zona de expulsión del aire atrapado en la mezcla. El barril 4 genera presión homogenizando la mezcla. El barril 5 pertenece a la zona de dosificación, misma que se encarga de ejercer presión sobre la mezcla para dosificarlo hacia el cabezal y garantizar que salga de la extrusora, en esta zona se debe alcanzar la temperatura de liberación de gas del agente espumante (Delgado & Medina, 2003). Los Die 1-8 controlan flujo y apariencia del producto final.

El procesamiento presentó algunas dificultades referentes al incremento de viscosidad por la adición de residuos de madera, motivo por el cual se elevó la temperatura para fórmulas que contenían mayor cantidad de madera lo que concuerda con los estudios realizados por (Rocha, Kazlauciuonas, Gil, Gonçalves, & Guthrie, 2009).

Las dimensiones de los compuestos extruidos y el post procesamiento de igual manera se describe en el apartado 3.4.3., finalmente las muestras se cortaron en piezas con la ayuda de una esmeriladora angular siguiendo las dimensiones establecidas en cada método de prueba estándar utilizado en este estudio.

### **3.6. Propiedades físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera.**

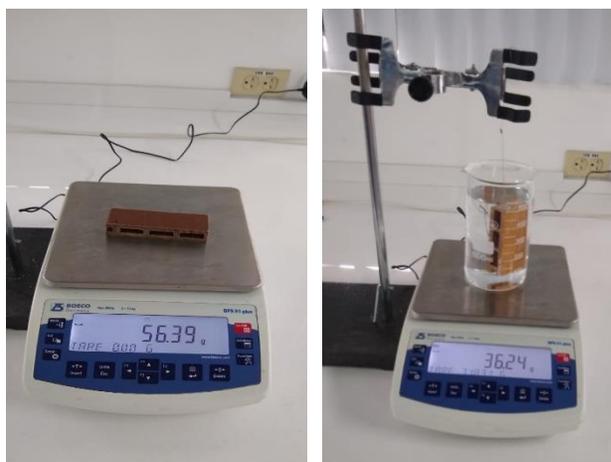
Se determinó las propiedades físicas y mecánicas de los WPVC obtenidos por medio del diseño experimental, con el propósito de evaluar el tratamiento de la superficie de la madera con el aceite epoxidado de soya y las variaciones en las cantidades de residuos de madera, aceite epoxidado de soya y azodicarbonamida.

### 3.6.1. Densidad.

La densidad de las muestras se determinó mediante el Método A de la norma ASTM D792-13, "Standard test methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of plastics by displacement" con algunas modificaciones. Previamente se cortó las muestras en dimensiones de 100 x 30 mm conservando la profundidad obtenida en el proceso de extrusión correspondiente a 20 mm, estas dimensiones permitieron obtener en la mayoría de las muestras una masa en el rango de 50 g, como se especifica en la norma. Para pesar la muestra se utilizó una balanza de analítica (BOECO – Modelo BPS 51 plus, Máx. 4500 g) como se muestra en la figura 21 (a), seguidamente se colocó en la balanza el recipiente con agua destilada a una temperatura de 21°C y se sumergió completamente el espécimen en el agua como se observa en la figura 21 (b). Para minimizar la absorción de agua se registró la masa aparente a los 10 s, las pruebas se realizaron por duplicado.

**Figura 21**

*Determinación de densidad de las muestras de PVC – madera.*



(a)

(b)

Una vez registrados los valores obtenidos para cada muestra se procedió a calcular la gravedad específica de cada espécimen siguiendo la ecuación 1, posteriormente se calculó la densidad utilizando la ecuación 2.

$$sp\ gr\ \frac{21}{21}^{\circ}C = \frac{Peso\ A}{Peso\ B}$$

**Ecuación 1.** Gravedad específica.

Fuente: (Impact Plastics, 2018)

Donde:

*sp gr*: Gravedad específica.

*Peso A*: Peso de la muestra en aire.

*Peso B*: Peso de la muestra sumergida en agua destilada.

$$D^{21\ ^{\circ}C}, \frac{g}{cm^3} = sp\ gr\ \frac{21}{21}^{\circ}C * 0,997$$

**Ecuación 2.** Densidad de la muestra.

Fuente: (ASTM D792, 2013)

Donde:

$D^{21\ ^{\circ}C}$ : Densidad de la muestra a 21 °C  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

*sp gr*: Gravedad específica.

0,997: valor de la densidad estándar del agua a 21 °C  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

### 3.6.2. Compresión perpendicular a la dirección L.

El ensayo de compresión permite determinar la capacidad de carga del producto manufacturado, en este estudio la resistencia a la compresión de las muestras se determinó mediante la norma ASTM D7031-11, "Standard guide for evaluating mechanical and physical properties of wood-plastic composite products", en combinación con la norma ASTM D143-14, "Standard test methods for small clear specimens of timber<sup>1</sup>". En la norma (ASTM D7031, 2011) se especifica las dimensiones de las muestras y se señala que los requisitos de medición y ejecución del método de prueba se deben realizar en base a la norma (ASTM D143, 2014). Para efectuar la prueba previamente las muestras fueron cortadas en dimensiones de 135 x 60 mm conservando la profundidad de 20 mm, se utilizó una máquina universal de ensayos como se muestra en la figura 22 (a), se aplicó la carga en cada muestra a una velocidad de  $1 \frac{mm}{min}$  hasta alcanzar un desplazamiento de compresión de 2,5 mm, como se indica en la figura 22 (b), se suspendió el ensayo e inmediatamente se midió la deformación causada por la compresión utilizando un calibrador pie de rey con una precisión de 0,05 mm como se observa en la figura 22 (c). Las pruebas se efectuaron por triplicado.

**Figura 22**

*Máquina universal de ensayos (a), ensayo de compresión (b), medida de la deformación final (c).*

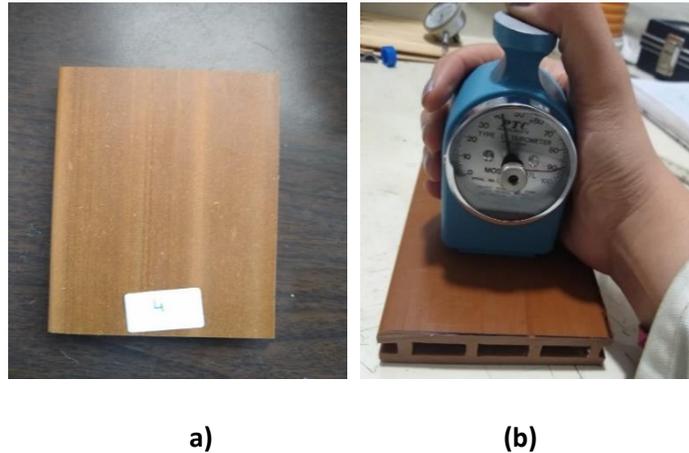
**(a)****(b)****(c)**

### **3.6.3. Dureza.**

La dureza de un material es inversamente proporcional a la penetración de la aguja de un durómetro, depende de las propiedades viscoelásticas y del módulo de elasticidad del material, en los WPC también depende de la distribución del relleno en la matriz (Boukerrou et al., 2012). La dureza de los compuestos se obtuvo en base a la norma (NTE INEN- ISO 868, 2014) “Plásticos y ebonita. Determinación de la dureza de indentación por medio de un durómetro (Dureza shore)”. Previamente a la ejecución del ensayo se cortaron probetas con dimensiones de 150 x 100 mm conservando la profundidad de 20 mm, como se observa en la figura 23 (a), se acondicionó las probetas y el durómetro shore tipo D durante 1 h a  $T=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $H\%=52\%$ , posteriormente se colocó cada probeta en una superficie plana y se introdujo la punta del penetrador manteniendo el durómetro en una posición vertical, como mínimo a 9 mm de los bordes, figura 23 (b), se tomó la lectura del durómetro transcurrido 15 s, se realizó 5 mediciones de dureza en diferentes posiciones de la probeta conservando una distancia mínima de 6 mm.

**Figura 23**

*Probeta (a), ensayo de dureza (b).*



#### **3.6.4. Impacto.**

La resistencia al impacto es la resistencia de un material a la fractura por el choque de una carga, esta resistencia depende de la estructura del compuesto, velocidad a la que se aplica la carga, temperatura del ensayo, etcétera, (Stevenson, 1995). Para realizar el ensayo de impacto se sometió a las probetas a un impacto de caída de peso según la norma ASTM D7136/D7136M-15, “Standard test method for measuring the damage resistance of a fiber-reinforced polymer matrix composite to a drop-weight impact event<sup>17</sup>”, se siguió el procedimiento descrito a continuación:

- La máquina de ensayos empleada en esta prueba fue construida de acuerdo a las especificaciones y requerimientos de la norma ASTM D7136/D7136M-15, con la ayuda del programa SOLIDWORKS 2017 como se muestra en la figura 24 (a), donde se obtuvo los planos de construcción, pesos y dimensiones de las piezas, así como cantidad de material necesario.

- Se construyó el dispositivo de prueba como se muestra en la figura 24 (b), el equipo fue colocado al final de la línea de producción destinada para los compuestos de PVC – madera con el fin de realizar la prueba a medida que se produzcan los perfiles.
- Las probetas fueron cortadas de los perfiles utilizando una esmeriladora angular Dewalt, las dimensiones fueron de 150 x 100 mm conservando la profundidad de 20 mm.
- La prueba emplea una energía de impacto constante normalizada por el espesor de la probeta, para la medición del espesor se utilizó un micrómetro marca Mitutoyo con una resolución de 0,01 mm como se observa en la figura 25 (a), se realizó cuatro medidas del espesor en una de las caras de la probeta y se registró la media.
- Se calculó la energía de impacto en función de la energía potencial del impactador utilizando la ecuación 3, seguidamente se calculó la altura de caída necesaria para producir la energía de impacto especificada utilizando la ecuación 4.
- Se realizó la prueba de impacto a temperatura ambiente dejando caer el impactador a la altura calculada, golpeando la probeta una vez sin impacto de rebote, se realizó cinco repeticiones para cada tratamiento.
- Finalmente, la resistencia al daño se cuantifica en términos del tamaño y tipo de daño resultante en la probeta, para este ensayo se midió la profundidad de abolladura ( $d$ ), que corresponde a la distancia máxima en la dirección normal a la cara de la probeta desde el punto más bajo de la abolladura hasta la superficie, para lo cual se utilizó el micrómetro anteriormente descrito como se muestra en la figura 25 (b), el daño externamente visible corresponde a la depresión formada por el impactador.

$$E = C_E h$$

**Ecuación 3.** Energía de impacto.

(ASTM D7136/D7136M, 2015)

Donde:

$E$  = Energía potencial del impactador antes de la caída (J).

$C_E$  = Relación especificada entre la energía de impacto y el espesor de la probeta  $\left(6,7 \frac{J}{mm}\right)$ .

$h$  = espesor nominal de la probeta (mm).

$$H = \frac{E}{m_d g}$$

**Ecuación 4.** Altura de caída.

(ASTM D7136/D7136M, 2015)

Donde:

$H$  = Altura de caída del impactador (m).

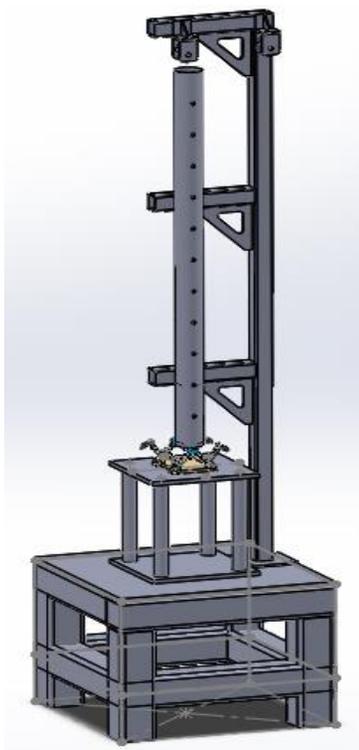
$m_d$  = Masa del impactador (kg).

$g$  = Aceleración debida a la gravedad  $\left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)$ .

**Figura 24**

*Dispositivo de prueba de impacto por caída de peso, dispositivo diseñado en Solidworks 2017*

*(a), dispositivo fabricado (b).*

**a)****(b)**

**Figura 25**

*Determinación del espesor (a), medida de la profundidad de abolladura producida por el impacto (b).*

**a)****(b)**

### **3.7. Análisis ANOVA.**

El análisis ANOVA permite separar y evaluar posibles causas de variación, comparando la diferencia entre las medias y las desviaciones estándar de las variables de respuesta (Jiang & Kamdem, 2004b). En este trabajo se utilizó el software Statgraphics para el análisis estadístico ANOVA de los factores sobre las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera.

## CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y DISCUSIONES

**4.1. Contenido de humedad en los residuos de madera.**

La tabla 10 muestra el análisis estadístico del contenido de humedad presente en los residuos de madera previo al tratamiento con el aceite epoxidado de soya, se observa una humedad experimental promedio de 8,45 %.

**Tabla 10**

*Análisis estadístico de datos para el contenido de humedad de los residuos de madera.*

<b>Promedio</b>	8,45
<b>Desviación Estándar</b>	0,087
<b>Coefficiente de Variación</b>	1,03%
<b>Error Estándar</b>	0,050
<b>Mínimo</b>	8,39
<b>Máximo</b>	8,55
<b>Rango</b>	0,16

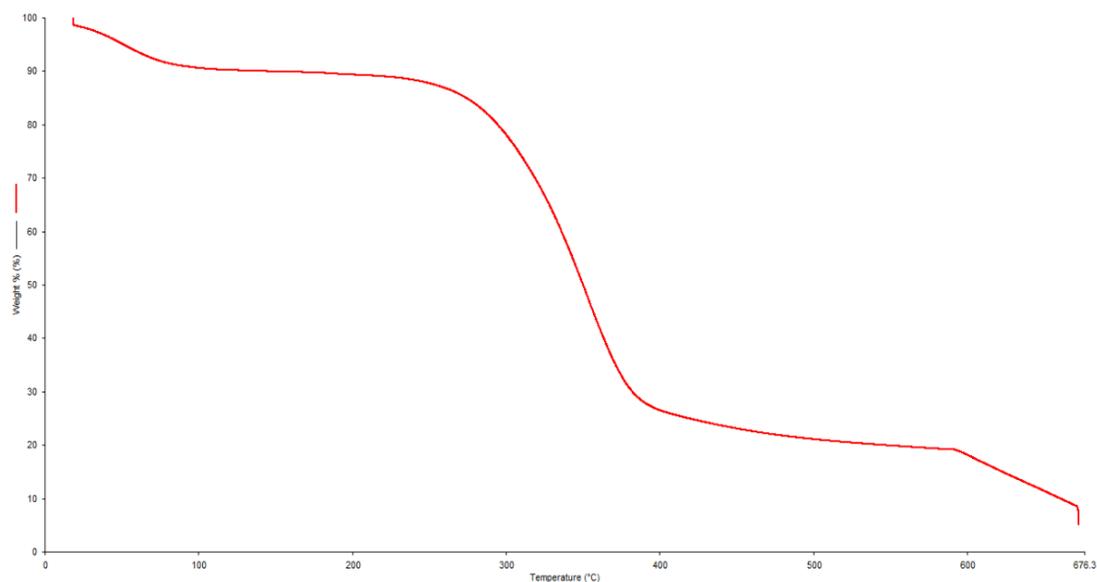
## 4.2. Análisis termogravimétrico (TGA) de los residuos de madera y AZDC.

### 4.2.1. Análisis TGA de los residuos de madera.

En la figura 26 se observa el análisis termogravimétrico de los residuos de madera donde se evidencia que la degradación de la madera se produce en un rango de 200 °C a 672 °C, lo que permitió establecer que la temperatura de procesamiento de los compuestos de PVC – madera no debe exceder los 200 °C para evitar la degradación de la madera que ocasiona un evidente deterioro en sus propiedades organolépticas, como el olor y color, y por ende malas propiedades mecánicas en los compuestos (Ashori, 2008).

#### Figura 26

*Termograma perteneciente a los residuos de madera.*



Los porcentajes de pérdida de peso de los residuos de madera según el rango de temperatura se presentan en la tabla 11. La degradación térmica de la madera se divide en las siguientes etapas: la disminución de masa inicial en el rango de 20 a 200 °C corresponde a la pérdida de moléculas de agua y extractivos, la descomposición de hemicelulosa y parte de la lignina se presenta entre 220 y 280 °C, la degradación por encima de los 350 °C corresponde a la descomposición de la celulosa, mientras que la degradación superior a los 550 °C se atribuye a los polisacáridos y lignina (Shebani et al., 2009). Se puede concluir que la degradación de la lignina ocurre en un amplio rango de temperaturas, se observa que es más resistente al aumento de temperatura en comparación a la celulosa y hemicelulosa. No se alcanza el 100 % de pérdida de peso debido a la formación de carbón residual.

**Tabla 11**

*Datos de la degradación térmica de los residuos de madera obtenidos de la curva tg.*

	% Pérdida de peso				% Peso residual
	De 20 °C a 200 °C	De 200 °C a 350 °C	De 350°C a 550 °C	De 550 °C a 672 °C	672 °C
Residuos de madera	9,168	39,294	30,157	14,812	5,081

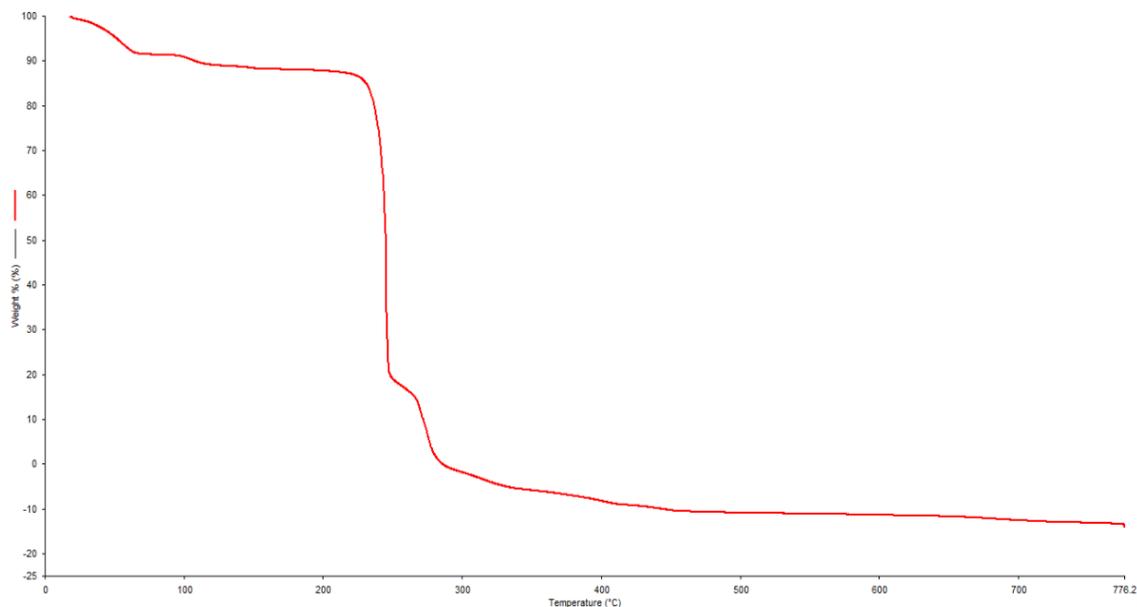
#### 4.2.2. Análisis TGA de la azodicarbonamida.

La curva termogravimétrica correspondiente a la azodicarbonamida se muestra en la figura 27, donde se proporciona información sobre la estabilidad térmica de este agente espumante,

se puede observar que la descomposición de la AZDC comienza a una temperatura aproximada de 220 °C y finaliza a los 285 °C, sin embargo, la temperatura de procesamiento de los compuestos de PVC – madera no puede exceder los 200 °C razón por la cuál se añadió precursores como estearatos a la formulación para lograr una menor temperatura de liberación de gas de la AZDC en la matriz polimérica de los WPVC.

### Figura 27

*Termograma perteneciente a la azodicarbonamida.*



En la tabla 12 se muestran los porcentajes de pérdida de peso correspondientes a la degradación de la azodicarbonamida en los diferentes rangos de temperatura, la masa residual a 285 °C fue de 0,015 %, comprobándose que la muestra de AZDC se descompone casi por completo generando productos gaseosos principalmente nitrógeno y monóxido de carbono (Soares & Nachtigall, 2013).

**Tabla 12**

*Datos de la degradación térmica de la azodicarbonamida obtenidos de la curva tg.*

	% Pérdida de peso				% Peso residual
	De 20 °C a	De 220 °C a	De 250°C a	De 270°C a	285 °C
	220°C	250°C	270°C	285°C	
AZDC	12,508	68,061	6,947	12,043	0,015

#### **4.3. Producción del compuesto de policloruro de vinilo (PVC).**

Una vez obtenido el compuesto de PVC sin refuerzo se realizaron las pruebas físicas y mecánicas anteriormente descritas con la finalidad de comparar con las propiedades de los compuestos de PVC – madera, la tabla 13 exhibe la media y desviación estándar de los datos obtenidos en cada prueba realizada.

**Tabla 13**

*Datos obtenidos en las pruebas realizadas al compuesto de PVC.*

<b>PRUEBA</b>		<b>VALOR</b> $(\bar{x}) \pm s$
<b>Densidad</b> $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$		1,419 ± 0,000
	Carga aplicada para una compresión de 0,5 mm (KN)	0,901±0,010
<b>Compresión</b>	Carga aplicada para una compresión de 1,00 mm (KN)	2,903±0,005
	Deformación por compresión (mm)	0,200 ± 0,000
<b>Dureza (Shore D)</b>		76,700 ± 0,671
	Energía de impacto (J)	40,937±0,000
<b>Impacto</b>	Profundidad de abolladura (mm)	8 ± 0,000

#### **4.4. Producción de los compuestos de PVC – madera.**

Con el objetivo de definir la formulación adecuada para la producción de los compuestos de PVC – madera y a su vez comprender la influencia que tiene el aceite epoxidado de soya y la azodicarbonamida en los compuestos se obtuvieron las muestras de acuerdo al diseño experimental de metodología de respuesta del tipo Box-Behnken mostrado en la tabla 8, la mayoría de muestras exhibieron buena calidad de superficie y borde, el color del compuesto puede ser ajustado controlando el tipo y cantidad de madera agregada, en este trabajo al utilizar residuos de madera los colores variaban dependiendo del tipo de maderas presentes en los residuos, por lo cual se supone que los compuestos con tonalidades más oscuros incluían residuos de maderas como cedro, etimoe, laurel, mascarey y seique, mientras que los

compuestos con tonalidades más claras correspondían a residuos de maderas como haya, sande y sapote, además se pudo verificar que al agregar una pequeña cantidad de madera el compuesto cambiaba totalmente de aspecto mostrándose con la apariencia de la misma.

Es importante mencionar que el contenido de humedad presente en los residuos madera luego del tratamiento con el aceite epoxidado de soya no presentó ningún problema en el procesamiento de los compuestos de PVC – madera. En el trabajo realizado por (Khalil et al., 2013) se menciona que un bajo contenido de humedad en la madera provoca disminución en las propiedades de flexión y tracción.

#### **4.4.1. Propiedades Físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera.**

##### **4.4.1.1. Densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .**

Por medio de la experimentación detallada en el apartado 3.6.1 se obtuvieron los datos de densidad con su respectivo análisis estadístico mostrados en la tabla 14, se puede observar que la muestra 14 correspondiente al tratamiento con 30 phr de residuos de madera, 40 phw de aceite epoxidado de soya y 0,3 phr de azodicarbonamida corresponde al menor valor de densidad en los compuestos de PVC–madera.

**Tabla 14**

*Análisis estadístico perteneciente a la densidad de los compuestos de PVC – madera.*

<b>Muestra</b>	<b>Densidad promedio <math>\left(\frac{g}{cm^3}\right)</math></b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
<b>1</b>	1,209	0,006	0,004	0,468%
<b>2</b>	1,218	0,000	0,000	0,000
<b>3</b>	1,150	0,004	0,003	0,369%
<b>4</b>	1,234	0,002	0,002	0,172%
<b>5</b>	1,299	0,038	0,027	2,939%
<b>6</b>	1,156	0,003	0,002	0,245%
<b>7</b>	1,228	0,001	0,001	0,058%
<b>8</b>	1,315	0,001	0,001	0,054%
<b>9</b>	1,359	0,001	0,001	0,052%
<b>10</b>	1,236	0,002	0,002	0,172%
<b>11</b>	1,172	0,013	0,009	1,086%
<b>12</b>	1,313	0,004	0,003	0,323%
<b>13</b>	1,350	0,003	0,002	0,210%
<b>14</b>	1,120	0,013	0,009	1,136%
<b>15</b>	1,176	0,014	0,010	1,203%

La incorporación de AZDC reduce la densidad en los compuestos de PVC – madera mostrando una densidad promedio de  $1,24 \frac{g}{cm^3}$  mientras que el compuesto de PVC que no incluye agente espumante ni residuos de madera presenta una densidad de  $1,42 \frac{g}{cm^3}$ , estos datos concuerdan con los reportados por (Patterson, 2001).

#### **4.4.1.2. Compresión.**

##### **a) Carga aplicada a la muestra para un desplazamiento de 0,5 y 1,00 mm.**

El ensayo de compresión se realizó según el apartado 3.6.2, la carga necesaria para comprimir 0,5 y 1 mm en cada muestra se observa en las tablas 15 y 16, respectivamente, este ensayo determina la capacidad de carga de los compuestos de PVC – madera correspondiente a cada tratamiento.

**Tabla 15**

*Análisis estadístico correspondiente a la carga aplicada para comprimir 0,5 mm en los compuestos de PVC – madera.*

<b>Muestra</b>	<b>Promedio Carga (KN)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coficiente de variación</b>
<b>1</b>	0,729	0,001	0,001	0,135%
<b>2</b>	0,726	0,006	0,003	0,814%
<b>3</b>	0,581	0,002	0,001	0,425%
<b>4</b>	1,523	0,004	0,002	0,260%
<b>5</b>	1,105	0,005	0,003	0,489%
<b>6</b>	1,031	0,001	0,001	0,095%
<b>7</b>	0,733	0,005	0,003	0,696%
<b>8</b>	1,044	0,003	0,002	0,287%
<b>9</b>	1,493	0,008	0,005	0,559%
<b>10</b>	1,420	0,011	0,007	0,796%
<b>11</b>	0,606	0,005	0,003	0,892%
<b>12</b>	1,028	0,001	0,001	0,146%
<b>13</b>	0,857	0,013	0,008	1,557%
<b>14</b>	0,719	0,007	0,004	0,984%
<b>15</b>	0,541	0,004	0,002	0,733%

**Tabla 16**

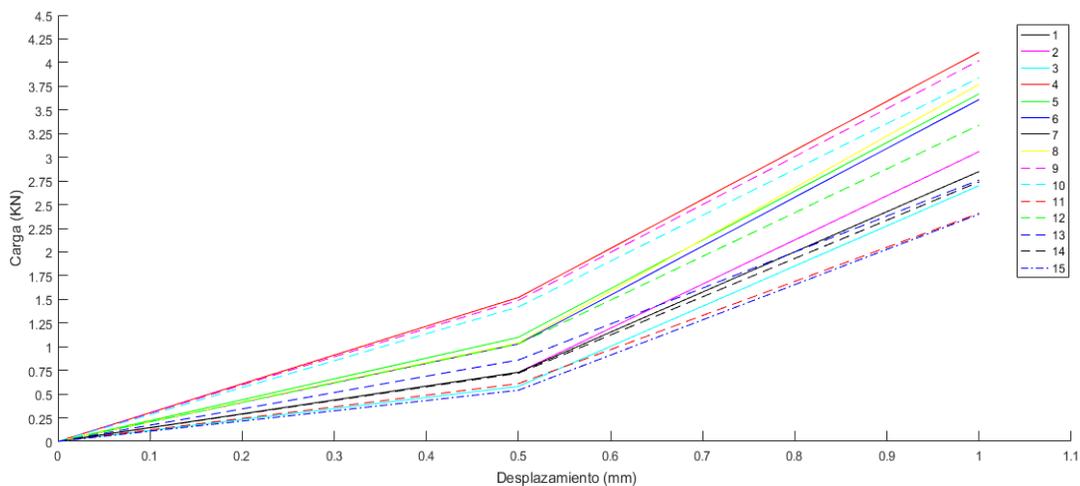
*Análisis estadístico correspondiente a la carga aplicada para comprimir 1,00 mm en los compuestos de PVC – madera.*

<b>Muestra</b>	<b>Promedio carga (KN)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
<b>1</b>	2,85	0,005	0,005	0,170%
<b>2</b>	3,06	0,006	0,003	0,182%
<b>3</b>	2,70	0,009	0,005	0,323%
<b>4</b>	4,11	0,006	0,004	0,155%
<b>5</b>	3,67	0,012	0,007	0,324%
<b>6</b>	3,61	0,004	0,002	0,113%
<b>7</b>	2,85	0,0096	0,006	0,338%
<b>8</b>	3,77	0,009	0,005	0,247%
<b>9</b>	4,02	0,010	0,006	0,257%
<b>10</b>	3,84	0,003	0,001	0,068%
<b>11</b>	2,41	0,001	0,001	0,041%
<b>12</b>	3,34	0,003	0,002	0,094%
<b>13</b>	2,76	0,009	0,005	0,335%
<b>14</b>	2,74	0,002	0,001	0,083%
<b>15</b>	2,40	0,011	0,006	0,449%

Se puede observar en ambas tablas que la muestra 15 perteneciente al tratamiento de 20 phr de residuos de madera, 20 phw de aceite epoxidado de soya y 0,5 phr de azodicarbonamida necesita menor carga para comprimirse, en general la formación de espuma le aporta mayor ductilidad al compuesto (Mengeloglu & Matuana, 2003). Las curvas correspondientes a la carga aplicada vs. desplazamiento para cada muestra se observa en la figura 28.

**Figura 28**

*Carga aplicada vs. desplazamiento de los compuestos de pvc – madera.*



**b) Deformación de la muestra luego de la prueba de compresión.**

La medida de la deformación final de la muestra luego de realizar la prueba de compresión permite determinar la rigidez del material, los datos obtenidos se observan en la tabla 17 junto al respectivo análisis estadístico.

**Tabla 17**

*Análisis estadístico para la deformación de las muestras luego de someterlas a la prueba de compresión.*

<b>Muestra</b>	<b>Promedio (mm)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
<b>1</b>	0,117	0,029	0,017	24,744%
<b>2</b>	0,117	0,029	0,017	24,744%
<b>3</b>	0,567	0,115	0,067	20,377%
<b>4</b>	0,267	0,029	0,017	10,825%
<b>5</b>	0,067	0,029	0,017	43,301%
<b>6</b>	0,150	0,000	0,000	0,000%
<b>7</b>	0,117	0,029	0,017	24,744%
<b>8</b>	0,050	0,000	0,000	0,000%
<b>9</b>	0,033	0,029	0,017	86,603%
<b>10</b>	0,083	0,029	0,017	34,641%
<b>11</b>	0,183	0,029	0,017	15,746%
<b>12</b>	0,100	0,000	0,000	0,000%
<b>13</b>	0,100	0,000	0,000	0,000%
<b>14</b>	0,133	0,029	0,017	21,651%
<b>15</b>	0,167	0,029	0,017	17,321%

En la tabla 17 se muestra que el tratamiento 9 que contiene la menor cantidad de madera y AZDC, 10 phr y 0,1 phr, respectivamente, y 30 phw de aceite epoxidado de soya es la muestra que menor deformación presenta luego de someterla al ensayo de compresión, por lo tanto es la más elástica, es decir la deformación desaparece casi por completo al cesar el esfuerzo, en general se observa que a excepción del tratamiento 3 y 4 los compuestos de PVC – madera muestran una menor deformación en comparación al compuesto de PVC. La deformación es producto del deslizamiento de las moléculas entre sí, una deformación dada por encima del límite elástico ya no es recuperable, comportándose como un sólido plástico y no elástico (Beltrán & Marcilla, s. f.-a).

#### **4.4.1.3. Dureza.**

En la tabla 18 se reportan los datos junto al análisis estadístico del ensayo de dureza Shore D realizado en los compuestos de PVC – madera, la prueba se realizó conforme al apartado 3.6.3.

**Tabla 18***Análisis estadístico para el ensayo de dureza.*

<b>Muestra</b>	<b>Promedio (Shore D)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
<b>1</b>	71,400	0,548	0,245	0,767%
<b>2</b>	72,300	1,565	0,700	2,165%
<b>3</b>	61,100	1,025	0,458	1,677%
<b>4</b>	65,200	0,570	0,255	0,874%
<b>5</b>	73,500	0,500	0,224	0,680%
<b>6</b>	65,400	1,140	0,510	1,743%
<b>7</b>	65,900	0,894	0,400	1,357%
<b>8</b>	75,400	1,084	0,485	1,438%
<b>9</b>	75,500	0,500	0,224	0,662%
<b>10</b>	73,400	1,294	0,579	1,763%
<b>11</b>	64,800	0,758	0,339	1,170%
<b>12</b>	73,100	0,224	0,100	0,306%
<b>13</b>	73,300	0,837	0,374	1,141%
<b>14</b>	65,700	0,837	0,374	1,273%
<b>15</b>	63,900	0,652	0,292	1,020%

Se observa una disminución de dureza en los compuestos de PVC – madera en comparación al compuesto de PVC sin refuerzo, estos resultados concuerdan con los análisis realizados por (Boukerrou et al., 2012). La disminución de la dureza se puede otorgar a una mala distribución del refuerzo en la matriz o al aceite epoxidado de soya que a su vez actúa como un plastificante del PVC. El tratamiento 9 muestra el mayor valor de dureza de los WPVC, correspondiente a 10 phr de residuos de madera, 30 phw de aceite epoxidado de soya y 0,1 phr de AZDC.

#### **4.4.1.4. Impacto.**

##### **a) Energía de impacto.**

La tabla 19 muestra la energía de impacto expresada en J que se aplicó a los compuestos de PVC–madera en el ensayo de resistencia de impacto, como se detalla en el apartado 3.6.4.

**Tabla 19**

*Energía de impacto suministrada a cada muestra.*

<b>Muestra</b>	<b>Energía de impacto (J)</b>
<b>1</b>	37,771
<b>2</b>	39,882
<b>3</b>	34,505
<b>4</b>	39,580
<b>5</b>	41,909
<b>6</b>	40,435
<b>7</b>	40,033
<b>8</b>	42,897
<b>9</b>	41,708
<b>10</b>	44,857
<b>11</b>	36,683
<b>12</b>	39,832
<b>13</b>	45,326
<b>14</b>	40,669
<b>15</b>	37,805

**b) Profundidad de abolladura (d).**

La resistencia al daño de las muestras de PVC – madera se cuantificó midiendo la profundidad de abolladura luego de realizar la prueba de impacto, los datos obtenidos y el análisis estadístico se muestran en la tabla 20.

Tabla 20

*Análisis estadístico para la profundidad de abolladura.*

<b>Muestra</b>	<b>Promedio (mm)</b>	<b>Desviación estándar</b>	<b>Error Estándar</b>	<b>Coefficiente de variación</b>
<b>1</b>	5,828	2,168	0,969	37,192%
<b>2</b>	6,198	0,578	0,259	9,330%
<b>3</b>	7,386	0,838	0,375	11,350%
<b>4</b>	7,236	0,705	0,315	9,746%
<b>5</b>	4,970	1,439	0,643	28,952%
<b>6</b>	7,080	0,693	0,310	9,790%
<b>7</b>	6,046	1,826	0,817	30,204%
<b>8</b>	5,388	0,641	0,287	11,895%
<b>9</b>	5,786	3,293	1,473	56,920%
<b>10</b>	5,742	1,229	0,550	21,412%
<b>11</b>	7,870	0,120	0,054	1,522%
<b>12</b>	7,130	0,895	0,400	12,554%
<b>13</b>	5,796	1,185	0,530	20,443%
<b>14</b>	6,584	1,012	0,452	15,367%
<b>15</b>	7,156	1,028	0,460	14,369%

El tratamiento 5 que corresponde a la adición de 20 phr de residuos de madera, 20 phw de aceite epoxidado de soya y 0,1 phr de AZDC muestra la menor profundidad de abolladura, por lo tanto presenta la mejor resistencia de impacto de los WPVC. En estudios realizados por (Sombatsompop et al., 2003) se demuestra que la incorporación de partículas de madera a la matriz de PVC reduce el comportamiento dúctil de la matriz disminuyendo así la tenacidad del compuesto en comparación a los compuestos de PVC sin refuerzo, sin embargo, se observa que los resultados obtenidos en este estudio son diferentes ya que los compuestos de PVC – madera manifiestan una mayor resistencia al impacto que el compuesto de PVC, se asume que esta mejora en la resistencia se debe a la presencia del aceite epoxidado de soya como agente acoplante y a una buena dispersión de los residuos en la matriz de PVC.

#### **4.4.2. Selección de las variables de respuesta.**

Se seleccionó como variables de respuesta a los resultados obtenidos en los ensayos de las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos, seleccionando los valores de densidad y dureza, con respecto al ensayo de compresión se seleccionó los resultados obtenidos en la deformación por compresión debido a que determina el desplazamiento final producido en los compuestos y del ensayo de impacto se seleccionó la profundidad de abolladura ya que permite evaluar el daño resultante en los mismos. En la tabla 21 se observa los valores obtenidos para las variables de respuesta pertenecientes a cada tratamiento, se tomó el promedio estadístico de las mediciones de cada muestra y su desviación estándar.

**Tabla 21***Determinación de las variables de respuesta.*

<b>Tratamiento</b>	<b>Densidad</b> $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ $(\bar{x}) \pm s$	<b>Deformación por</b> <b>compresión (mm)</b> $(\bar{x}) \pm s$	<b>Dureza</b> <b>(Shore D)</b> $(\bar{x}) \pm s$	<b>Profundidad de</b> <b>abolladura (mm)</b> $(\bar{x}) \pm s$
<b>1</b>	1,209±0,006	0,117±0,029	71,400±0,548	5,828±2,168
<b>2</b>	1,218±0,000	0,117±0,029	72,300±1,565	6,198±0,578
<b>3</b>	1,150±0,004	0,567±0,115	61,100±1,025	7,386±0,838
<b>4</b>	1,234±0,002	0,267±0,029	65,200±0,570	7,236±0,705
<b>5</b>	1,299±0,038	0,067±0,029	73,500±0,500	4,970±1,439
<b>6</b>	1,156±0,003	0,150±0,000	65,400±1,140	7,080±0,693
<b>7</b>	1,229±0,001	0,117±0,029	65,900±0,894	6,046±1,826
<b>8</b>	1,316±0,001	0,050±0,000	75,400±1,084	5,388±0,641
<b>9</b>	1,359±0,001	0,033±0,029	75,500±0,500	5,786±3,293
<b>10</b>	1,237±0,002	0,083±0,029	73,400±1,294	5,742±1,229
<b>11</b>	1,172±0,013	0,183±0,029	64,800±0,758	7,870±0,120
<b>12</b>	1,313±0,004	0,100±0,000	73,100±0,224	7,130±0,895
<b>13</b>	1,350±0,003	0,100±0,000	73,300±0,837	5,796±1,185
<b>14</b>	1,120±0,013	0,133±0,029	65,700±0,837	6,584±1,012
<b>15</b>	1,176±0,014	0,167±0,029	63,900±0,652	7,156±1,028

#### 4.4.3. Estudio preliminar.

Para el desarrollo de los compuestos de PVC – madera se ejecutaron previamente varias pruebas de formulación con diferentes niveles de tratamiento proporcionados por un anterior diseño experimental como se muestra en la tabla 22, al tener ausencia de aceite epoxidado de soya en la formulación no fue posible la obtención de compuestos debido a la falta de compatibilidad de la madera con el PVC como se observa en la figura 29 comprobando de esta manera que la hipótesis planteada en este trabajo es verdadera, además las partículas de madera presentaban poca humectabilidad lo que también dificultó su procesamiento, cabe destacar que la madera tuvo el mismo proceso de secado descrito anteriormente. Por otro lado al agregar la máxima cantidad de AZDC correspondiente a 0,75 phr el compuesto no se podía procesar por la excesiva hinchazón y la formación de burbujas grandes, razón por lo cual tampoco fue factible la obtención de muestras.

**Tabla 22**

*Niveles de tratamiento en las variables independientes correspondientes al estudio preliminar.*

	VARIABLES INDEPENDIENTES		
	Residuos de madera (A)	Aceite epoxidado de soya (B)	Azodicarbonamida (C)
<b>Baja (-1)</b>	10	0	0,3
<b>Media (0)</b>	20	30	0,525
<b>Alta (1)</b>	30	60	0,75

**Figura 29**

Extrusión de compuesto de PVC – madera sin aceite epoxidado de soya.



#### 4.5. Análisis Estadístico.

En base a los datos obtenidos para los compuestos de PVC – madera mediante el diseño experimental se ejecutó un análisis de varianza (ANOVA) empleando el software estadístico Statgraphics con un nivel de confianza del 95%. El análisis ANOVA particiona la variabilidad de las variables de respuesta en fragmentos separados para cada efecto, en este caso los efectos que presentan un valor-P menor a 0,05 indican que son estadísticamente significativos.

##### 4.5.1. Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

La tabla 23 expone el análisis de varianza para la densidad de los compuestos de PVC – madera, en este análisis se obtienen 2 efectos con un valor P menor a 0,05, por lo tanto los factores estadísticamente significativos son: el efecto lineal de A y C, se concluye que el factor B no es influyente y puede ser considerado como no significativo, es decir la densidad que presente el compuesto dependerá de la cantidad de residuos de madera y azodicarbonamida presentes en la formulación.

**Tabla 23**

Análisis de varianza (ANOVA) para la densidad  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:RESIDUOS DE MADERA	0,0440	1	0,0440	39,26	0,0015
B:ACEITE EPOXIDADO DE SOYA	0,0005	1	0,0005	0,40	0,5540
C:AZODICARBONAMIDA	0,0287	1	0,0287	25,61	0,0039
AA	0,0004	1	0,0004	0,34	0,5847
AB	0,0000	1	0,0000	0,00	0,9887
AC	0,0004	1	0,0004	0,32	0,5947
BB	0,0001	1	0,0001	0,12	0,7478
BC	0,0001	1	0,0001	0,10	0,7663
CC	0,0010	1	0,0010	0,86	0,3958
Error total	0,00560	5	0,0011		
Total (corr.)	0,08048	14			

R-cuadrada = 93,0435%

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 80,5219 %

Error estándar del est. = 0,0334617

Error absoluto medio = 0,0163111

Estadístico Durbin-Watson = 2,39875 (P=0,7569)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,235464

La ecuación 5 corresponde a la ecuación de regresión ajustada a los datos que describe la relación entre la densidad y las tres variables independientes. El  $R^2$  explica el 93,04% de la variabilidad en la densidad de los compuestos de PVC – madera, el  $R^2$  ajustado presenta un valor de 80,52%, este estadístico es adecuado para la comparación de modelos con diferente número de variables independientes. El error estándar indica que la desviación estándar de los residuos es de 0,033, el error medio absoluto (MAE) tiene un valor de 0,0163 perteneciente al promedio de los residuos.

$$\begin{aligned}
 \text{DENSIDAD} \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) &= 1,6159 - 0,0129792 * A - 0,0035625 * B - 0,558125 * C + 0,000101667 \\
 &* A^2 + 0,0000025 * A * B + 0,00475 * A * C + 0,0000591667 * B^2 \\
 &- 0,002625 * B * C + 0,404167 * C^2
 \end{aligned}$$

**Ecuación 5.** Modelo ajustado para la densidad  $\left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right)$ .

#### 4.5.2. Análisis ANOVA para la deformación por compresión (mm).

La tabla 24 expone el análisis de varianza para la deformación por compresión de los compuestos de PVC – madera, en este análisis se obtiene un efecto con un valor P menor que 0,05, el efecto lineal de C, se concluye que los factores A y B no son influyentes y pueden ser considerados como no significativos, es decir la deformación que presente el compuesto luego de ser sometido a la prueba de compresión es independiente de la cantidad de residuos de madera y aceite epoxidado de soya que contenga el mismo, siendo la cantidad de azodicarbonamida determinante para una mayor o menor deformación del material.

**Tabla 24**

*Análisis de varianza (ANOVA) para la deformación por compresión (mm).*

<b>Fuente</b>	<b>Suma de Cuadrados</b>	<b>Gl</b>	<b>Cuadrado Medio</b>	<b>Razón-F</b>	<b>Valor-P</b>
A:RESIDUOS DE MADERA	0,0234	1	0,0234	3,06	0,1409
B:ACEITE EPOXIDADO DE SOYA	0,0000	1	0,0000	0,01	0,9449
C:AZODICARBONAMIDA	0,1131	1	0,1131	14,74	<b>0,0121</b>
AA	0,0143	1	0,0143	1,87	0,2302
AB	0,0001	1	0,0001	0,01	0,9264
AC	0,0156	1	0,0156	2,04	0,2128
BB	0,0126	1	0,0126	1,65	0,2556
BC	0,0003	1	0,0003	0,04	0,8580
CC	0,0125	1	0,0125	1,63	0,2573
Error total	0,03835	5	0,0077		
Total (corr.)	0,23258	14			

R-cuadrada = **83,5126** %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = **53,8352** %

Error estándar del est. = **0,0875743**

Error absoluto medio = **0,0412333**

Estadístico Durbin-Watson = 1,85462 (P=0,3473)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,0215524

La ecuación 6 corresponde a la ecuación de regresión ajustada a los datos que describe la relación entre la deformación por compresión y las tres variables independientes. El  $R^2$  explica el 83,51% de la variabilidad en la deformación por compresión de los compuestos de PVC – madera, el  $R^2$  ajustado presenta un valor de 53,83% siendo el 46,17% restante perteneciente a variables no estudiadas, variables en niveles fijos y errores experimentales. El error estándar indica que la desviación estándar de los residuos es de 0,0875, el error medio absoluto (MAE) tiene un valor de 0,0412 perteneciente al promedio de los residuos.

*DEFORMACIÓN POR COMPRESIÓN (mm)*

$$\begin{aligned} &= -0,110125 - 0,0275875 * A + 0,0344875 * B - 1,02812 * C \\ &+ 0,0006225 * A^2 - 0,0000425 * A * B + 0,03125 * A * C - 0,000585 * B^2 \\ &+ 0,004125 * B * C + 1,45625 * C^2 \end{aligned}$$

**Ecuación 6.** Modelo ajustado para la deformación por compresión (mm).

**4.5.3. Análisis ANOVA para la dureza (Shore D).**

La tabla 25 expone el análisis de varianza para la dureza (Shore D) de los compuestos de PVC–madera, en este análisis se obtienen 2 efectos con un valor P menor que 0,05, siendo el efecto lineal de A y C estadísticamente significativos, se concluye que el factor B no es influyente y puede ser considerado como no significativo, es decir la dureza que presente el compuesto es independiente de la cantidad de aceite epoxidado de soya, por lo tanto la cantidad de residuos de madera y azodicarbonamida son determinantes para la dureza del compuesto extruido.

**Tabla 25**

*Análisis de varianza (ANOVA) para la dureza (shore d).*

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:RESIDUOS DE MADERA	57,7812	1	57,7812	8,03	0,0365
B:ACEITE EPOXIDADO DE SOYA	1,0513	1	1,0513	0,15	0,7180
C:AZODICARBONAMIDA	228,9800	1	228,9800	31,81	0,0024
AA	1,1001	1	1,1001	0,15	0,7119
AB	0,0625	1	0,0625	0,01	0,9294
AC	1,0000	1	1,0000	0,14	0,7246
BB	0,0108	1	0,0108	0,00	0,9706
BC	0,2500	1	0,2500	0,03	0,8595
CC	1,0016	1	1,0016	0,14	0,7244
Error total	35,9892	5	7,1978		
Total (corr.)	327,1290	14			

R-cuadrada = 88,9985 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 69,1958 %

Error estándar del est. = 2,68288

Error absoluto medio = 1,22556

Estadístico Durbin-Watson = 1,47522 (P=0,1220)

Autocorrelación residual de Lag 1 = 0,229705

La ecuación 7 corresponde a la ecuación de regresión ajustada a los datos que describe la relación entre la dureza y las tres variables independientes. El  $R^2$  explica el 88,99% de la variabilidad en la dureza (Shore D) de los compuestos de PVC – madera, el  $R^2$  ajustado presenta un valor de 69,19 %. El error estándar indica que la desviación estándar de los residuos es de 2,682, el error medio absoluto (MAE) tiene un valor de 1,225 perteneciente al promedio de los residuos.

*DUREZA (Shore D)*

$$= 77,4365 - 0,0129167 * A + 0,01625 * B - 10,1875 * C - 0,00545833 * A^2 + 0,00125 * A * B - 0,25 * A * C + 0,000541667 * B^2 - 0,125 * B * C - 13,0208 * C^2$$

**Ecuación 7.** Modelo ajustado para la dureza (Shore D).

#### **4.5.4. Análisis ANOVA para la profundidad de abolladura (mm).**

La tabla 26 expone el análisis de varianza para la profundidad de abolladura de los compuestos de PVC – madera, en este análisis se obtienen 3 efectos con un valor P menor que 0,05, los factores estadísticamente significativos son: el efecto lineal de C, el efecto cuadrático de A y el efecto del producto de A con B, es decir, la cantidad de azodicarbonamida que contenga el material extruido influye en la profundidad de abolladura luego de realizarse la prueba de impacto, sin embargo, se observa que este factor no es influyente al relacionarse con los demás factores, por otro lado los factores residuos de madera y aceite epoxidado de soya son influyentes al relacionarse entre sí.

Tabla 26

Análisis de varianza (ANOVA) para la profundidad de abolladura (mm).

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A:RESIDUOS DE MADERA	0,0890	1	0,0890	1,01	0,3604
B:ACEITE EPOXIDADO DE SOYA	0,4851	1	0,4851	5,52	0,0656
C:AZODICARBONAMIDA	7,5311	1	7,5311	85,66	0,0002
AA	0,6131	1	0,6131	6,97	0,0459
AB	0,8372	1	0,8372	9,52	0,0273
AC	0,0094	1	0,0094	0,11	0,7568
BB	0,1723	1	0,1723	1,96	0,2205
BC	0,0219	1	0,0219	0,25	0,6389
CC	0,0415	1	0,0415	0,47	0,5227
Error total	0,4396	5	0,0879		
Total (corr.)	10,1672	14			

R-cuadrada = 95,6764 %

R-cuadrada (ajustada por g.l.) = 87,8939 %

Error estándar del est. = 0,296511

Error absoluto medio = 0,152133

Estadístico Durbin-Watson = 2,08841 (P=0,5288)

Autocorrelación residual de Lag 1 = -0,117016

La ecuación 8 corresponde a la ecuación de regresión ajustada a los datos que describe la relación entre la profundidad de abolladura y las tres variables independientes. El  $R^2$  explica el 95,67% de la variabilidad en la profundidad de abolladura (mm) de los compuestos de PVC – madera, el  $R^2$  ajustado presenta un valor de 87,89%. El error estándar indica que la desviación estándar de los residuos es de 0,2965, el error medio absoluto (MAE) tiene un valor de 0,152 perteneciente al promedio de los residuos.

*PROFUNDIDAD DE ABOLLADURA (mm)*

$$= 5,16487 - 0,022475 * A - 0,024575 * B + 1,66625 * C + 0,004075 * A^2 - 0,004575 * A * B + 0,02425 * A * C + 0,00216B^2 + 0,037 * B * C + 2,65 * C^2$$

**Ecuación 8.** Modelo ajustado para la profundidad de abolladura (mm).

#### 4.6. Análisis de efectos estandarizados.

##### 4.6.1. Análisis de efectos estandarizados para la densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

El análisis de efectos estandarizados permite evaluar los efectos de cada factor y sus respectivas interacciones. La gráfica de probabilidad para la densidad se muestra en la figura 30, en el análisis de esta gráfica los efectos e interacciones que se localizan en una posición alejada de la línea son considerados más significativos a diferencia de los que se encuentran cerca de la misma, siendo para este caso los residuos de madera y azodicarbonamida los factores que mayor interacción presentan.

El diagrama de Pareto ilustrado en la figura 31 muestra que los factores más significativos son: los residuos de madera y la azodicarbonamida, el signo negativo en ambos factores establece que la densidad disminuye al incrementar la cantidad de los mismos, el factor aceite epoxidado de soya y las interacciones no presentan efectos significativos.

En la gráfica de efectos principales, figura 32, se observa que los efectos de los residuos de madera y azodicarbonamida son inversamente proporcionales a la densidad como ya se mencionó anteriormente, para el caso del efecto del aceite epoxidado de soya no se observa ninguna correlación lineal.

**Figura 30**

Gráfica de probabilidad normal para la densidad  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

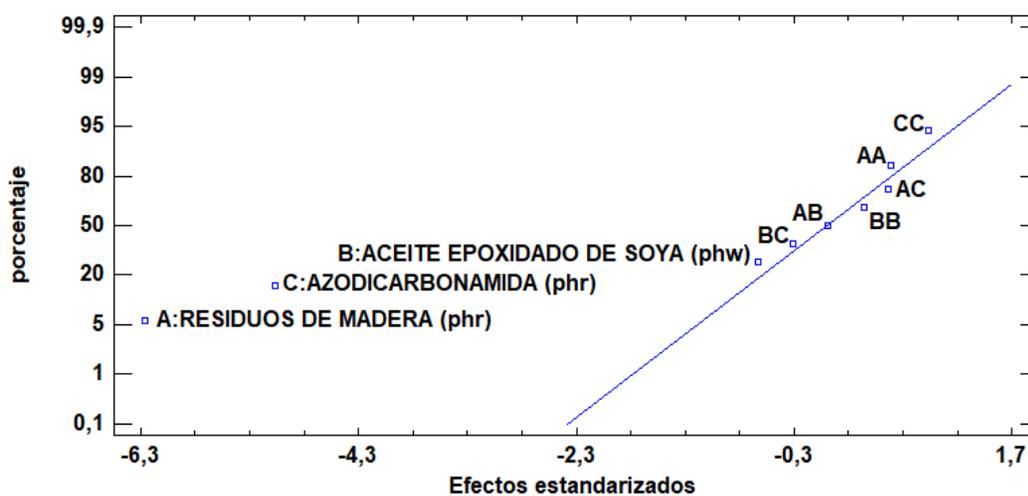


Figura 31

Diagrama de Pareto estandarizado para la densidad  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

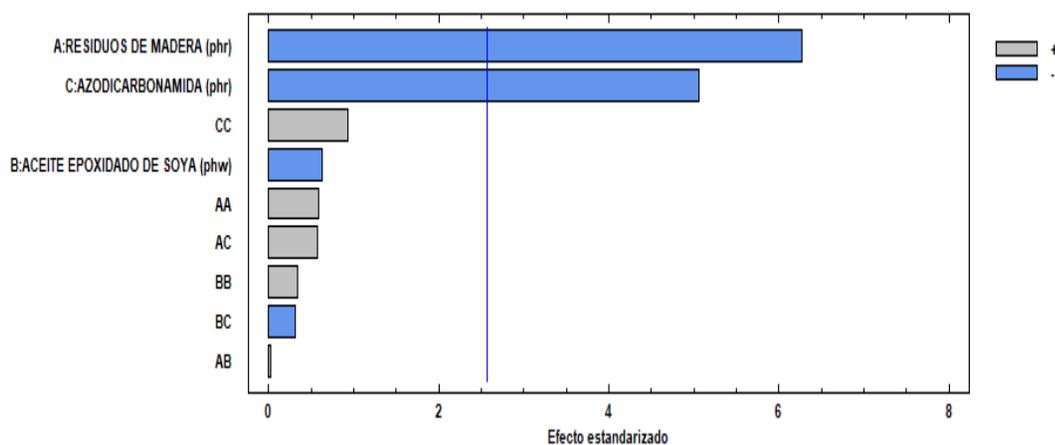
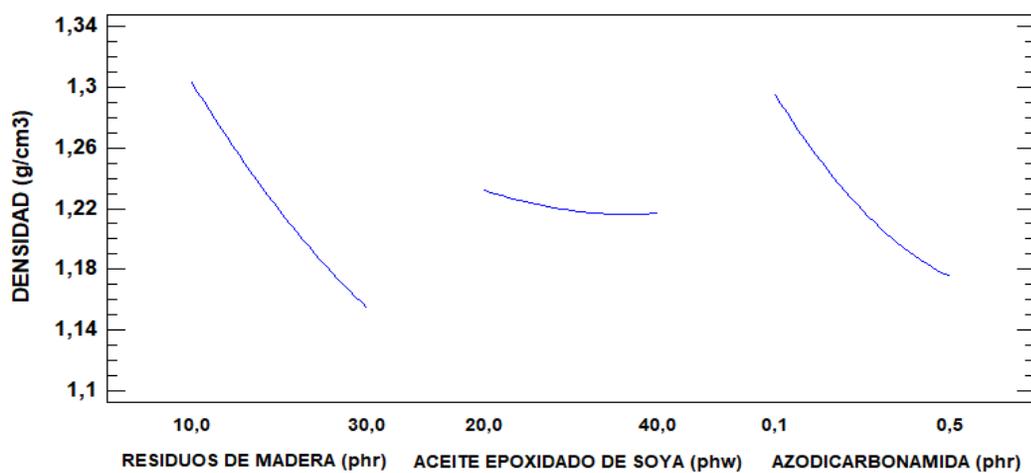


Figura 32

Gráfica de efectos principales para la densidad  $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .



#### **4.6.2. Análisis de efectos estandarizados para la deformación por compresión (mm).**

La figura 33 muestra la gráfica de probabilidad para la deformación por compresión, en el análisis de esta gráfica el factor que mayor interacción presenta es la azodicarbonamida debido a que se encuentra en una posición más alejada de la línea.

El diagrama de Pareto ilustrado en la figura 34 muestra que el factor de mayor importancia en la deformación por compresión del compuesto de PVC – madera es la azodicarbonamida, el signo positivo de este factor establece que la deformación se ve favorecida al incrementar la cantidad de azodicarbonamida, los demás factores e interacciones no presentan efectos significativos.

En la gráfica de efectos principales, figura 35, se observa que el efecto de la azodicarbonamida es directamente proporcional a la deformación por compresión, el efecto de los residuos de madera presenta un comportamiento similar, no obstante, la correlación lineal no es muy marcada, para el caso del efecto del aceite epoxidado de soya no se observa ninguna correlación lineal.

Figura 33

Gráfica de probabilidad normal para la deformación por compresión (mm).

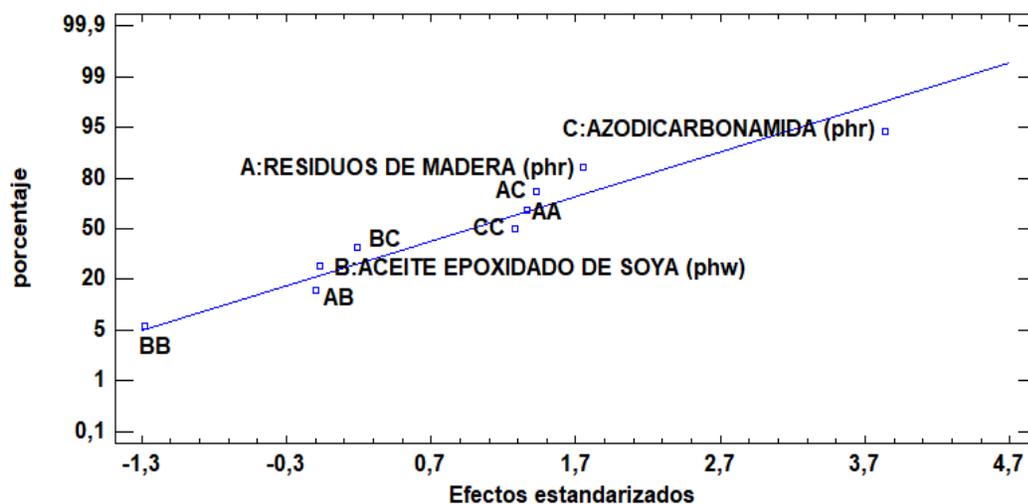


Figura 34

Diagrama de Pareto estandarizada para la deformación por compresión (mm).

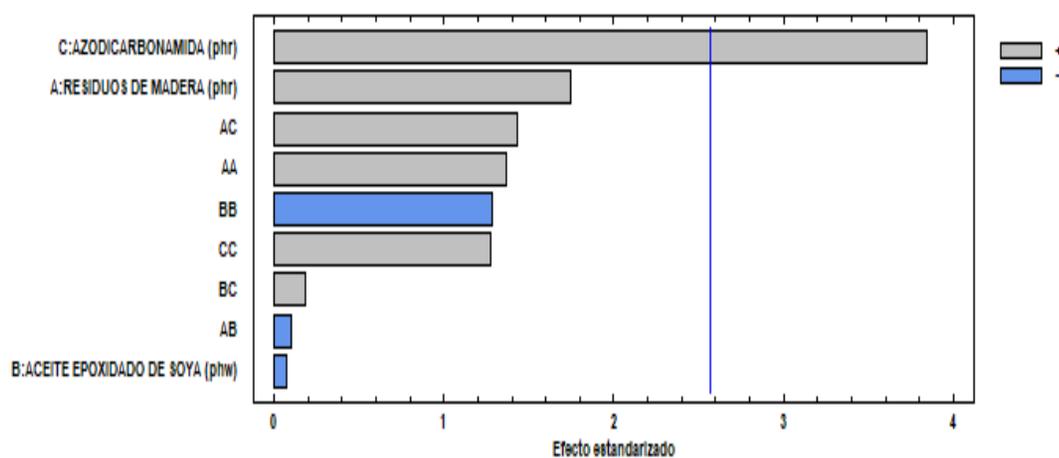
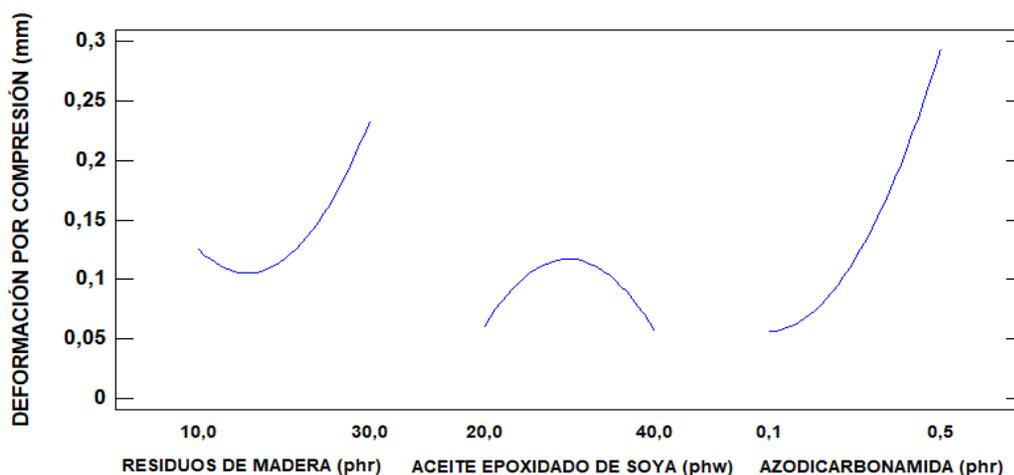


Figura 35

Gráfica de efectos principales para la deformación por compresión (mm).



#### 4.6.3. Análisis de efectos estandarizados para la dureza (Shore D).

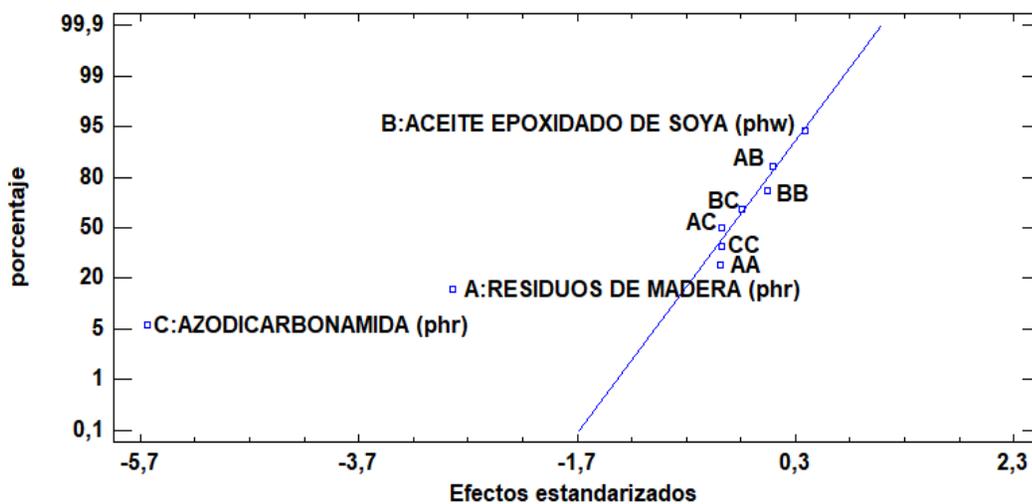
La figura 36 muestra la gráfica de probabilidad para la dureza (Shore D), en el análisis de esta gráfica los factores que mayor interacción presentan son: los residuos de madera y la azodicarbonamida, estos factores son más significativos debido a su posición alejada de la línea.

El diagrama de Pareto ilustrado en la figura 37 muestra que los factores más significativos son: los residuos de madera y la azodicarbonamida, presentando mayor importancia el factor azodicarbonamida en la dureza de los compuestos de PVC – madera, el signo negativo establece que la dureza disminuye al incrementar la cantidad de estos dos factores, el factor aceite epoxidado de soja y las interacciones no presentan efectos significativos.

En la gráfica de efectos principales, figura 38, se observa que el efecto de la azodicarbonamida es inversamente proporcional a la dureza, es decir la dureza disminuye al incrementar la cantidad de azodicarbonamida, el efecto de los residuos de madera presenta un comportamiento similar, en el caso del aceite epoxidado de soya no se observa correlación alguna.

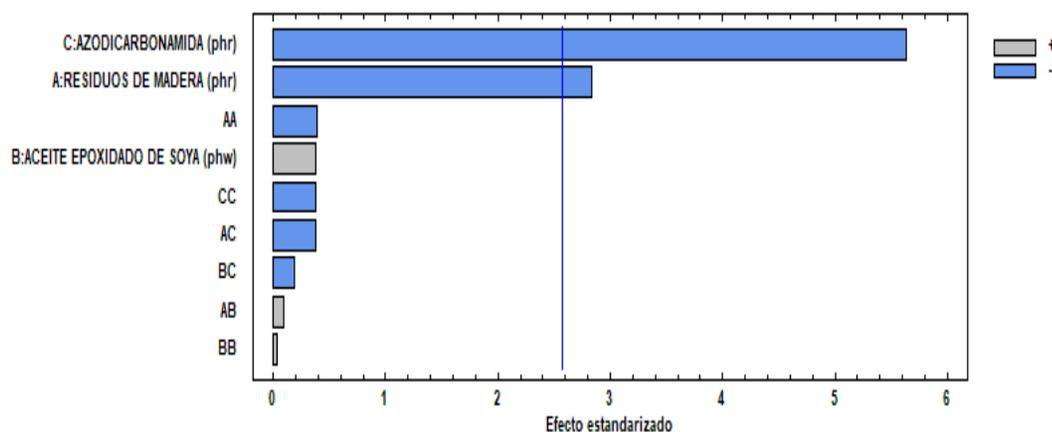
**Figura 36**

*Gráfica de probabilidad normal para la dureza (shore d).*

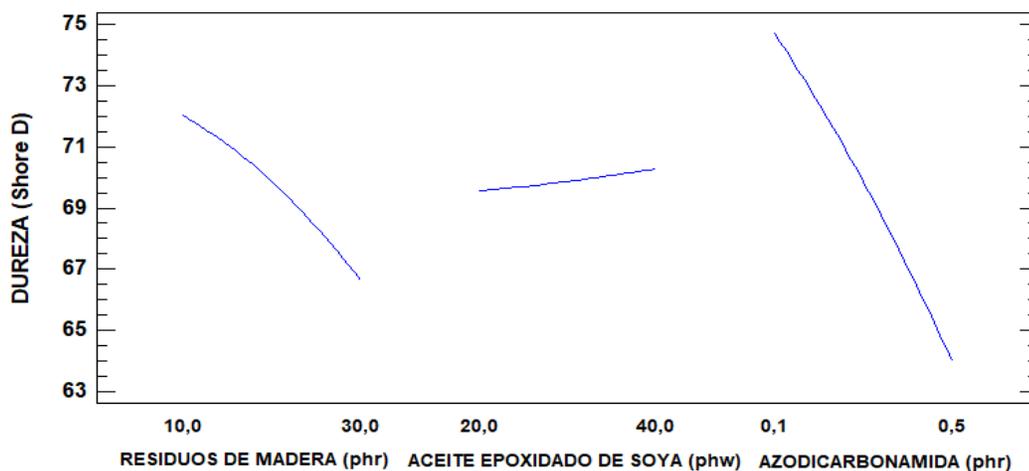


**Figura 37**

Diagrama de Pareto estandarizada para la dureza (shore d).

**Figura 38.**

Gráfica de efectos principales para la dureza (shore d).



#### 4.6.4. Análisis de efectos estandarizados para la profundidad de abolladura (mm).

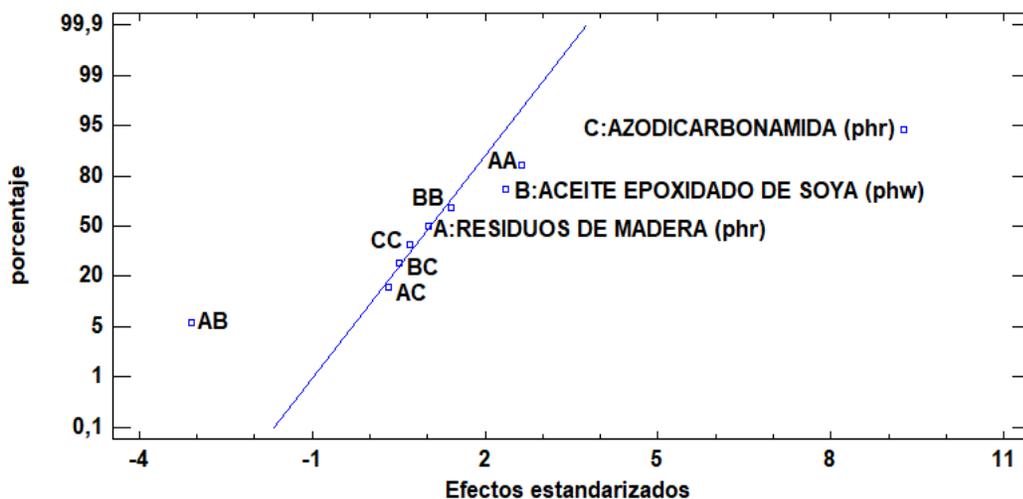
La figura 39 muestra la gráfica de probabilidad para la profundidad de abolladura (mm), en el análisis de esta gráfica el factor azodicarbonamida y la interacción AB son más significativos debido a que se encuentran en una posición alejada de la línea.

El diagrama de Pareto ilustrado en la figura 40 muestra que el factor azodicarbonamida, la interacción AB y AA son los más significativos, siendo la azodicarbonamida el factor de mayor importancia para la profundidad de abolladura en los compuestos de PVC – madera, el signo positivo de este factor y de la interacción AA establece que la profundidad de abolladura aumenta al incrementar la cantidad de estos factores, por otro lado la interacción AB presenta signo negativo el cual indica que al tratar los residuos de madera con el aceite epoxidado de soya el compuesto presentará una disminución en la profundidad de abolladura, esto se debe a un aumento en la adhesión interfacial entre el PVC y los residuos de madera tratados (Jang & Kim, 2016).

En la gráfica de efectos principales, figura 41, se observa que el efecto de la azodicarbonamida es directamente proporcional a la profundidad de abolladura, el efecto del aceite epoxidado de soya presenta un comportamiento similar pero su correlación lineal no se encuentra muy marcada, para el caso de los residuos de madera no se observa correlación alguna.

**Figura 39**

*Gráfica de probabilidad normal para la profundidad de abolladura (mm).*



**Figura 40**

*Diagrama de Pareto estandarizada para la profundidad de abolladura (mm).*

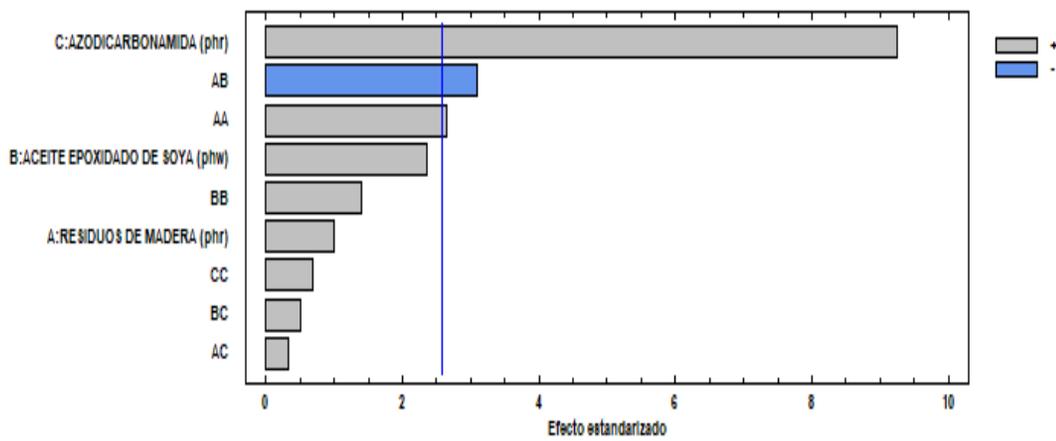
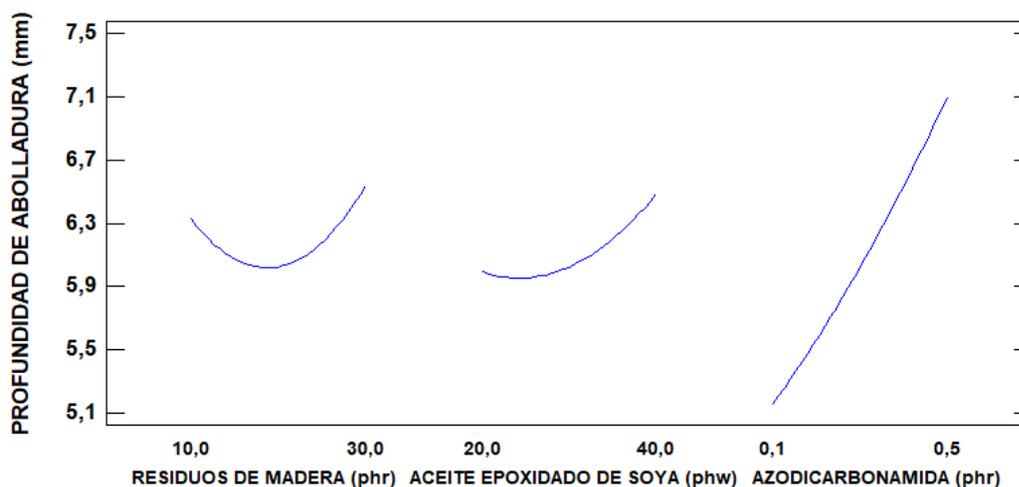


Figura 41

Gráfica de efectos principales para la profundidad de abolladura (mm).



#### 4.7. Análisis de la superficie de respuesta.

Para la construcción de las gráficas de superficie de respuesta con 3 factores se seleccionan 2 factores del diseño experimental que varían del nivel superior al inferior y se mantiene constante un factor en el nivel intermedio. Las zonas de colores dependen de los valores obtenidos en cada variable de respuesta, las tonalidades azules corresponden a valores inferiores mientras que las tonalidades rojas son asignadas a valores superiores.

##### 4.7.1. Análisis de la superficie de respuesta para la densidad $\left(\frac{g}{cm^3}\right)$ .

La figura 42 (a) explica el efecto de la cantidad de residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya sobre la densidad de los compuestos de PVC – madera, se observa claramente que al aumentar la cantidad de residuos de madera la densidad disminuye, lo que concuerda con los resultados obtenidos por (Mengelöglu & Matuana, 2001), esta disminución en la densidad se

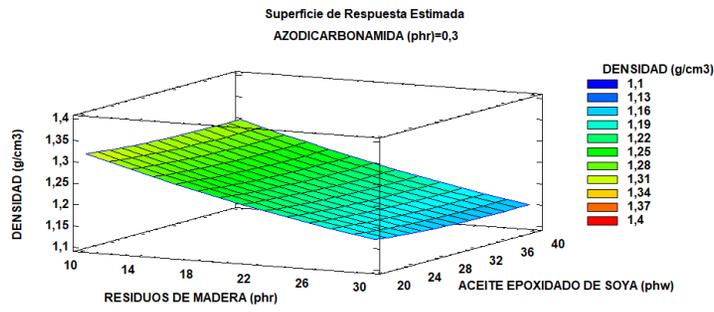
otorga al agua libre y/o ligada presente en la harina de madera que puede actuar también como agente espumante. Por otro lado el efecto que presenta el aceite epoxidado de soya es casi lineal.

La figura 42 (b) muestra el efecto de la cantidad de residuos de madera vs. azodicarbonamida, la gráfica indica el valor mínimo de densidad cuando ambos factores se encuentran presentes en sus máximos valores, correspondientes a 30 phr de residuos de madera y 0,5 phr de AZDC, indicando que son inversamente proporcionales a la densidad.

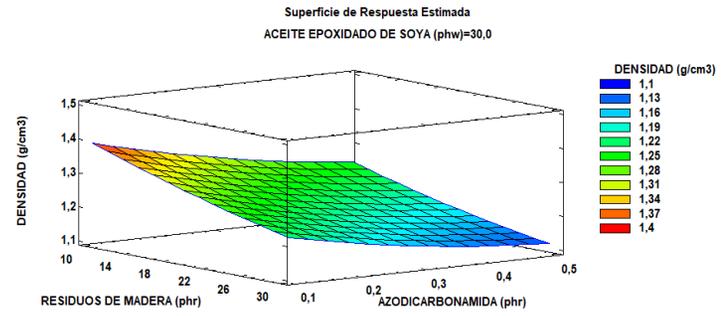
En la figura 42 (c) se exhibe el efecto del aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida, se observa una disminución de la densidad al aumentar la cantidad de AZDC independientemente de la cantidad de aceite epoxidado de soya suministrado, esto se debe a que AZDC es un agente espumante químico exotérmico que produce crecimiento celular generando principalmente nitrógeno, el cual presenta buena difusividad en la matriz de PVC, razón por la cual la densidad del compuesto final disminuye y por ende el costo de producción (Mengeloglu & Matuana, 2003). Con este resultado se infiere que la azodicarbonamida disminuyó su temperatura de liberación de gas gracias a la presencia de estearato en la formulación.

Figura 42

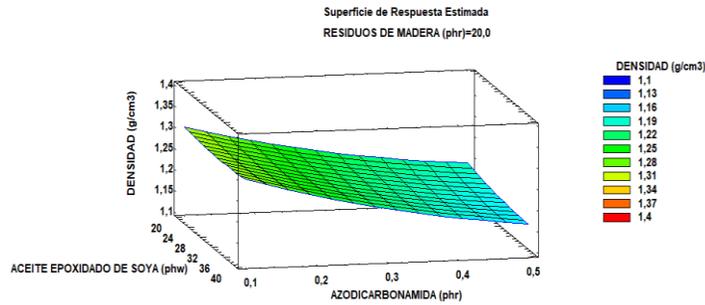
Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la densidad de los compuestos de PVC – madera



(a)



(b)



(c)

#### 4.7.2. Análisis de la superficie de respuesta para la deformación por compresión (mm).

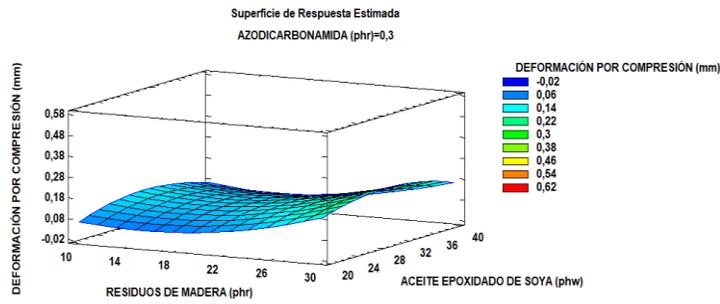
La figura 43 (a) muestra el efecto de los residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya sobre la deformación de los compuestos de PVC – madera luego de ser sometidos a una prueba de compresión. En la gráfica se puede percibir un ligero aumento en la deformación al incrementar la cantidad de residuos de madera, sin embargo, el efecto es poco relevante, indicando que la interacción entre estos dos factores no causa problemas de deformación en el compuesto, lo cual advierte que el factor de mayor importancia sobre la deformación es la azodicarbonamida.

La figura 43 (b) exhibe el efecto de los residuos de madera vs. azodicarbonamida, en esta gráfica se observa un alto incremento en la deformación por compresión con un valor superior a 0,4 mm en la región de 30 phr para residuos de madera y 0,4 a 0,5 phr de AZDC, evidenciando que la cantidad de AZDC es directamente proporcional a la deformación por compresión, además se indica que la tendencia de los residuos de madera es ligeramente lineal.

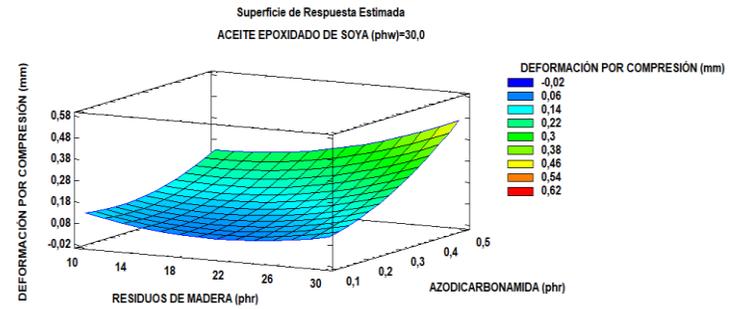
En la figura 43 (c) se indica el efecto del aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida, se observa una deformación superior a 0,25 mm en la región de 24 a 36 phw de aceite epoxidado de soya y 0,5 phr de AZDC, demostrando nuevamente que a mayor cantidad de AZDC mayor será la deformación producida en el compuesto luego de realizar la prueba de compresión, por lo tanto, para minimizar la deformación es primordial suministrar cantidades menores a 0,3 phr de AZDC.

Figura 43

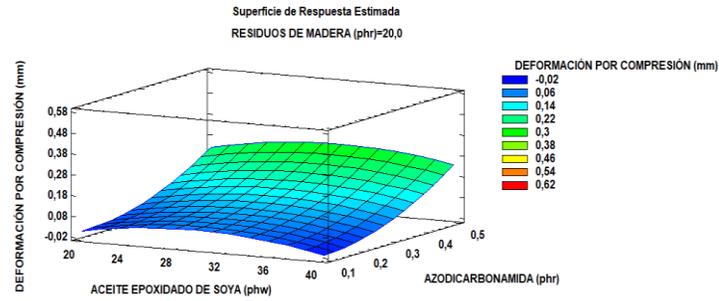
Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la deformación por compresión de los compuestos de PVC – madera.



(a)



(b)



(c)

#### 4.7.3. Análisis de la superficie de respuesta para la dureza (Shore D).

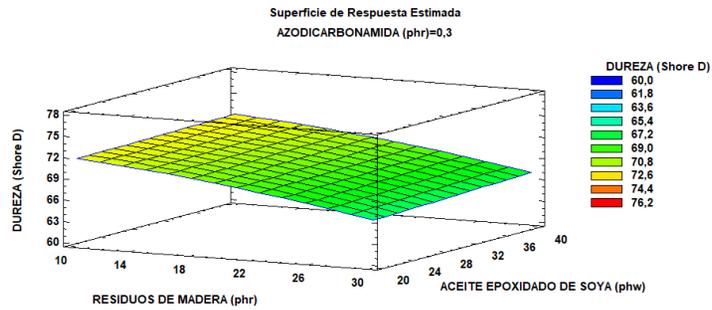
En la figura 44 (a) se muestra el efecto de los residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya sobre la dureza de los compuestos de PVC – madera, en la gráfica se observa una disminución de dureza al aumentar la cantidad de residuos de madera, el efecto que presenta el aceite epoxidado de soya es poco relevante siguiendo una tendencia casi lineal, esto destaca la limitada influencia del mismo en la dureza de los compuestos.

La gráfica 44 (b) explica el efecto de los residuos de madera vs. azodicarbonamida, se muestra el valor más alto de dureza cuando existe una menor cantidad de residuos de madera y AZDC, correspondientes a 10 phr y 0,1 phr, respectivamente, a medida que ambos aumentan la dureza tiende a disminuir, sin embargo, existe un efecto más marcado de disminución al aumentar AZDC,

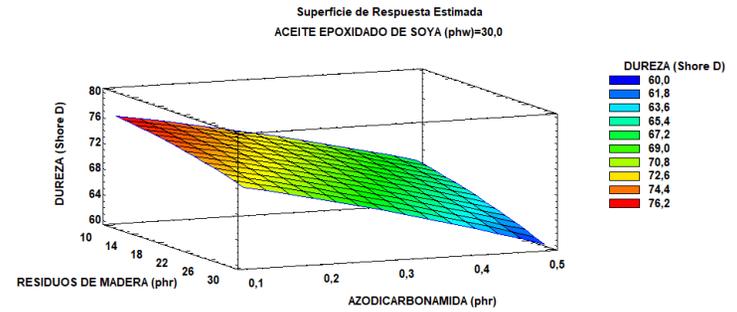
La gráfica 44 (c) muestra el efecto del aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida, en la gráfica se puede contemplar una dureza superior a 77 shore D en la región de 40 phw de aceite epoxidado de soya y 0,1 phr de AZDC, se observa un leve aumento en la dureza al aumentar la cantidad de aceite epoxidado de soya, pero al incrementar la cantidad de AZDC se muestra una gran disminución en la dureza, lo que era de esperarse debido a la formación de celdas en la matriz polimérica, se demuestra una vez más que el aceite epoxidado de soya no es un factor significativo en la dureza a diferencia de la azodicarbonamida que muestra ser el factor más importante.

Figura 44

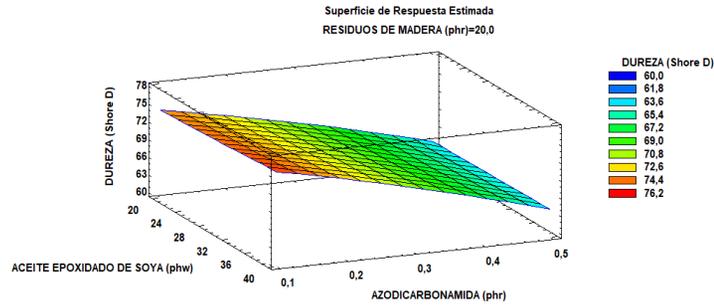
Superficie de respuesta estimada, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la dureza de los compuestos de PVC – madera.



(a)



(b)



(c)

#### 4.7.4. Análisis de la superficie de respuesta para la profundidad de abolladura (mm).

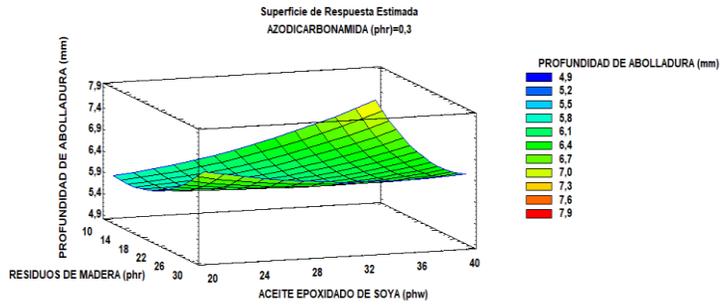
En la figura 45 (a) se puede apreciar el efecto de los residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya sobre la profundidad de abolladura en los compuestos de PVC – madera luego de ser sometidos a una prueba de impacto, en la gráfica se observa una profundidad menor a 5,5 mm en la región de 10 a 22 phr de residuos de madera y de 20 a 24 phw de aceite epoxidado de soya, probablemente en esta región existe una mejor interacción de los residuos de madera con el aceite epoxidado de soya y por ende el daño presentado es menor.

En la figura 45 (b) se muestra el efecto de los residuos de madera vs. azodicarbonamida, se observa una profundidad de abolladura inferior a 5 mm en la región de 14 a 26 phr de residuos de madera y de 0,1 a 0,15 phr de AZDC, en la gráfica se visualiza que al aumentar la cantidad de AZDC la profundidad de abolladura también aumenta, por otro lado se percibe una tendencia ligeramente lineal en los residuos de madera.

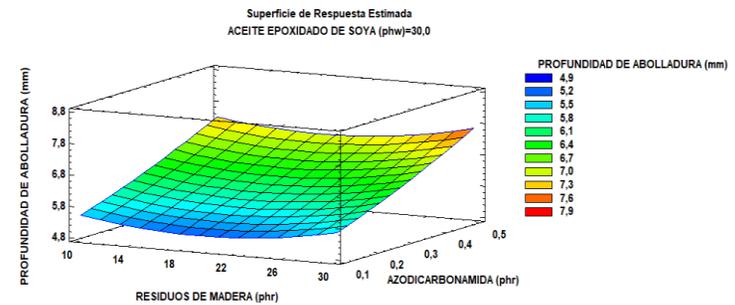
La figura 45 (c) explica el efecto del aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida, se puede apreciar que al incrementar la cantidad de AZDC en el compuesto, la profundidad de abolladura aumenta significativamente, mientras que el aceite epoxidado de soya presenta un comportamiento lineal, por lo que se concluye que el factor AZDC es el más importante, la disminución en la resistencia al impacto al aumentar la cantidad de AZDC se debe a la formación de celdas en la matriz polimérica, resultados similares son reportados por (Mengelolu & Matuana, 2003).

Figura 45

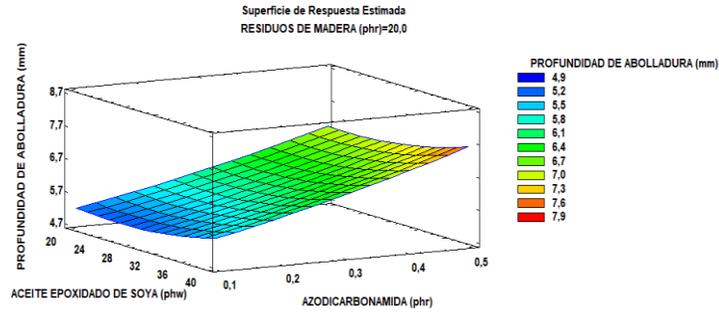
Superficie de respuesta, residuos de madera vs. aceite epoxidado de soya (a), residuos de madera vs. azodicarbonamida (b), aceite epoxidado de soya vs. azodicarbonamida (c), sobre la profundidad de abolladura de los compuestos de PVC – madera.



(a)



(b)



(c)

#### 4.8. Optimización de condiciones para la producción de compuestos de policloruro de vinilo (PVC) y residuos de madera.

Mediante el software estadístico Statgraphics se efectuó el análisis para encontrar el valor óptimo perteneciente a cada variable de respuesta y la respectiva combinación de los niveles de cada factor, como se muestra en la tabla 27. En la minimización de la densidad (1) se fija un valor óptimo de  $1,114 \left(\frac{g}{cm^3}\right)$ , para minimizar la deformación por compresión (2) se establece un valor óptimo de 0 mm, para la maximización de la dureza (3) se establece un valor óptimo de 76,857 (Shore D) y para minimizar la profundidad de abolladura (4) se establece un valor óptimo de 5,047 mm. Finalmente se obtiene el promedio de los niveles óptimos de cada factor para definir la fórmula que presente buenas propiedades mecánicas y un valor de densidad aceptable.

**Tabla 27**

*Puntos óptimos correspondientes a cada variable de respuesta.*

Factor	Bajo	Alto	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo	Óptimo
			1	2	3	4	promedio
Residuos de madera (phr)	10,00	30,00	29,993	21,016	10,223	14,541	18,943
Aceite epoxidado de soya (phw)	20,00	40,00	40,000	40,000	39,995	21,412	35,352
Azdc (phr)	0,10	0,50	0,500	0,100	0,100	0,100	0,200

En base al análisis realizado se concluye que las fórmulas cercanas al punto óptimo promedio son:

- **Fórmula 1:** 20 phr de madera, 30 phw aceite epoxidado de soya y 0,3 phr azodicarbonamida.
- **Fórmula 8:** 20 phr de madera, 40 phw de aceite epoxidado de soya y 0,1 phr azodicarbonamida.

El valor de residuos de madera encontrado en el punto óptimo promedio coincide con los resultados expresados por (Renshaw, 1975), donde especifica que los niveles de relleno en los WPC no deben exceder los 20 phr. (Boukerrou et al., 2012) en su investigación establece que para desarrollar compuestos de PVC – celulosa la cantidad óptima de aceite epoxidado de soya corresponde a 33 partes por cien de celulosa, este valor es muy similar al encontrado en este estudio de 35 partes por cien de madera. El valor de AZDC de 0,2 phr se encuentra en concordancia con el trabajo realizado por (Mengelglu & Matuana, 2001) donde se menciona que usar una pequeña cantidad de agente espumante en los compuestos de PVC – madera es un enfoque apropiado para producir compuestos con densidades bajas y evitar el fenómeno conocido como límite de contención de gas, en el cual el tamaño de la celda y el valor de densidad permanecen insensibles a la cantidad de agente espumante. Utilizar cantidades mayores a las recomendadas de agente espumante ocasionará problemas como dislocación de la superficie, problemas de control dimensional y dificultad en el procesamiento (Delgado & Medina, 2003).

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1. Conclusiones.

- La combinación de materiales derivados del petróleo y provenientes de base biológica conducen al desarrollo de un producto rentable, ecológico y renovable con diversas aplicaciones, como es el caso de los compuestos de PVC – madera, considerándose el empleo de residuos de madera viable económica y técnicamente, lo que representa una gran oportunidad para el aprovechamiento de residuos en el país.
- En base al análisis termogravimétrico de los residuos de madera se estableció que la temperatura máxima de procesamiento de los compuestos de PVC – madera no debe exceder los 200 °C, pues a partir de esta temperatura la madera comienza su proceso de degradación lo que conduce a malas propiedades mecánicas, además de un evidente deterioro en sus propiedades organolépticas.
- El análisis termogravimétrico de la azodicarbonamida mostró que su descomposición inicia a una temperatura aproximada de 220 °C, por lo que se consideró necesario la adición de un precursor como esterato para disminuir la temperatura de liberación de gas por debajo de los 200 °C.
- Por medio de investigación, experimentación y fórmulas propias de la empresa se determinó la fórmula para desarrollar compuestos de PVC, misma que sirvió como fórmula base para adicionar los residuos de madera, aceite epoxidado de soya y azodicarbonamida.

- Se comprobó que el tratamiento previo de los residuos de madera con aceite epoxidado de soja mejora el acoplamiento entre la matriz termoplástica de PVC y el refuerzo de residuos de madera, lo que permitió la obtención de muestras por extrusión de los compuestos de acuerdo al diseño experimental Box – Behnken.
- Se obtuvieron compuestos con buen acabado superficial y apariencia de madera que además presentaron mejoras en las propiedades físicas y mecánicas respecto al compuesto de PVC sin refuerzo, considerándose un posible producto de alto impacto en el sector de la construcción en aplicaciones estructurales y decorativas.
- El análisis estadístico permitió determinar los efectos de las variables independientes sobre las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos de PVC – madera. Los diagramas de Pareto para la densidad y para la dureza muestran un resultado similar, evidenciando que el efecto de los residuos de madera seguido de la azodicarbonamida son los más influyentes, al aumentar la cantidad de estos factores la densidad y dureza tienden a disminuir. Por otro lado los diagramas de Pareto para la deformación por compresión y para la profundidad de abolladura reflejan que el efecto de la azodicarbonamida es el más influyente en ambos casos, al aumentar la cantidad de AZDC la deformación por compresión y la profundidad de abolladura aumentan. Asimismo se evidenció que el efecto del aceite epoxidado de soja no tiene un efecto relevante en las propiedades físicas y mecánicas de los compuestos pero sí en el procesamiento.
- Para el desarrollo de la fórmula de los compuestos de PVC – madera que presente buenas propiedades físicas y mecánicas, el diseño experimental estableció las siguientes

condiciones óptimas: 18,94 phr de residuos de madera, 35,35 phw de aceite epoxidado de soya y 0,20 phr de azodicarbonamida.

## 5.2. Recomendaciones.

- Realizar investigaciones con otros tipos de desechos generados en el país como bagazo de caña de azúcar, abacá, bambú, cabuya, cáscara de guaba, cascarilla de arroz, fibra de coco, totora, etc. como refuerzo en compuestos de PVC reciclados, como tuberías defectuosas o desperdicios.
- La resistencia al impacto de los compuestos de PVC – madera dependen de la elección acertada del tipo y contenido del modificador de impacto, se recomienda utilizar el modificador de impacto reticulado metacrilato – butadieno – estireno (MBS) que resulta ser más eficaz y efectivo que el modificador no reticulado polietileno clorado (CPE), el rendimiento de resistencia al impacto inferior proporcionado por CPE se puede atribuir a su sensibilidad a condiciones de procesamiento extremas.
- Realizar un análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido (SEM) a los compuestos de PVC – madera para determinar las formas y tamaños de las celdas generadas por la azodicarbonamida en la matriz termoplástica.
- Realizar el análisis de la huella de carbono de los productos de PVC – madera para determinar el impacto que generan estos compuestos al medio ambiente.
- Se recomienda que los productos de PVC – madera cuyo uso sea en exteriores incluyan en la fórmula aditivos como estabilizadores UV y biocidas para extender la vida útil de los productos, posteriormente evaluar: la resistencia al envejecimiento UV, retención de color y resistencia al ataque de hongos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ashori, A. (2008). Wood–plastic composites as promising green-composites for automotive industries! *Bioresource Technology*, *99*(11), 4661-4667.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.09.043>
- Askeland, D. R., Fulay, P. P., & Wright, W. J. (2010). The science and engineering of materials. En *Cengage Learning*. [https://doi.org/10.1016/0921-5107\(92\)90012-X](https://doi.org/10.1016/0921-5107(92)90012-X)
- Aslan, N., & Cebeci, Y. (2007). Application of Box-Behnken design and response surface methodology for modeling of some Turkish coals. *Fuel*, *86*(1-2), 90-97.  
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.06.010>
- ASTM D143. (2014). Standar Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. *American Society for Testing and Materials*, *3*, 1-14. <https://doi.org/10.1520/D0143-14.2>
- ASTM D7031. (2011). Standard Guide for Evaluating Mechanical and Physical Properties of Wood- Plastic Composite Products. *American Society for Testing and Materials*, 1-8.  
<https://doi.org/10.1520/D7031-11.2>
- ASTM D7136/D7136M. (2015). Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event. *American Society for Testing and Materials*, 1-16. <https://doi.org/10.1520/D7136>
- ASTM D792. (2013). Standard Test Methods for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement. *American Society for Testing and Materials*, *15*(3), 145-149.  
<https://doi.org/10.1520/D0792-13.2>
- Beltrán, M., & Marcilla, A. (s. f.-a). Tema 1. Estructura y propiedades de los polímeros. En

*Tecnología de polímeros* Polímeros (pp. 1-42).

Beltrán, M., & Marcilla, A. (s. f.-b). Tema 2. tipos de plásticos, aditivación y mezclado. En *Tecnología de polímeros* (pp. 1-30). Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema2.pdf>

Bezerra, M. A., Santelli, R. E., Oliveira, E. P., Villar, L. S., & Escaleira, L. A. (2008). Response surface methodology (RSM) as a tool for optimization in analytical chemistry. *Talanta*, 76(5), 965-977. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2008.05.019>

Billmeyer, F. w. (2004). *Ciencia de los polímeros* (Reverté, Ed.). Recuperado de [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=vL9QrpOKsQcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=polimeros&ots=yxPxffxtxl&sig=jab1RnbqrJZBc548vWtlfbgSG1w&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=vL9QrpOKsQcC&oi=fnd&pg=PA1&dq=polimeros&ots=yxPxffxtxl&sig=jab1RnbqrJZBc548vWtlfbgSG1w&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Bledzki, A. K., & Faruk, O. (2006). Microcellular injection molded wood fiber-PP composites: Part I - Effect of chemical foaming agent content on cell morphology and physico-mechanical properties. *Journal of Cellular Plastics*, 42(1), 63-76. <https://doi.org/10.1177/0021955X06060945>

Bonilla, M. (2016). Estudio Comparativo de aditivos para compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales. Universidad de los Andes.

Borah, J. S., & Kim, D. S. (2016). Recent development in thermoplastic/wood composites and nanocomposites: A review. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 33(11), 3035-3049. <https://doi.org/10.1007/s11814-016-0183-6>

Boukerrou, A., Beztout, M., Djidjelli, H., Krim, S., & Hammiche, D. (2012). The effect of chemical treatment of cellulose with epoxidized soybean oil (ESO) on the properties PVC/cellulose

composites. *Molecular Crystals and Liquid Crystals*, 556(August 2013), 223-232.

<https://doi.org/10.1080/15421406.2012.635966>

Bouza-Padín, R. (2008). Diseño Y Caracterización De Nuevos Materiales Compuestos

Polipropileno Y Madera : Estudio Del Viniltrimetoxisilano como agente de acoplamiento.

Universidad de A Coruña.

Bueno-Ferrer, C. (2012). Bio-compuestos termoplásticos basados en aceites vegetales. Estudio de su aplicabilidad al envasado de alimentos. Universidad de Alicante.

Bueno-Ferrer, C., Garrigós, M. C., & Jiménez, A. (2010). Characterization and thermal stability of poly(vinyl chloride) plasticized with epoxidized soybean oil for food packaging. *Polymer Degradation and Stability*, 95(11), 2207-2212.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2010.01.027>

Bueno-Ferrer, C., Garrigós, M. C., & Jiménez, A. (2012). Polymer degradation and stability.

*Polymer Degradation and Stability*, 97(2), 166-169.

<https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.10.021>

Chaochanchaikul, K., & Sombatsompop, N. (2011). Stabilizations of Molecular Structures and

Mechanical Properties of PVC and Wood/PVC Composites by Tinuvin and TiO<sub>2</sub> Stabilizers.

*Polymer engineering and science*. <https://doi.org/10.1002/pen>

Cruz, K., Montañez, J., Aguilar, C., Sáenz, A., Gámez, I., & Flores, E. (2015). Obtención De Aceite

Epoxidado De Semilla De Algodón Utilizando Un Ácido Débil. *Avances en Ciencias e*

*Ingeniería*, 6(4), 11-18.

Dávila, J. L., Galeas, S., Guerrero, V. H., Pontón, P., Rosas, N. M., Sotomayor, V., & Valdivieso, C.

(2011). *Nuevos materiales. Aplicaciones Estructurales e Industriales*. (V. H. Guerrero, Ed.). Quito.

Delgado Neira, O. F. (2003). *Diseño de proceso en la extrusión de perfiles espumados de material compuesto con matriz termoplástica y refuerzo lignocelulósico*. Universidad de los Andes.

Delgado, O. F., & Medina, J. A. (2003). Extrusión de perfiles espumados de madera plástica. *Revista de Ingeniería*, 0(18), 56. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i18.480>

Deutsches Kunststoff-Institut. (2001). PVC-Origin, Growth, and Future. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 7(4), 168-176.

Disson, J. P., & Girois, S. (2003). Acrylic process aids for PVC: From theoretical concepts to practical use. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9(4), 177-187.  
<https://doi.org/10.1002/vnl.10081>

Djijdjelli, H., Kaci, M., Martinez-Vega, J. J., & Benachour, D. (2004). Effects of hydrothermal ageing on the thermal behaviour of poly(vinyl chloride) filled with wood flour. *Polymer International*, 53(11), 1760-1765. <https://doi.org/10.1002/pi.1572>

Dwivedi, D. (s. f.). Wood plastic composites market by type and application - Global opportunity analysis and industry forecast, 2017 - 2023. Recuperado 21 de abril de 2020, de <https://www.alliedmarketresearch.com/wood-plastic-composite-market>

Ferreira, S. L. C., Bruns, R. E., Ferreira, H. S., Matos, G. D., David, J. M., Brandão, G. C., ... dos Santos, W. N. L. (2007). Box-Behnken design: An alternative for the optimization of analytical methods. *Analytica Chimica*, 597(2), 179-186.  
<https://doi.org/10.1016/j.aca.2007.07.011>

- Folarin, O. M., & Sadiku, E. R. (2011). Thermal stabilizers for poly(vinyl chloride): A review. *International Journal of Physical Sciences*, 6(18), 4323-4330.  
<https://doi.org/10.5897/IJPS11.654>
- Fonseca, M. R. (2006). Determinación de la composición química de la madera de pino candelillo (*Pinus maximinoi* H. E. Moore) procedente de la finca río frío, tactic, alta verapaz. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Guastaferro, F. (s. f.). Tuberías y Perfiles de PVC. En *Plásticos Petroquímicos*. Investigación y desarrollo, C.A.
- Guffey, V., & Sabbagh, A. (2002). PVC/Wood-Flour Composites Compatibilized With Chlorinated Polyethylene. *Journal of Vinyl Additive Technology*, 8(4), 259-263.
- Hajji, P., Marchand, F., & Pirri, R. (2008). Wood-PVC composites: Formulation optimisation. *Plastics, Rubber and Composites*, 37(9-10), 388-391.  
<https://doi.org/10.1179/174328908X356527>
- Halberstadt, J. (s. f.). Ecuador Explorer Deforestación en Ecuador - Extinción de especies en Ecuador. Recuperado 10 de noviembre de 2019, de <http://www.ecuadorexplorer.com/es/html/deforestacion-y-perdida-de-especies.html>
- Huertas-García, R., Gázquez-Abad, J. C., Martínez-López, F. J., & Esteban-Millat, I. (2014). Propuesta metodológica mediante diseños Box-Behnken para mejorar el rendimiento del análisis conjunto en estudios experimentales de mercado. *Revista Española de Investigación de Marketing ESIC*, 18(1), 57-66. [https://doi.org/10.1016/s1138-1442\(14\)60006-1](https://doi.org/10.1016/s1138-1442(14)60006-1)

- Impact Plastics. (2018). Comprensión de su hoja de datos: densidad y gravedad específica. Recuperado 26 de marzo de 2020, de <http://blog.impactplastics.com/blog/understanding-your-data-sheet-density-and-specific-gravity>
- Jang, S. Y., & Kim, D. S. (2016). Physical properties of polypropylene composites with hydrophobized cellulose powder by soybean oil. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(6), 1-8. <https://doi.org/10.1002/app.42929>
- Jiang, H., & Kamdem, D. P. (2004a). Development of poly(vinyl chloride)/wood composites. A literature review. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 10(2), 59-69. <https://doi.org/10.1002/vnl.20009>
- Jiang, H., & Kamdem, D. P. (2004b). Effects of copper amine treatment on mechanical properties of PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 10(2), 70-78. <https://doi.org/10.1002/vnl.20010>
- Khalil, H. P. S. A., Tehrani, M. A., Davoudpour, Y., Bhat, A. H., Jawaid, M., & Hassan, A. (2013). Natural fiber reinforced poly(vinyl chloride) composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 32(5), 330-356. <https://doi.org/10.1177/0731684412458553>
- Kim, J. K., & Pal, K. (2010). Process and Machinery Used for WPC. *Recent Advances in the Processing of Wood-Plastic Composites, Engineering Materials*, 59-75. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-14877-4_3)
- Kositchaiyong, A., Rosarpitak, V., Hamada, H., & Sombatsompop, N. (2014). Anti-fungal performance and mechanical-morphological properties of PVC and wood/PVC composites under UV-weathering aging and soil-burial exposure. *International Biodeterioration and*

*Biodegradation*, 91, 128-137. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.01.022>

Liu, Z., Erhan, S. Z., Akin, D. E., & Barton, F. E. (2006). «Green» composites from renewable resources: Preparation of epoxidized soybean oil and flax fiber composites. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 54(6), 2134-2137. <https://doi.org/10.1021/jf0526745>

Liu, Z., Erhan, S. Z., & Calvert, P. D. (2004). Solid freeform fabrication of soybean oil-based composites reinforced with clay and fibers. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 81(6), 605-610. <https://doi.org/10.1007/s11746-006-0949-9>

Martínez-López, Y., Benigno-Paes, J., & Martínez-Rodríguez, E. (2018). Propiedades ignífugas de tableros de madera plástica producidos con diferentes especies forestales y termoplásticos reciclados. *Madera y Bosques*, 24(2), 1-10. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421495>

Matuana, L. M., & Mengelöglu, F. (2002). *Manufacture of Rigid PVC / Wood-Flour Composite Foams*. 8(4), 264-270.

Mengelöglu, F., & Matuana, L. M. (2001). Foaming of Rigid PVC/Wood- Flour Composites Through a Continuous Extrusion Process. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 7(3), 142-148.

Mengelöglu, F., & Matuana, L. M. (2003). Mechanical properties of extrusion-foamed rigid PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 9(1), 26-31. <https://doi.org/10.1002/vnl.10058>

Mengelöglu, F., Matuana, L. M., & King, J. A. (2000). Effects of impact modifiers on the properties of rigid PVC/wood-fiber composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 6(3), 153-157.

- Mettler-Toledo. (2014). *Instrucciones de manejo Moisture Analyzer HB43-S*. 72.
- Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y análisis de experimentos Douglas C. Montgomery* (Segunda ed; Grupo Noriega, Ed.). México.
- Müller, M., Gellerich, A., Militz, H., & Krause, A. (2013). Resistance of modified polyvinyl chloride/wood flour composites to basidiomycetes. *European Journal of Wood and Wood Products*, 71(2), 199-204. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0665-8>
- NTE INEN- ISO 868. (2014). Plásticos y Ebonita. Determinación de la Dureza de Indentación por Medio de un Durómetro (Dureza Shore) (ISO 868:2003, IDT). *Instituto Ecuatoriano de Normalización*.
- Patterson, J. (2001). New opportunities with wood-flour-foamed PVC. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 7(3), 138-141.
- Rabinovitch, E. B., Lacatus, E., & Summers, J. W. (1984). The lubrication mechanism of calcium stearate/paraffin wax systems in PVC compounds. *Journal of Vinyl Technology*, 6(3), 98-103. <https://doi.org/10.1002/vnl.730060303>
- Rahmah, M., Mohd Nurazzi, N., Nordyana, A. R. F., & Anas, S. M. S. (2017). Effect of epoxidised soybean oil loading as plasticiser on physical, mechanical and thermal properties of polyvinylchloride. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 223(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/223/1/012048>
- Renshaw, J. T. (1975). Parameters Affecting the Processability of Vinyl Foams. *Am Chem Soc Div Org Coatings Plast Chem Prepr*, 35(n), 3-12. <https://doi.org/10.1080/03602557608063102>
- Rice, W., Turpin, J., Huang, M., David, C., Buckheit, R., Covell, D., ... Sausville, E. (1997).

- Azodicarbonamide inhibits HIV-1 replication by targeting the nucleocapsid protein. *Nature Publishing Group*, 4, 341-345. <https://doi.org/10.1038/nm0798-822>
- Rizvi, G. M., Guo, G., Kim, Y. S., & Park, C. B. (2005). Critical issues in extrusion foaming of plastic/woodfiber composites. *Annual Technical Conference - ANTEC, Conference Proceedings*, 2(6), 13-19.
- Rocha, N., Kazlauciusas, A., Gil, M. H., Gonçalves, P. M., & Guthrie, J. T. (2009). Poly(vinyl chloride)-wood flour press mould composites: The influence of raw materials on performance properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 40(5), 653-661. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.02.022>
- Saurabh, T., Patnaik, M., Bhagt, S. L., & Renge, V. C. (2011). Epoxidation of vegetable oils: A Review. *International Journal of Advanced Engineering Technology*, 2(Iv), 491-501.
- Shah, B. L., Matuana, L. M., & Heiden, P. A. (2005). Novel coupling agents for PVC/wood-flour composites. *Journal of Vinyl and Additive Technology*, 11(4), 160-165. <https://doi.org/10.1002/vnl.20056>
- Shebani, A. N., van Reenen, A. J., & Meincken, M. (2009). The effect of wood extractives on the thermal stability of different wood composites. *Thermochimica Acta*, 481(1-2), 52-56. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2008.10.008>
- Soares, F. A., & Nachtigall, S. M. B. (2013). Effect of chemical and physical foaming additives on the properties of PP/wood flour composites. *Polymer Testing*, 32(4), 640-646. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2013.02.009>
- Sombatsompop, N., Chaochanchaikul, K., Phromchirasuk, C., & Thongsang, S. (2003). Effect of

wood sawdust content on rheological and structural changes, and thermo-mechanical properties of PVC/sawdust composites. *Polymer International*, 52(12), 1847-1855.

<https://doi.org/10.1002/pi.1386>

Spear, M. J., Eder, A., & Carus, M. (2015). Wood polymer composites. En *Wood Composites*.

<https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-454-3.00010-X>

Stadlbauer, W. (2010). *Wood Plastic Composites-Neues Eigenschaftsprofil durch Refinerfasern*.

Stevenson, J. C. (1995). Impact modifiers: Providing a boost to impact performance. *Journal of*

*Vinyl and Additive Technology*, 1(1), 41-45. <https://doi.org/10.1002/vnl.730010111.n>

Suarez, B. (2008). El PVC (Policloruro de Vinilo). *Universidad Católica de Argentina*, 1-23.

Taj, S., Munawar, M. A., & Khan, S. (2007). Natural fiber-reinforced polymer composites.

*Pakistan Academy of sciences*, (January 2007), 129-144.

Teischinger, A. (2016). Opportunities and limits of timber in construction. *WCTE 2016 - World*

*Conference on Timber Engineering*, (August).

Telégrafo, E. (s. f.). El Telégrafo - Noticias del Ecuador y del mundo - El control del plástico

avanza de forma lenta. Recuperado 21 de abril de 2020, de

<https://www.itelegrafo.com.ec/noticias/sociedad/6/control-plastico-ordenanza-modelo-quito-ecuador>

Tserki, V., Zafeiropoulos, N. E., Simon, F., & Panayiotou, C. (2005). A study of the effect of

acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. *Composites Part A:*

*Applied Science and Manufacturing*, 36(8), 1110-1118.

<https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.01.004>

- Vicuña-Vicuña, D. D. (2016). *Obtención de biocompuestos a partir de residuos de madera (sawdust) y resina termoplástica*. Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca.
- Waki, K., & Yamashita, T. (1972). The Thermal Decomposition of Azodicarbonamide. *Nippon Kagaku Kaishi*, 1972(12), 2359-2364. <https://doi.org/10.1246/nikkashi.1972.2359>
- Wu, Q., Lu, J. Z., & Mcnabb Jr, H. S. (2000). Chemical coupling in wood fiber and polymer composites : a review of coupling agents and treatments. *Wood and fiber science*, 32(1), 88-104.
- Xu, Y., Wu, Q., Lei, Y., Yao, F., & Zhang, Q. (2008). Natural fiber reinforced poly(vinyl chloride) composites: Effect of fiber type and impact modifier. *Journal of Polymers and the Environment*, 16(4), 250-257. <https://doi.org/10.1007/s10924-008-0113-8>
- Yáñez-Pacios, A. J. (2016). Tratamiento superficial de materiales compuestos de madera y plástico (WPCs) para mejorar sus propiedades de adhesión (Vol. 2). Universidad de Alicante.
- Young, R. A. (2008). Historical Developments in Wood Chemistry. *Turkish Journal of Forestry*, 1(0), 1-15. <https://doi.org/10.18182/tjf.85240>
- Young, R. J., & Lovell, P. A. (2011). *Introduction to Polymers* (CRC Press, Ed.).
- Zhang, Z. X., Gao, C., Xin, Z. X., & Kim, J. K. (2012). Effects of extruder parameters and silica on physico-mechanical and foaming properties of PP/wood-fiber composites. *Composites Part B: Engineering*, 43(4), 2047-2057. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.01.047>

# ANEXOS