

**EVALUACION DE FIBRAS VEGETALES CON POTENCIAL USO EN EL
DESARROLLO DE MATERIALES REFORZADOS – WOOD PLASTIC COMPOSITES
(WPC) EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO.**

EVELYN MARCELA SANTANDER RAMOS

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PASTO-NARIÑO**

2022

**EVALUACION DE FIBRAS VEGETALES CON POTENCIAL USO EN EL
DESARROLLO DE MATERIALES REFORZADOS – WOOD PLASTIC COMPOSITES
(WPC) EN EL DEPARTAMENTO DE NARIÑO.**

EVELYN MARCELA SANTANDER RAMOS

**Tesis de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniería Agroindustrial**

Asesor:

Ing. Esp. Rigoberto Rosero

**UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL
PROGRAMA DE INGENIERÍA AGROINDUSTRIAL
PASTO-NARIÑO**

2022

Nota de Responsabilidad

Las ideas y conclusiones aportadas en el siguiente trabajo son responsabilidad exclusiva del autor.

Artículo 1^{ro} del Acuerdo No. 324 de octubre 11 de 1966 emanado del Honorable Consejo Directivo de la Universidad de Nariño..

Nota de aceptación:

Fecha de sustentación: 1-Marzo-2022

Puntaje: 86

OSCAR ARANGO BEDOYA. M.Sc. y Ph.D.

Firma del presidente de tesis

RENATO PANTOJA GUERRERO. M.Sc.

Firma del jurado

Firma del jurado

Pasto, Marzo de 2022

Agradecimientos

Este trabajo es una investigación de autoría plural, que recoge conocimientos de un grupo de personas que se esforzaron por hacer posible este trabajo.

Mi agradecimiento y reconocimiento al líder del proyecto y asesor de tesis el Ingeniero Especialista Rigoberto Rosero, quien me dio la oportunidad de trabajar en tan gran proyecto, por su paciencia, por su apoyo y por brindarme acceso a sus conocimientos, gracias a su ayuda fue posible que este estudio se finalice de una manera positiva

A el Ingeniero Darío Gómez, por su apoyo y acompañamiento a lo largo del proyecto de investigación, al equipo de trabajo de INNOAGROCOLOMBIA S.A.S. quien gracias a sus capacidades y conocimientos permitieron llevar a cabo el proceso de producción de WPC sin mayores inconvenientes.

A el Ministerio de Ciencia y Tecnología E Innovación, por haber financiado tan gran proyecto, al laboratorio de investigación GAIDA, GIDTCA, Y al Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil – TEC INGENIERIA S.A.S.”. por la prestación de sus servicios en la ejecución de este proyecto.

A la universidad de Nariño y a mis profesores de carrera sin, sus enseñanzas y ayuda no hubiera sido posible llegar a estas instancias.

A mi familia y amigos por su constancia en mi vida y por su ayuda en este largo camino.

Resumen

Nariño se identifica por ser un departamento que basa su economía en todo lo relacionado al agro por lo que tiene una alta generación de residuos agroindustriales, dichos residuos suelen ser aprovechados por distintas industrias como la de textiles. De estos residuos se pueden extraer fibras naturales para distintos usos, en los últimos tiempos se ha estado estudiando estas fibras para ser usadas en materiales reforzados o en materiales biocompuestos, estos materiales están hechos a base de plástico y un material de refuerzo como las fibras naturales.

Dichos compuestos tienen por nombre WPC por sus siglas en inglés (Wood Plastic Composites) que significa compuestos madera-plástico, al ser materiales amables con el medio ambiente son considerados como una gran opción para las personas que buscan preservar el medio donde habitan. Estos materiales pueden servir para hacer pisos, paneles, vigas, entre otros.

Nariño es un departamento altamente generador de residuos agroindustriales, por lo que fue necesario establecer qué tipo de fibras naturales se generan en el departamento tanto a nivel artesanal como a partir de residuos agroindustriales, en que zonas y cuál es su producción en general. De igual manera era necesario conocer la cantidad y tipos de plásticos que llegan a las empresas recicladoras en pasto, ya que a partir de estos 2 materiales junto con un agente acoplante se realizó una serie de mezclas con ayuda de un diseño de experimentos.

Por lo que en este estudio se elaboró un inventario sobre las fibras naturales que se generan a partir de residuos agroindustriales en Nariño. Se seleccionó 4 fibras (aserrín, cisco de café, hilos de fibra de fique y tallos de arveja seca) de este inventario usando una matriz de selección formulada durante esta investigación. a estas fibras se les realizó una caracterización de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas.

También fue necesario visitar algunas empresas recicladoras de pasto y entrevistar a la persona a cargo para conocer la cantidad, el tipo de material plástico, el precio al que lo venden y posibles causas que afecten dicho precio.

De las 4 fibras seleccionadas se escogió aquella que tenía las mejores propiedades fisicoquímicas y mecánicas. En este caso el aserrín tuvo las mejores características para ser usado como carga en la producción de WPC. Usando la información adquirida a través de las entrevistas realizadas a las empresas recicladoras se usaron varios tipos de material plástico para obtener la carga que era necesaria para usar el equipo extrusor.

Por último, se desarrolló un diseño compuesto central rotatorio. como factores experimentales se estudió el porcentaje de fibra (F) (5 – 25 %p/p) y el porcentaje de acoplante (A) (2 – 5 % p/p), las variables de respuesta seleccionadas fueron: la resistencia a la compresión (RC), el módulo de young para compresión (MC), la resistencia a la flexión (RF) y el módulo de young para flexión (MF). Con ayuda de este diseño se realizaron 10 mezclas de las cuales se obtuvieron 2 lotes (A y B) de WPC, estos fueron enviados a un laboratorio especializado para conocer sus propiedades mecánicas.

Para el análisis de los datos obtenidos por dicho laboratorio fue necesario usar el programa Sthathgraphics Centurión. El cual ayudo a determinar que, para obtener las mejores características en los productos finales, la mezcla debe tener las siguientes cantidades: 0,857864 Kg de fibra, 1,37868 Kg de acoplante y el resto se debe completar con el material plástico para una carga de 10 kg de mezcla en el equipo extrusor.

Abstract

Nariño is identified as a department that bases its economy on everything related to agriculture so it has a high generation of agro-industrial waste, such waste is usually used by different industries such as textiles. From these wastes natural fibers can be extracted for different uses, in recent times these fibers have been studied to be used in reinforced materials or in biocomposite materials, these materials are made of plastic and a reinforcement material such as natural fibers.

These compounds are called WPC for its acronym in English (Wood Plastic Composites) which means wood-plastic compounds, being environmentally friendly materials are considered a great option for people looking to preserve the environment where they live. These materials can be used to make floors, panels, beams, among others.

Nariño is a department highly generating agro-industrial waste, so it was necessary to establish what type of natural fibers are generated in the department both at the artisanal level and from agro-industrial waste, in which areas and what is its production in general. In the same way it was necessary to know the amount and types of plastics that reach the recycling companies in pasture, since from these 2 materials together with a coupling agent a series of mixtures was made with the help of a design of experiments.

Therefore, in this study an inventory was prepared on the natural fibers that are generated from agro-industrial waste in Nariño. 4 fibers (sawdust, coffee cisco, fique fiber threads and dried pea stems) were selected from this inventory using a selection matrix formulated during this research. these fibers were characterized by the physicochemical and mechanical properties.

It was also necessary to visit some grass recycling companies and interview the person in charge to know the quantity, the type of plastic material, the price at which they sell it and possible causes that affect that price.

From the 4 selected fibers, the one with the best physicochemical and mechanical properties was chosen. In this case sawdust had the best characteristics to be used as a cargo in the production of WPC. Using the information acquired through interviews with recycling companies, various types of plastic material were used to obtain the load that was necessary to use the extruder equipment.

Finally, a rotating central composite design was developed. as experimental factors, the percentage of fiber (F) (5 – 25 % w / w) and the percentage of coupler (A) (2 – 5 % w / w) were studied, the response variables selected were: the compressive strength (RC), the young module for compression (MC), the bending resistance (RF) and the young module for flexion (MF). With the help of this design, 10 mixtures were made from which 2 batches (A and B) of WPC were obtained, these were sent to a specialized laboratory to know their mechanical properties.

For the analysis of the data obtained by this laboratory it was necessary to use the Statgraphics Centurion program. Which helped to determine that, to obtain the best characteristics in the final products, the mixture must have the following quantities: 0.857864 Kg of fiber, 1.37868 Kg of coupler and the rest must be completed with the plastic material for a load of 10 kg of mixture in the extruder equipment.

Contenido

	pág.
Introducción	23
1. Definición y delimitación del problema	27
1.1 Definición del problema	27
1.2 Delimitación del problema.....	27
2. Formulación del problema	29
2.1 Problema general	29
2.2 Problemas específicos.....	29
3. Objetivos	30
3.1 Objetivo general.....	30
3.2 Objetivos específicos	30
4. Marco teórico	31
4.1 Compuestos madera-plástico o WPC (Wood Plastic Composites).....	31
4.1.1 Producción de WPC.....	32
4.2 Fibras naturales	33
4.2.1 Composición química de las fibras	35
4.2.1.1 Celulosa.....	35
4.2.1.2 Hemicelulosa.....	36
4.2.1.3 Lignina.	37
4.2.1.4 Sustancias de bajo peso molecular.....	38
4.2.2 Propiedades mecánicas de las fibras naturales.....	39
4.2.3 Disponibilidad de fibras naturales	40

4.3 Polímeros reforzados con fibras naturales	41
4.4 Características de fibras naturales artesanales en Nariño	42
4.4.1 Fique (<i>Furcraea cabuya</i> - <i>Furcraea macrophylla</i>)	42
4.4.2 Iraca (<i>Carludovica palmata</i>).....	43
4.4.3 Chin (<i>Arundo donax</i>)	43
4.4.4 China y Atacorral (<i>Smilax domingensis</i> - <i>Smilax tomentosa</i>).....	44
4.4.5 Chocolatillo o Guarumo (<i>Ischnosiphon arouma</i> - <i>Ischnosiphon obliquus</i>)	45
4.4.6 Junco (<i>Schoenoplectus californicus</i>).....	46
4.4.7 Tetera (<i>Stromanthe jacquinii</i>)	46
4.5 Plásticos	47
4.5.1 Códigos de identificación de resinas de plástico	48
4.5.2 Tipos de plástico	49
4.5.3 Reciclado de plásticos (Polímeros).....	50
4.6 Mezclas	51
4.6.1 Mezclas homogéneas.	52
4.6.2 Mezclas heterogéneas.	52
4.6.3 Proceso de mezclado o agregado de polímeros	53
5. Estado del arte.....	59
5.1 Matrices.....	59
5.1.1 Matrices en la elaboración de WPC en Colombia	61
5.1.2 WPC con matrices poliméricas recicladas	64
5.2 Producción agrícola en Colombia.....	66
5.2.1 Grupo agroindustrial	68

5.3 Residuos agroindustriales	68
5.3.1 Residuos de café	69
5.3.2 Residuos de arroz	69
5.3.3 Caña de azúcar y Caña panelera	69
5.3.4 Maíz	70
5.3.5 Residuos de banano y plátano (<i>Musa paradisiaca</i>)	70
5.4 Fibras naturales para la obtención de WPC en Colombia y Nariño	70
6. Diseño metodológico	73
6.1 Tipo de investigación	73
6.2 Metodología	73
6.2.1 Elaborar un inventario de fibras provenientes de residuos agroindustriales que puedan ser usadas como carga en la mezcla con materiales termoplásticos.....	73
6.2.2 Realizar la caracterización fisicoquímica de 4 fibras de origen agroindustrial que potencialmente puedan ser usadas como carga en la producción de polímeros reforzados.....	75
6.2.2.1 Contenido de Humedad.....	76
6.2.2.2 Actividad de agua (a_w)	76
6.2.2.3 Absorción de humedad (AH)	78
6.2.2.4 Densidad aparente (ρ_a)	79
6.2.2.5 Densidad Real (ρ_r).....	80
6.2.2.6 Propiedades mecánicas.	81
6.2.3 Determinar la disponibilidad de plásticos aptos para la elaboración de WPC en las recicladoras que se encuentran en la ciudad de Pasto Nariño.....	82

6.2.4 Evaluar mezclas de fibra, plástico y acoplante para la producción de Wood Plastic Composites – WPC.....	83
6.3 Consideraciones éticas	90
7. Presentación y discusión de resultados	91
7.1 Fibras de origen artesanal	91
7.1.1 Producción nacional y departamental de las fibras.....	92
7.1.1.1 Fique.	92
7.1.1.2 Iraca (paja toquilla).	95
7.1.1.3 Otras especies.....	97
7.1.2 Visitas de campo	99
7.1.2.1 Visita de campo iraca.	99
7.1.2.2 Visita de campo fique.	101
7.2 Fibras naturales de residuos agroindustriales	106
7.2.1 Producción agrícola en Nariño.....	107
7.2.2 Residuos agroindustriales	110
7.2.2.1 Panela.	116
7.2.2.2 Plátano.....	122
7.2.2.3 Piña.	129
7.2.2.4 Arveja.....	134
7.2.2.5 Frijol.....	136
7.2.2.6 Café.	137
7.2.2.7 Banano.	143
7.2.2.8 Aserrín.....	147

7.3 Criterios de selección de fibras naturales.....	150
7.3.1 Composición química de las fibras	151
7.3.2 Propiedades físicas.....	152
7.3.3 Aspectos a considerar para la selección de fibras.....	153
7.4 Selección de fibras	154
7.5 Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas	157
7.6 Empresas recicladoras en pasto	164
7.6.1 Bodega de reciclaje “COMPRENDER”	167
7.6.2 Bodega de reciclaje “CHATARRERIA POTRERILLO”	168
7.6.3 Empresa “SOLUCIONES AMBIENTALES”	168
7.7 Resultados de la metodología del diseño de experimento	172
7.7.1 Resultados de mezclas sometidas a extrusión.....	172
7.7.2 Compresión.....	177
7.7.2.1 Porcentaje de deformación máximo por esfuerzo de compresión.	179
7.7.2.2 Módulo de Young de compresión.....	181
7.7.3 Flexión	183
7.7.3.1 Deformación máxima por esfuerzo de flexión.....	185
7.7.3.2 Módulo de Young de flexión.	186
7.7.3.3 Optimización de múltiples respuestas.....	187
Conclusiones	191
Recomendaciones	193
Referencias.....	194

Índice de tablas

	pág.
Tabla 1. Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.	40
Tabla 2. Identificación de la diversidad agrícola presente en el departamento de Nariño.....	41
Tabla 3. Total, área cultivada por grupos de cultivos.	67
Tabla 4. Núcleos artesanales más importantes en Nariño.	92
Tabla 5. Producción nacional de fique año 2018.	93
Tabla 6. Producción de fique en Nariño año 2018.....	94
Tabla 7. Producción de Iraca a nivel nacional para el año 2018.....	95
Tabla 8. Productos agrícolas en Nariño en el año 2018.	107
Tabla 9. Producción de productos con potencial en WPC.	111
Tabla 10. Factores de decisión y porcentaje de importancia para cada uno.	154
Tabla 11. Matriz de selección de fibras.	156
Tabla 12. Propiedades fisicoquímicas de materiales*.....	157
Tabla 13. Propiedades mecánicas.	159
Tabla 14. Encuesta realizada a la empresa “COMPRENDER”.	168
Tabla 15. Encuesta realizada a la empresa “CHATARRERIA POTRERILLO”.	168
Tabla 16. Encuesta realizada a la Empresa “SOLUCIONES AMBIENTALES”.	169
Tabla 17. Diseño experimental para la obtención de WPC.	172
Tabla 18. Matriz de experimentos y resultados	176
Tabla 19. ANOVA resistencia máxima a la deformación por compresión.....	177
Tabla 20. ANOVA para % de deformación de compresión.....	180
Tabla 21. ANOVA para módulo de Young.	181

Tabla 22.	ANOVA resistencia máxima a la deformación por flexión.	184
Tabla 23.	ANOVA para deformación por flexión.	186
Tabla 24.	Valores óptimos para optimización.....	189
Tabla 25.	Valores estimados de las variables de respuesta.....	190

Índice de figuras

	pág.
Figura 1. Clasificación fibras naturales (fibras colombianas)	34
Figura 2. Estructura química de las unidades estructurales de las hemicelulosas	36
Figura 3. Las ligninas son polímeros con constituyentes aromático y alifáticos.	38
Figura 4. Códigos de los plásticos.	49
Figura 5. Medición del contenido de humedad	76
Figura 6. Medición de actividad de agua.....	77
Figura 7. Determinación de la absorción de agua	78
Figura 8. Medición de la densidad aparente.....	79
Figura 9. Medición de la densidad real en un balón aforado de 50 ml con esmeril	81
Figura 10. Medición de las propiedades mecánicas del tallo de arveja completo (a) y tallo de arveja en lamina (b).....	82
Figura 11. Proceso de mezclado entre fibra, plástico y acoplante.....	84
Figura 12. Proceso de extrusión y resultado final	85
Figura 13. Equipo extrusor de un solo tornillo rotatorio	86
Figura 14. Tolda del equipo extrusor	86
Figura 15. Chaqueta del equipo extrusor.....	87
Figura 16. Moldes para elaboración de wpc.....	88
Figura 17. Piscina para enfriar los moldes de wpc.....	88

Figura 18. Extracción de los wpc de los moldes	89
Figura 19. Área de cultivo de iraca, por municipios en Nariño periodos (2012-2018).....	96
Figura 20. Producción del cultivo de Iraca por Municipios en Nariño periodos (2012-2018) ...	96
Figura 21. Rendimiento del cultivo de Iraca por Municipios en Nariño periodos (2012-2018). 97	
Figura 22. Paja toquilla utilizada para elaborar sombreros en Colon - Génova.....	100
Figura 23. Separación de fibras de Paja	100
Figura 24. Planta de fique.....	101
Figura 25. Penca de fique.	102
Figura 26. Proceso de obtención de fibras de fique, municipio de la florida.	102
Figura 27. Residuos del procesamiento del fique.....	103
Figura 28. Fibras de fique sin lavar.	103
Figura 29. Lavado de fibras de fique.....	104
Figura 30. Secado de fibras de fique.	104
Figura 31. Fibra final de fique.	105
Figura 32. Composición sectorial del PIB en Nariño.....	106
Figura 33. Estructura Agrícola en Nariño.	110
Figura 34. Flujo de proceso de producción de panela.	117
Figura 35. Bagazo de caña, Municipio de Chachagüí.	119
Figura 36. Molino para obtener fibras finas de bagazo de caña.	120
Figura 37. Bagazo de caña picado en molino sin hacer tamizado.....	120

Figura 38. Bagazo de caña obtenido después del tamizado	121
Figura 39. Fibras obtenidas del bagazo de caña panelera	121
Figura 40. Pequeño cultivo de plátano como sistema de cerco en el municipio de Chachagüí	122
Figura 41. Pequeño cultivo de plátano para autoabastecimiento, municipio de Chachagüí	123
Figura 42. Pequeño cultivo de plátano para autoconsumo, municipio de la Florida.....	123
Figura 43. Pequeño cultivo de plátano como sistema de cerco, municipio de la Florida	124
Figura 44. Cultivo de plátano dentro de un cultivo de piña, municipio de la Florida	124
Figura 45. Tallos del árbol de plátano dejados en medio del campo como abono.....	125
Figura 46. Hojas y tallos del árbol de plátano dejados en medio del campo como abono.....	126
Figura 47. Planta de plátano sin desojar.....	127
Figura 48. Pseudotallo de la planta de plátano	127
Figura 49. Hojas del árbol de plátano.....	128
Figura 50. Hojas de plátano utilizadas para el transporte de piña, municipio de la Florida.....	129
Figura 51. Vías de acceso a los cultivos de piña, municipio de la Florida.....	131
Figura 52. Vías de acceso a los cultivos de piña, municipio de la Florida.....	132
Figura 53. Productores de piña, vereda Robles, municipio de la Florida.....	132
Figura 54. Cultivos de piña, municipio de la Florida	133
Figura 55. Cultivos de piña, municipio de la Florida	133
Figura 56. Cultivos de arveja.....	134
Figura 57. Residuos de cultivos de arveja.	135

Figura 58. Cascarilla de arveja	135
Figura 59. Cultivos de frijol	136
Figura 60. Paja de frijol	137
Figura 61. Trilladora de café	139
Figura 62. Café seco dentro de la trilladora	140
Figura 63. Café saliendo de la trilladora	141
Figura 64. Cisco de café cayendo de la trilladora	141
Figura 65. Cisco de café obtenido después del proceso de trillado.....	142
Figura 66. Caracterización cascarrilla de café.....	142
Figura 67. Producción departamental de café.....	143
Figura 68. Planta de banano	144
Figura 69. Pseudotallo de la planta de banano	145
Figura 70. Pseudotallo de la planta de banano parcialmente desfibrado.....	146
Figura 71. Depósito de maderas San Andrés.....	148
Figura 72. Depósito de maderas San Andrés.....	148
Figura 73. Aserrín fino obtenido del depósito de maderas San Andrés	149
Figura 74. Aserrío maderas y molduras Pasto.....	150
Figura 75. Gráfico porcentaje de humedad	157
Figura 76. Gráfico actividad de agua	158
Figura 77. Gráfico porcentaje de absorción de humedad.....	158

Figura 78. Medición de las propiedades mecánicas de hilos de arveja	162
Figura 79. Fractura de tallos de arveja	163
Figura 80. Pasta antes de la selección	164
Figura 81. Pasta después de preselección.....	165
Figura 82. PET antes de la selección.....	165
Figura 83. PET seleccionado por colores	166
Figura 84. PET transparente	166
Figura 85. PET transparente seleccionado y listo para transportar	167
Figura 86. Mezcla de varios plásticos	171
Figura 87. Mezcla de plásticos final.....	171
Figura 88. Lotes A y B de los WPC finales	173
Figura 89. Muestras finales de WPC	173
Figura 90. Muestra de WPC alcanzada la falla por flexión.....	175
Figura 91. Muestras finales de WPC sometidas a compresión	177
Figura 92. Diagrama de Pareto para la resistencia máxima a la deformación por compresión	178
Figura 93. Gráfico de efectos principales para el módulo de Young	182
Figura 94. Muestras finales de WPC sometidas a flexión.....	183
Figura 95. Gráfico de efectos principales para la resistencia a la deformación por flexión.....	185
Figura 96. Superficie de respuesta.....	187

Figura 97. Superficie de respuesta con contornos 188

Figura 98. Muestras de WPC con aglomeración de agente de acoplamiento. 189

Introducción

Los compuestos de madera y plástico han surgido como una importante familia de materiales de ingeniería y están remplazando parcialmente la madera y otros materiales en una variedad de aplicaciones (Acuña, 2007). Los WPC por sus siglas en inglés (Wood Plastic Composites) son materiales compuestos de madera y plástico de nueva generación; los cuales son amigables con el medio ambiente (Shao-Yuan, Tsu-Hsien, Sheng-Fong, & Te-Hsin, 2012).

La producción de compuestos termoplásticos con fibras lignocelulósicas se ha llevado a cabo con éxito desde hace más de veinte años, tiempo en el cual se desarrollaron diferentes tipos de perfiles enfocados a la industria automotriz y la construcción. En la actualidad han incrementado su empleo dada la tendencia ambientalista promovida por los diversos estamentos gubernamentales, impulsando el uso de recursos renovables y la disminución de fuentes de contaminación. (Pinzón, 2009).

Durante varias décadas, se han utilizado fibras sintéticas como el vidrio, la aramida y el carbono en la preparación de materiales compuestos. sin embargo, estos materiales se obtienen a base de recursos no renovables, los cuales afectan al medio ambiente (Moreno, Florez, & Hernandez, 2018). la sociedad actual busca ser más ecológica utilizando materiales que sean renovables y biodegradables.

Las fibras naturales se han presentado como una magnifica alternativa ya que presentan numerosas ventajas cuando se comparan con sus homologas sintéticas, pues no solo son un recurso renovable y biodegradables, sino que se encuentran en abundancia (Estrada, Ramirez, Maldonado, & Correal, 2010). El uso de fibras naturales mezcladas con polímeros trae consigo beneficios en las propiedades mecánicas (incremento del módulo de rigidez y resistencia a la

deformación por fluencia lenta o creep), debido a que las fibras naturales tienen alta resistencia y módulos que en casos especiales exceden a la fibra de vidrio. De igual forma, abarata los costos puesto que se buscan fibras con bajo valor comercial como residuos de las industrias de madera o del sector agroindustrial en proporciones que superan hasta el 50% (Pinzón, 2009). las características que hacen atractivas a las fibras naturales como relleno para matrices poliméricas son su bajo costo, alto módulo específico, bajo peso, baja abrasividad, carácter renovable y biodegradabilidad (Acuña, 2007).

Aunque los WPC son superiores a los polímeros en términos de costos, creep y rigidez, la resistencia a la tensión y al impacto es generalmente más baja en comparación con el polímero sin relleno. La menor resistencia es el resultado de la incompatibilidad natural de fases durante la mezcla de las fibras hidrofílicas con la matriz polimérica hidrofóbica y el efecto de las fibras como agente nucleante de falla (Acuña, 2007).

Para superar este hecho es menester, en principio, secar el material vegetal a fin de generar mayor área de contacto mejorando la interacción entre los componentes e inhibir, por un lado, sobre-presiones generadas por el vapor de agua remanente en algunos sistemas de procesamiento como la extrusión y, por otro lado, la formación de compuestos espumados indeseables (Pinzón, 2009).

En Colombia se presenta una abundante generación de residuos generados por distintas industrias, muchos de estos pueden ser aprovechados de distintas maneras, lamentablemente muy pocas empresas se dedican al aprovechamiento de residuos agroindustriales. El uso de fibras naturales también aborda el problema del exceso de residuos en ciertas industrias o bien la necesidad de aprovechar el material vegetal disponible en algún lugar dado (Barrera, Hidalgo, &

Mina, 2012). entre los principales usos de las fibras naturales colombianas están la confección de bolsos, sombreros, tapetes, canastos y costales que se utilizan como empaques de alimentos (Mora & Ramón, 2017). A nivel mundial fibras como el kenaf, cáñamo, sisal, lino y yute, han sido objeto de extensas investigaciones para aplicaciones de composites desde la década de 1970s (Sarasini & Fiore, 2018).

A pesar de la importante diversidad de recursos naturales que posee Colombia, estos compuestos se encuentran en una fase inicial de desarrollo y su aplicación es muy limitada (Salgado & Velandia, 2019). Esto sumado a la geografía del lugar donde se encuentra la fibra en conjunto con la disponibilidad, juega un papel importante durante la selección de fibras naturales y el desarrollo de WPC (Pickering, Aruan, & Le, 2006).

En el transcurso de esta investigación se realizó un inventario de algunas fibras de origen agroindustrial que se generan en el departamento de Nariño, con base en las visitas de campo y la revisión del estado del arte se seleccionaron 4 fibras que tenían el mayor potencial para ser aprovechadas para elaborar WPC. Para esto se diseñó una matriz de comparación entre los principales factores de importancia (disponibilidad de generación, tipo de fibra, precio, costo de transporte, distancia a la planta de procesamiento, requerimiento de pretratamiento para las fibras.) y el porcentaje de importancia de cada factor.

Una vez seleccionadas las fibras se les realizó una caracterización fisicoquímica, que permitió evaluar cuál de las 4 fibras era la más adecuada para ser usada en la producción de polímeros reforzados. También se evaluó la disponibilidad de plástico en la ciudad de Pasto-Nariño, a través de entrevistas realizadas a operarios de las recicladoras. La fibra seleccionada junto con el material plástico reciclado fueron utilizados como carga para producir muestras de WPC a escala piloto.

Para obtener las distintas mezclas de fibra, plástico y acoplante para el desarrollo de WPC, se definieron los rangos de porcentaje de fibra y acoplante que iban a tener las mezclas y con ayuda de un diseño de experimentos se determinó el número de ensayos a realizar.

Finalmente, las muestras resultantes de WPC fueron analizadas en un laboratorio especializado y los resultados permitieron determinar cuál era la mejor composición de fibra, plástico, y acoplante. para obtener los WPC con las propiedades más adecuadas, que permitan en el futuro ser utilizados a mayor escala.

1. Definición y delimitación del problema

1.1 Definición del problema

Abundante generación de fibras vegetales de origen agroindustrial que son desaprovechados y que tienen un potencial uso en el desarrollo de materiales reforzados – Wood Plastic Composites (WPC) en el departamento de Nariño.

1.2 Delimitación del problema

Los WPC al ser una combinación de fibras vegetales y plásticos se convierten en materiales que disminuyen el impacto ambiental, ya que las fibras son de origen agro-industrial lo que disminuye la cantidad de residuos no aprovechados y el plástico al ser reciclado ayuda a disminuir la cantidad de plástico que termina en los vertederos.

Nariño es un departamento con una alta generación de residuos agroindustriales que no están siendo reutilizados o aprovechados, el mayor uso que se le está dando a estos residuos es principalmente como abono, a pesar de que muchos de estos residuos tienen muy buenas características para ser usados en otros procesos. A lo largo de esta investigación se encontró que no todos los residuos agroindustriales son fuente potencial de fibras que contengan las características requeridas para ser usadas en la elaboración de WPC. Debido a esto el inventario se realizó solo para algunos residuos de los que se pueden extraer fibras que puedan ser usadas como refuerzo en WPC.

La revisión del estado del arte muestra que en Colombia se han realizado estudios acerca del uso de fibras como refuerzo en la producción de WPC. Las principales fibras estudiadas son: **Banano, plátano, cisco de café, bagazo de palma, bagazo de caña, y fique.** Ya que estas cuentan con un alto volumen de producción en Nariño.

No todas las fibras son adecuadas para la producción de WPC por lo que es necesario identificar cuáles son las más apropiadas. Para esto es necesario preguntarse: ¿Cuál es la localización del residuo?, ¿Cuál es su disponibilidad de generación a lo largo de un año?, ¿Qué tipo de fibra es?, ¿Cuál es el costo para adquirir dicha fibra?, ¿Cuánto costaría desplazar la fibra desde su localización hasta la planta de procesamiento de wpc?, Y si ¿requiere o no pretratamiento?, Estas preguntas son muy importantes a la hora de definir las potenciales fibras que puedan ser usadas como carga para la producción de WPC.

2. Formulación del problema

El problema a investigar se formula de la siguiente forma:

2.1 Problema general

¿Cuáles podrían ser las fibras vegetales que, gracias a sus características fisicoquímicas, sus propiedades mecánicas y Disponibilidad, puedan tener un mayor potencial para ser usadas como posibles cargas en la elaboración de Wood Plastic Composites (WPC)?

2.2 Problemas específicos

- 1) ¿cuáles son las fibras provenientes de residuos agroindustriales que pueden ser usadas como carga en la mezcla con materiales termoplásticos?
- 2) ¿Qué fibra tiene las propiedades fisicoquímicas y mecánicas adecuadas, para que pueda ser potencialmente usada como carga en la producción de polímeros reforzados?
- 3) ¿Qué tanta disponibilidad de plásticos presenta las recicladoras en la ciudad de pasto y que tipo de plástico es adecuado para la producción de WPC?
- 4) ¿Cuál sería la mejor mezcla entre el material plástico y la fibra seleccionada para producir un WPC con buenas características mecánicas?

3. Objetivos

3.1 Objetivo general

Evaluar la disponibilidad y características de las fibras vegetales con potencial uso en el desarrollo de materiales reforzados – Wood Plastic composites (WPC) en el Departamento de Nariño.

3.2 Objetivos específicos

- 1) Elaborar un inventario de fibras provenientes de residuos agroindustriales que puedan ser usadas como carga en la mezcla con materiales termoplásticos.
- 2) Realizar la caracterización fisicoquímica de 4 fibras de origen agroindustrial que potencialmente puedan ser usadas como carga en la producción de polímeros reforzados.
- 3) Determinar la disponibilidad de plásticos aptos para la elaboración de WPC en las recicladoras que se encuentran en la ciudad de pasto Nariño.
- 4) Evaluar mezclas de fibra, plástico, y acoplante para la producción de Wood Plastic Composites – WPC.

4. Marco teórico

4.1 Compuestos madera-plástico o WPC (Wood Plastic Composites)

Los compuestos madera-plástico, conocidos como WPC (wood-plastic composites), están esencialmente conformados de rellenos de madera (partículas o fibras) y una matriz termoplástica. Estos materiales han ganado aceptación en aplicaciones como pisos, jardinerías, perfiles para ventanas, instalaciones marinas, líneas férreas, así como en construcciones de edificios y aplicaciones industriales. En general, los WPC tienen mayor durabilidad y menor costo de mantenimiento, mejor estabilidad dimensional, mayor resistencia a la humedad y degradación biológica, y menor costo que los compuestos fabricados con otras fibras (Moreno, Ballerini, Gacitúa, & Rodrigue, 2017).

También se puede definir como el producto fabricado a partir de la mezcla de uno o varios termoplásticos con uno o varios materiales a base de celulosa, mediante técnicas de procesamiento de plásticos sin que ocurra reacción química. Estos materiales presentan dos elementos principales: un refuerzo y una matriz. El primero de ellos es el elemento que otorga la resistencia al material, siendo cualquier fibra vegetal, mientras el segundo actúa como litigante y puede ser cualquier tipo de polímero. Cabe resaltar que las fibras de madera son consideradas como un importante refuerzo para los polímeros termoplásticos, debido a sus propiedades de baja densidad y alta resistencia (López & Rojas, 2018).

En Colombia, se reporta una producción aproximada de 72 millones de Toneladas/ año de biomasa residual (López & Rojas, 2018). El mayor aporte a esta cifra lo hacen cultivos tales como el plátano, banano, maíz y caña de azúcar. Por otro lado, los plásticos residuales comprenden un 13% de la generación total de residuos sólidos en el país (32,000 Toneladas/día).

es decir, aproximadamente 4,160 Toneladas/día (Rijkswaterstaat Ministry of Infrastructure and the Environment , 2017).

El uso de residuos agroindustriales y material lignocelulósico en la producción de madera plástica, implica diversas etapas en el proceso de adecuación para su empleo como refuerzo o relleno. es bien conocido que la producción de estos compuestos por métodos que involucren procesos de extrusión o inyección tienen un limitante en cuanto al contenido de humedad máximo permitido para la fibra (inferior al 1% en base seca), al igual que la temperatura de proceso (Pinzón, 2009). Existen diferentes tipos de compuestos lignocelulósicos de polímeros, cada cual con sus particularidades. La mayor parte de las diferencias resultan de la matriz polimérica seleccionada y del tipo y cantidad de madera o fibra incorporada. Polietileno (PE), Polipropileno (PP) y PVC son las principales matrices termoplásticas utilizadas en estos compuestos. El PE y el PP son polímeros de baja viscosidad en estado fundido y normalmente presentan una elevada capacidad de incorporación de fibras o madera, en contenidos que pueden alcanzar entre 80% y 85% en peso. (Acuña, 2007).

4.1.1 Producción de WPC

El proceso de fabricación de compuestos termoplásticos con fibras involucra la dispersión de éstas en el polímero mediante técnicas de procesamiento como: extrusión, termoformado, laminado, moldeo por compresión e inyección. El inicio de la producción de estos compuestos es incierto; sin embargo, entre las primeras aplicaciones industriales se destaca la elaboración de un compuesto a partir de polipropileno y al menos 50% de harina de madera que eran extruídos para formar una lámina plana con posterior etapa de moldeo para la aplicación al interior de

los automóviles. Este compuesto fue desarrollado por American Woodstock (Pinzón, 2009).

Para la producción de WPC se emplea como material lignocelulósico residuos de la industria maderera en presentación de fibras (de esta forma se obtienen características de refuerzo) o de material particulado (con mayor frecuencia) en proporciones que van desde el 20% al 70%. Para el caso de harina de madera los tamaños de partícula recomendados están comprendidos entre mallas 40 y 80 (Cutillo & Jackson, 2005). Dada la diversidad entre las clases de madera: pino, arce, roble, etc., y la dificultad de recolección y clasificación de ellas, algunas industrias han optado por adaptar fibras vegetales nativas procedentes de residuos agroindustriales en sus procesos. Entre las fibras se distinguen: lino y cáñamo que han sido usadas en la industria automotriz, y sisal, yute, tallo de maíz, cascarilla de arroz y coco para la producción de materiales compuestos (Pinzón, 2009). En el país se produce una gran cantidad de residuos de la industria agrícola que podría tener gran utilidad en el campo de los WPC. Fibras de cisco de café, banano, y palma de aceite, pueden llegar a ser una alternativa de refuerzo (Acuña, 2007).

4.2 Fibras naturales

Las fibras son macroestructuras de las paredes vegetales compuestas principalmente por celulosa, La naturaleza fibrosa de la celulosa se ve en distintos niveles estructurales. Las propiedades de las fibras dependen de la composición química y de la forma como se organice estructuralmente la celulosa variando sensiblemente según la especie (Monroy, 2011).

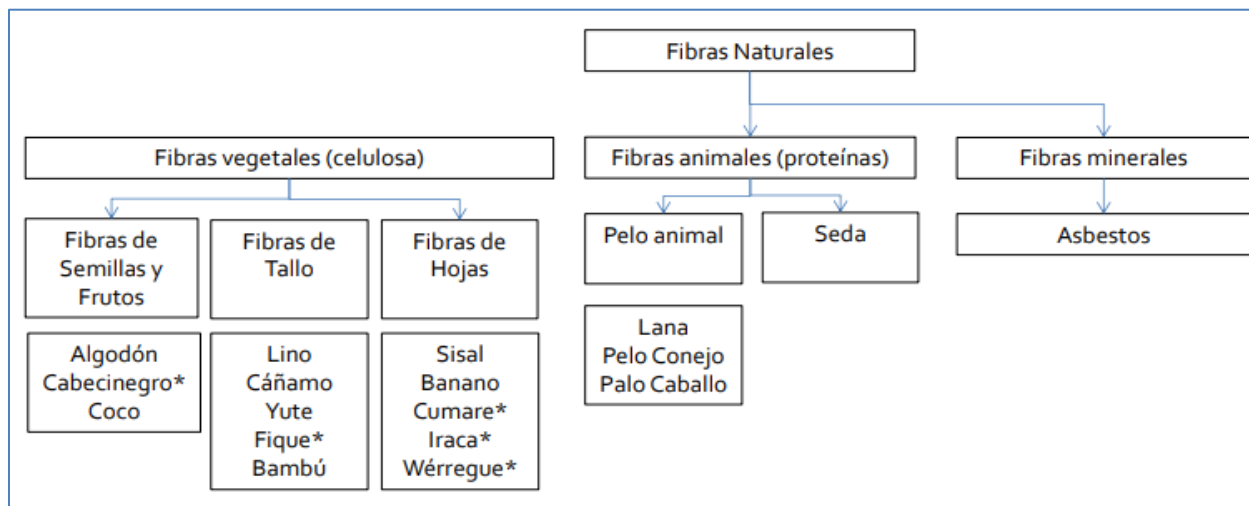
Las fibras naturales presentan también desventajas que han limitado su uso en diversas aplicaciones. Debido a su naturaleza hidrofílica y las características no-polares de la mayoría de polímeros termoplásticos, se han presentado en muchos

compuestos naturales problemas de adhesión fibra-matriz lo que resulta en bajas propiedades mecánicas. Otra desventaja de las fibras naturales es la dispersión de propiedades mecánicas y el alto nivel de absorción de humedad que genera baja estabilidad dimensional de los compuestos y reducción de propiedades mecánicas con el tiempo (Monroy, 2011).

Las fibras naturales se dividen en fibras animales y fibras vegetales. Todas las fibras vegetales están compuestas por celulosa mientras que las fibras animales se componen: principalmente de proteínas. Las fibras vegetales a su vez se clasifican en varios tipos según la parte de la planta de donde proceden; se clasifican en fibras de semillas y frutos, suaves o del tallo, y fibras fuertes o de las hojas (Monroy, 2011). La figura 1 muestra una clasificación general de las fibras naturales.

Figura 1.

Clasificación fibras naturales (fibras colombianas)



Fuente: (Monroy, 2011).

4.2.1 Composición química de las fibras

Las condiciones climáticas, la edad y el proceso al que hayan sido sometidas influencia no solo la estructura de las fibras sino también la composición química. Las fibras presentan dos tipos de componentes: sustancias macromoleculares como la celulosa, hemicelulosa y lignina; y sustancias de bajo peso molecular como las cenizas y extractivos (Acuña, 2007).

4.2.1.1 Celulosa.

La celulosa es un polímero natural que tiene como estructura base los enlaces 1,4- β glucosídicos. Tiene una estructura semicristalina que puede variar dependiendo del tipo de fuente de la cual es aislada. Igualmente es posible obtener múltiples tipos de morfologías, estructuras supramoleculares, relaciones de aspecto y por ende propiedades físicas y mecánicas muy variadas. Adicional a lo anterior, la presencia de tres grupos OH en cada una de las unidades estructurales le permite reaccionar bien sea como un alcohol, un éster o un éter. Esto ha permitido ampliar la gama tanto de modificaciones químicas posibles como de derivados; y que hayan sido empleados tanto por la industria farmacéutica como por la de alimentos o la textil. En años recientes, polímeros derivados de la celulosa han adquirido un renovado interés debido a su potencial biodegradación (Gañán, y otros, 2017).

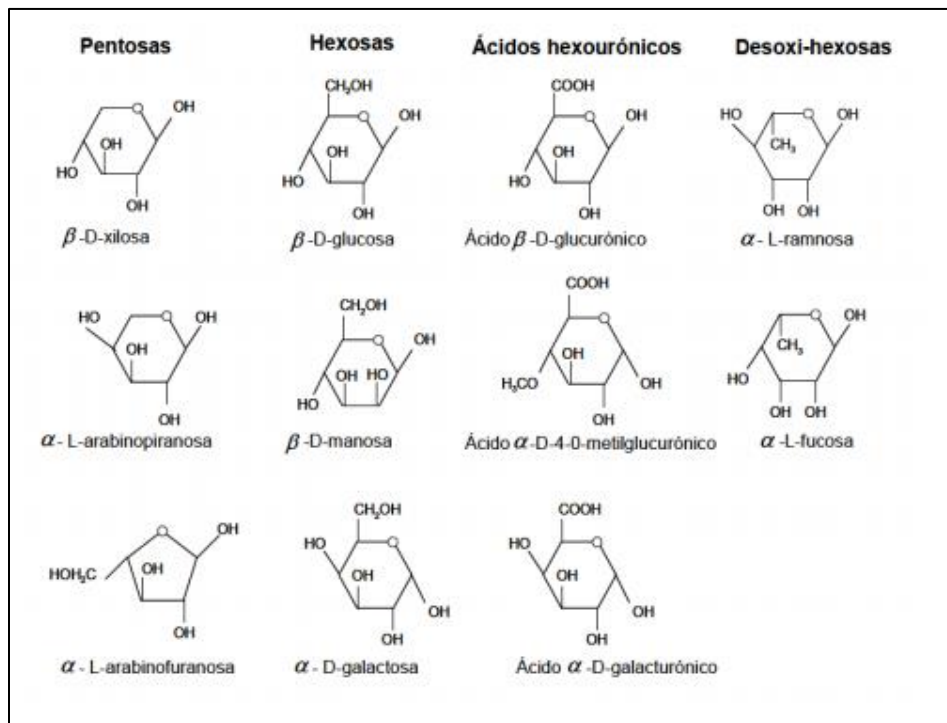
Hasta mediados de los años 70's del siglo XX la mayoría de las aplicaciones, bien fuera de la celulosa aislada o en asocio con otros componentes lignocelulósicos, se encontraba dominada por las industrias de pulpa y papel, textil y sus derivados. Además, en un menor rango el desarrollo de sustancias como la celulosa microcristalina le ha permitido ser empleada como aditivo para alimentos, componentes farmacéuticos o incluso en la elaboración de productos de

soldadura. Sin embargo, con el enorme surgimiento de los materiales compuestos, ha realizado desde esta década notables incursiones en campos tan disímiles como el de transporte, elementos de construcción o empaques, gracias a su incorporación en matrices poliméricas tanto de tipo termoplástico como termorrígido. En este punto las variaciones de los reforzantes a base de celulosa incluyen un amplio espectro de formulaciones que pueden ir desde fibras vegetales de menor nivel de comercialización en el mundo como el fique, hasta las más tradicionales en el mercado como el lino o el algodón (Müssig & Stevens, 2010).

4.2.1.2 Hemicelulosa.

Figura 2.

Estructura química de las unidades estructurales de las hemicelulosas



Fuente: (Rivas, 2014).

Las hemicelulosas son un grupo de heteropolisacáridos constituidos por cadenas cortas y ramificadas de azúcares (figura 1), entre los que destacan pentosas (generalmente D-xilosa y L-

arabinosa), hexosas (como D-galactosa, D-glucosa y D-manosa), así como ácidos urónicos (ácidos glucurónicos, 4-O-metilgalacturónico y galacturónico) y desoxihexosas (ramnosa y fucosa) (Rivas, 2014).

Los grupos hidroxilo de los azúcares constituyentes pueden estar parcialmente sustituidos por grupos acetilo. La naturaleza ramificada de las hemicelulosas determina su carácter amorfo, y la facilidad con que transcurren las reacciones de hidrólisis de los polímeros para dar lugar a sus azúcares constituyentes. Las hemicelulosas son más fáciles de solubilizar e hidrolizar que la celulosa. Dentro de la pared celular las hemicelulosas tienen como función servir de interfase entre la celulosa y la lignina a través de puentes de hidrógeno entre los grupos $-CH_2OH$ de las cadenas de celulosa y los oxígenos glicosídicos de las hemicelulosas (Rivas, 2014).

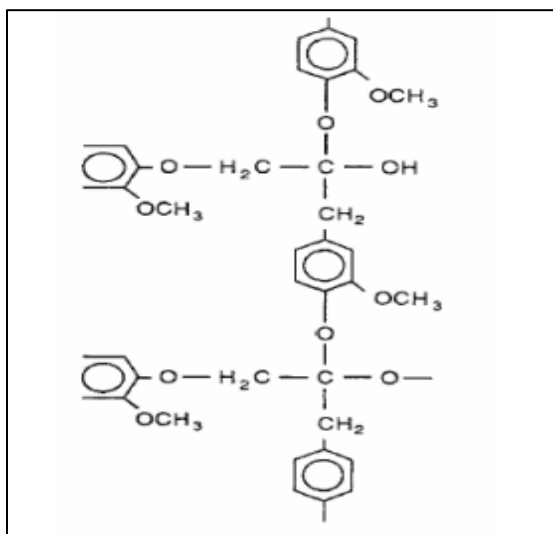
4.2.1.3 Lignina.

Después de la celulosa, es el polímero más abundante en el mundo vegetal y su función es asegurar protección contra la humedad y los agentes atmosféricos, además de actuar como elemento aglomerante de las fibras. Es un componente característico de las plantas superiores (gimnospermas y angiospermas, entre las que se encuentran el café, la palma y el banano. La lignina aparece típicamente en los tejidos vasculares, especializados en el transporte de líquido y en dar resistencia mecánica (Acuña, 2007).

Químicamente la lignina es un polímero tridimensional amorfo constituido a partir de unidades fenilpropano que se unen entre sí por enlaces tipo alquil-aril-éter o carbono-carbono (figura 3). La estructura y composición, así como su contenido relativo en el lignocelulósico, dependen de las diferentes especies (Acuña, 2007).

Figura 3.

Las ligninas son polímeros con constituyentes aromático y alifáticos.



Fuente: (Acuña, 2007).

4.2.1.4 Sustancias de bajo peso molecular.

Estos componentes se encuentran proporcionalmente en menor cantidad, pero tienen gran influencia en las propiedades y procesamiento de los materiales lignocelulósicos. Protegen a la madera de los insectos, inhiben el blanqueo de las pastas de celulosa y son responsables de dar olor, color y gusto a la madera. Pertenecen a diferentes clases de compuestos químicos, pero simplificando se pueden dividir en 2 tipos: Extractivos y Cenizas (Acuña, 2007).

a) Extractivos

Son los componentes orgánicos de bajo peso molecular. Se pueden extraer de la madera por lavado con agua o con solventes orgánicos. Se incluyen dentro de este grupo carbohidratos de bajo peso molecular, terpenos, ácidos alifáticos y aromáticos, alcoholes, flavonoides, lignanos, taninos, alcaloides, ligninas solubles, ceras. Sus funciones en la célula vegetal son de protección exterior y reserva de nutrientes (Acuña, 2007).

b) Cenizas

Son las sustancias inorgánicas que se pueden determinar por incineración del material entre 575 y 850 °C. Fundamentalmente son las sales inorgánicas de calcio, potasio y magnesio, así como sílice en las maderas tropicales. Forman fosfatos, oxalatos y silicatos (Acuña, 2007).

4.2.2 Propiedades mecánicas de las fibras naturales

Las propiedades mecánicas de las fibras naturales dependen, entre otras cosas del método de extracción, la composición química, las condiciones climáticas y del suelo durante el crecimiento y presencia de defectos. Algunos defectos más comunes en las fibras naturales son bandas de deslizamiento debidas a heterogeneidad en el crecimiento de la fibra, ramificaciones de las microfibras, incremento en el ángulo de alineación, fracturas durante la extracción y rugosidades superficiales. El tamaño y distribución de estos defectos en las fibras disminuyen las propiedades mecánicas de las fibras facilitando la fractura en esos puntos (Monroy, 2011).

Las fibras naturales son apropiadas para reforzar plásticos por sus valores de resistencia y rigidez relativamente altos (Tabla 1). Estos valores son en parte determinados por la estructura de la fibra, que a su vez está influenciada por diferentes condiciones como área de crecimiento, clima y edad de la planta (Acuña, 2007).

La resistencia a la tensión también está determinada por el refinamiento de la fibra. El carácter hidrofílico es el mayor problema de las fibras, el contenido de humedad puede alcanzar 10% en peso en una atmosfera estándar. Este comportamiento hidrofílico influencia las propiedades de la fibra, así como las propiedades del compuesto en la producción (Acuña, 2007).

Tabla 1.***Propiedades mecánicas de algunas fibras naturales.***

Fibra	ρ (kg/m ³)	Resistencia Tensión (MPa)	Resistencia Tensión específica (MPa*m ³ /kg)	Referencia
E-Glass	2550	2400	0.94	(A.K. Bledzki, 2010)
Lino	1500	600-1000	0.40-0.67	(K. Oksmana, 2003)
Sisal	1320	500-855	0.38-0.65	(T Goswami, 1997) (Flavio de Andrade Silva, 2008)
Jute	1230	187-773	0.15-0.63	(A.K. Bledzki, 2010) (Nele Defoirdt, 2010)
Cáñamo	1350	580-1100	0.43-0.81	(Pickering, 2008)
Algodón	1210	287-597	0.24-0.49	(T Goswami, 1997) (Pickering, 2008)
Henequen	1400	430-580	0.31-0.41	(Pickering, 2008)
Bambú	850	95-119	0.11-0.14	(Porrás Holguín, 2009)
hilado				
Bambú	897	341-503	0.38-0.56	(Nele Defoirdt, 2010)

Fuente: (Monroy, 2011).

4.2.3 Disponibilidad de fibras naturales

Cualquier fibra lignocelulósica puede ser usada como refuerzo. Sin embargo, la disponibilidad de grandes volúmenes de fibras con propiedades mecánicas bien definidas es la clave para el éxito del material (Acuña, 2007). Nariño es uno de los principales productores de fique con un total de 4.583 productores (MINAGRICULTURA, 2018). Nariño tiene un área de cultivo de 38.400 Hectáreas sembradas de café (Coral, 2019). para obtener el grano de café es necesario realizar un riguroso proceso, en el cual se generan distintos residuos, uno de ellos es el cisco de café, este material puede ser usado como refuerzo en WPC.

El sector agropecuario es uno de los sectores con mayor importancia en la economía de Nariño, este aporta un 14,1% del PIB regional.

Los productos de Nariño se presentan en la (Tabla 2), destacando que las especies frutícolas de mayor importancia tanto por área sembrada como por consumo y comercialización son: tomate de árbol, mora, lulo y banano (Ramírez, y otros, 2019).

Tabla 2.

Identificación de la diversidad agrícola presente en el departamento de Nariño.

GRUPO	CULTIVOS
Frutales	Aguacate, Borojó, Banano, Breva, Ciruelo, Cítricos, Coco, Curuba, Chirimoya, Bananito (Chiro), Chamba, Chontaduro, Durazno, Fresa, Gulupa, Guama, Granadilla, Guanábana, Guayaba, Limón, Lulo, Mango, Maracuyá, Mora, Naranja, Papaya, Pepa De Pan, Piña, Patilla, Tomate De Árbol, Sandía, Pitahaya, Uchuva, Uva, Zapote
Hortalizas	Ajo, Acelga, Brócoli, Cebolla Junca, Cebolla Cabezona, Cilantro, Coliflor, Lechuga, Col, Pepino, Pimentón, Pepino, Repollo, Tomate, Remolacha, Rábano, Zanahoria, Remolacha
Tubérculos y plátano	Achira, Arracacha, Ñame, Batata, Papa, Papa China, Plátano, Yuca, Olluco
Cereales	Arroz, Cebada, Maíz, Maíz Forrajero, Quinoa, Trigo
Plantas aromáticas, condimentarias y medicinales	Albahaca, Amaranto, Manzanilla, Ania, Chía, Chilangua, Poleo, Cimarrón
Leguminosas	Arveja, Frijol, Haba, Habichuela, Maní

Fuente: (Ramírez, y otros, 2019).

4.3 Polímeros reforzados con fibras naturales

Durante muchos años las industrias han utilizado para la elaboración de diversos productos, materiales poliméricos reforzados con diferentes fibras sintéticas, debido a su bajo costo y buenas propiedades mecánicas. Sin embargo, estos materiales han provocado un importante impacto negativo en el medio ambiente. En la actualidad, la sostenibilidad es la principal preocupación a nivel mundial, existe una gran necesidad y un desafío por reemplazar los productos no sostenibles por productos sostenibles, sumado a la cantidad limitada de recursos energéticos convencionales y la creciente preocupación por el medio ambiente fomentó un importante cambio de enfoque hacia el uso de materias primas renovables y al desarrollo de nuevos componentes amigables con el medio ambiente, lo que llevó a la sustitución de las fibras

sintéticas por fibras naturales para reforzar compuestos poliméricos denominados comúnmente como WPC (Wood Plastic composites) o NFC (Natural Fiber Composites). Las fibras naturales tienen muchos beneficios en comparación con las fibras sintéticas, como baja densidad relativa, bajo costo, alta resistencia al impacto, alta flexibilidad, baja gravedad específica, menor abrasividad para el equipo y menos riesgos para la salud, además son fuentes renovables y biodegradables, producen menores emisiones de efecto invernadero y puede ser recicladas (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).

El propósito de incorporar fibras a una matriz de polímero es proporcionar un componente de refuerzo que mejore las propiedades en comparación con las de los componentes vírgenes.

4.4 Características de fibras naturales artesanales en Nariño

4.4.1 Fique (*Furcraea cabuya* - *Furcraea macrophylla*.)

Son Plantas grandes, con un tallo sin ramificación de hasta 1.5 m de alto sus hojas son numerosas, más de 100, dispuestas en una roseta hacia la base de la planta, largas y angostas, de hasta 2 m de largo y 20 cm de ancho, carnosas, erguidas, acanaladas, verdes o verde azules, con o sin aguijones en las márgenes y en la punta. Algunas poseen inflorescencias muy largas y ramificadas, hasta 6 m de alto, erguidas y saliendo del centro de la roseta de hojas, con muchas flores grandes y fragantes, de color blanco verdoso (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

A nivel nacional el 70% de la fibra de fique se utiliza para la elaboración de sacos (empaques) para productos agrícolas como papa, maíz, arveja, frijol, cebolla y para productos de exportación principalmente para café y cacao; además para la producción de agromantos y geotextiles (15%), cordeles y sogas (10%) y productos artesanales (5%) (DANE, 2017).

4.4.2 *Iraca (Carludovica palmata)*

Nombre Común: Paja toquilla (Nariño)

Son plantas herbáceas de hasta 5 m de alto, posee hojas abundantes en manojos densos, con pecíolos muy largos y redondos, hasta de 4 m de longitud y también láminas muy grandes, flabeliformes o en forma de abanico, con cuatro divisiones o hendiduras en el ápice, tan anchas como largas o más anchas, de 50 a 80 cm de ancho o de largo, con muchos pliegues longitudinales, con la margen apical dentada, con dientes muy grandes y largos. Además, sus Inflorescencias numerosas salen entre las hojas, son de hasta 50 cm de largo, con numerosas flores blanquecinas dispuestas en forma apretada sobre un eje carnosos y cilíndrico, envuelto por una bráctea gruesa que se desprende cuando los frutos maduran. Los frutos son pequeños, carnosos y de colores rojo anaranjado (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

Las Partes utilizadas de la planta son hojas jóvenes antes de expandirse (cogollos) y pecíolos de las hojas para obtener productos como: sombreros, canastos, bolsos, hamacas, esteras, abanicos, cortinas, estuches, fajas, zapatos, cinturones, protectores de botellas, individuales, aventadores y figuras de animales (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

La iraca es una especie de amplia distribución geográfica en América tropical, desde México hasta Bolivia. En Colombia crece en los pisos térmicos cálido y templado, desde el nivel del mar hasta 1700 de altitud, principalmente en lugares sombreados y frescos, a lo largo de caños, quebradas y ríos, barrancos de caminos y carreteras, en suelos bien drenados, en los cuales forma matorrales ralos y densos (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.4.3 *Chin (Arundo donax)*

Es una caña perenne y rizomatosa, con tallos huecos de hasta 6 m de alto, con muchos entrenudos, posee hojas envainadoras, acintadas, con el ápice agudo, hasta de 60 cm de largo y 7

cm de ancho, dispuestas en dos filas casi desde la base de las cañas, arqueadas o dobladas en la mitad superior. En Colombia no producen inflorescencias y por lo tanto tampoco hay reproducción sexual, se encuentra, cultivada o espontánea, en climas templados y fríos, y crece en sitios abiertos y soleados, formando densos cañales, en potreros, a lo largo de cauces o en las márgenes de caminos o carreteras secundarias, donde se propaga vegetativamente mediante rizomas subterráneos para la elaboración de artesanías se emplea la planta Tallos (cañas), los productos artesanales elaborados son canastas, petacas, baúles, pañaleras, poncheras, jarrones, lámparas, floreros, jaulas, costureros, sombreros, adornos, juguetería y diversas figuras en miniatura de gran aceptación (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.4.4 China y Atacorral (*Smilax domingensis* - *Smilax tomentosa*)

Nombres comunes: raíz de china (Nariño), bejuco, bejuco espuelo, china.

Son plantas trepadoras de hasta 20 m de largo posee tallos espinosos, de color verde o vinotinto. Sus hojas son simples, alternas, acorazonadas, verde brillante por encima y verde claro por debajo, con la margen entera y con 1 a 3 nervios principales, los laterales curvos y un par de zarcillos retorcidos y café sobre el pecíolo. Las Inflorescencias axilares, están en umbelas de más de 10 flores, masculinas y femeninas en diferentes individuos. Su fruto en baya, esférico, lustroso y de color anaranjado al madurar. Smilax es un género de bejucos ampliamente distribuido en la América tropical. *S. tomentosa* se ha encontrado entre 1680 y 3050 m de altitud y *S. domingensis* entre 1200 y 3150 m de altitud, en ambos casos en climas templados y fríos y en ambientes húmedos. La china y el Atacorral con frecuencia crecen al interior de los bosques o en relictos de bosque y ambientes alterados como la vegetación de las orillas de caminos y potreros. Al parecer producen flores y frutos a lo largo del año. La china y el Atacorral son bejucos usados tradicionalmente en la región Andina para la elaboración de cestería,

principalmente canastos de tejido extremadamente compacto y resistente, que son utilizados para recoger papa o café, para transportar alimentos, cargar víveres o para guardar ropa (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.4.5 Chocolatillo o Guarumo (*Ischnosiphon arouma* - *Ischnosiphon obliquus*)

Nombres comunes: Chocolatí (Nariño)

Son hierbas cespitosas, de hasta 6 m de alto. Sus tallos son numerosos, verdes, redondos, de hasta 4 m de largo. Sus hojas están dispuestas en forma de abanico en el extremo de los tallos, pecíolos largos, hasta de 50 cm de largo, con la base envolvente y con un engrosamiento (pulvínulo) en la punta; sus láminas son verde lustrosas, elípticas, hasta un metro de largo y 60 cm de ancho. Las Inflorescencias en las axilas de las hojas, están varias veces divididas, con flores hasta de 4 cm de largo, vistosas y de corolas amarillas, pardas o pardo rojizas (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

El género *Ischnosiphon* es nativo del trópico americano. *Ischnosiphon arouma* en Colombia se encuentra en la cuenca del pacífico. Las tres especies que se encuentran en Colombia crecen en selvas, bosques secundarios o rastrojos altos, a lo largo de cuencas de ríos, caños y quebradas, de la planta se utiliza el tallo, y los productos que se pueden hacer con esta fibra son, balayes o coladores, sebucanes, cestos, canastas, sombreros, abanicos, bolsos y papeleras. Aunque se encuentran maestros artesanos dispersos por las selvas, caseríos y pueblos de las dos regiones, existen pequeños centros artesanales organizados para producir y comercializar sus propios productos. En el Pacífico, en Olaya Herrera (comunidades indígenas de El Turbio, Caimanes y Robles sobre el río Satinga y Nueva Floresta sobre el río Sanquianga, Nariño) (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.4.6 Junco (*Schoenoplectus californicus*)

Nombre común: totora (Nariño, Putumayo y Valle)

Son hierbas altas, que forman matorrales densos, con raíces gruesas reptantes.

Hojas pequeñas, de color pardo, envolviendo la base de los ejes de las inflorescencias. Los ejes de las inflorescencias son largos y erguidos, hasta 3 m de alto, verdes, levemente triangulares, esponjosos, con espigas cilíndricas o levemente comprimidas, que llevan muchas flores diminutas, solitarias o agrupadas en inflorescencias de tamaño variable (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

El junco, generalmente llamado totora de Nariño hacia el sur del continente, se encuentra íntimamente asociado a los pueblos andinos, desde antes del Imperio Inca. En la cerámica prehispánica se puede ver la figura modelada de navegantes sobre sus caballitos de totora. Esta planta fue utilizada por los antiguos “chalacos” u hombres de la costa peruana, para hacer estas embarcaciones con las que navegaban por el mar peruano o pequeñas embarcaciones utilizadas por los pueblos indígenas del Alto Perú, para navegar por el lago Titicaca, entre Perú y Bolivia. En Colombia, las artesanías con junco tienen tradición en Cundinamarca, Nariño (Tumaco) y Cauca (Buenaventura: corregimiento de Puerto Merizalde). La evolución artesanal en torno al junco en el país proviene de procesos campesinos relacionados con el tejido de esteras (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.4.7 Tetera (*Stromanthe jacquinii*)

Son hierbas cespitosas, de hasta 3 m de alto, sus tallos son abundantes, generalmente ramificados, verdes, redondos, hasta 1.5 m de largo. Las hojas están dispuestas en forma de abanico en el extremo de los tallos, pecíolos largos, con la base envolvente y el ápice con un

engrosamiento pulvinulado, sus láminas verdes lustrosas, elípticas, pueden crecer hasta 40 cm de largo y 15 cm de ancho. Sus Inflorescencias en ejes terminales, están varias veces divididas, con flores amarillo-verdosas, anaranjadas o rojizas y frutos capsulares, verdes, que se abren en tres valvas. Las partes utilizadas de la planta son los tallos y se producen artesanías como sombreros, canastos, bolsos, papeleras, esteras, abanicos, billeteras, individuales y adornos (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

Las comunidades indígenas de la cuenca del Pacífico y habitantes del municipio de Ricaurte en Nariño usan tradicionalmente fibras obtenidas de los tallos de la tetera, para elaborar diversos artículos finamente tejidos de uso diario, como sombreros, canastos y petacas, y que ahora en respuesta a la economía de mercado han diversificado, para producir objetos decorativos de atractivo para el mercado artesanal nacional e internacional, como abanicos, bolsos, papeleras y adornos, entre otros (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

4.5 Plásticos

Los plásticos son un gran grupo de materiales orgánicos que contienen como elemento principal el carbono, combinado con otros ingredientes como el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, los plásticos sintéticos son polímeros derivados del petróleo, el gas natural o el carbón. Las propiedades favorables más importantes que ofrecen los plásticos con respecto a otros materiales son la ligereza, la elasticidad, resistencia a la fatiga, resistencia a la corrosión, costo, son reciclables y fáciles de fabricar (Majewski & Bledzki, 2013). Los plásticos se suelen clasificar en función de su comportamiento en presencia de calor se clasifican en termoplásticos y termoestables:

- a) **Termoplásticos:** Son plásticos con moléculas colocadas de manera tal que, cuando el material es calentado, sus relaciones intermoleculares se debilitan y se vuelven más suaves. Cuando el material se enfría se endurece y vuelve a su estado rígido, en otras palabras, un termoplástico a temperaturas relativamente altas se derrite y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. Sirven especialmente para extrusión y fundición inyectada. El material mantiene la mayoría de sus propiedades y puede utilizarse para una nueva fabricación, ejemplo de estos materiales son: **polipropileno (PP), poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polietileno (PE), poliéster (PET)** (Majewski & Bledzki, 2013).
- b) **Termoestables:** se caracterizan porque no sufren deformaciones al ser calentados. Una vez que estos polímeros adquieren rigidez no pueden volverse a trabajar, se presentan en forma líquida viscosa y al añadirle un catalizador se entrecruzan y se endurecen de forma irreversible, lo que significa que después del procesamiento los materiales no pueden ser licuados o ablandados, ejemplo de estos materiales **son epoxi, poliuretano PUR, resinas fenólicas PH baquelitas, melanina, duraplast.** (Majewski & Bledzki, 2013).

4.5.1 Códigos de identificación de resinas de plástico

Para poder reciclar, los plásticos están diferenciados según un Código de Identificación de Plásticos. El código de Identificación de Plástico es un sistema utilizado internacionalmente en el sector industrial para distinguir la composición de resinas en los envases y otros productos plásticos. Esto fue realizado por la Sociedad de la Industria de Plásticos (SPI) en el año 1988, con el fin de propiciar y dar más eficiencia al reciclaje. Los diferentes tipos de plástico se identifican con un número del 1 al 7 ubicado en el interior del clásico signo de reciclado

(triángulo de flechas en seguimiento) (Pascual, 2020). Los códigos de identificación de resinas de plástico son:

Figura 4.

Códigos de los plásticos.



Fuente: (Codigos de los plasticos, 2011).

4.5.2 Tipos de plástico

- a) **PET (Polietileno tereftalato):** El PET se utiliza principalmente en la producción de botellas para bebidas, A través de su reciclado se obtiene principalmente fibras para lleno de bolsas de dormir, alfombras, cuerdas y almohadas.
- b) **HDPE (Polietileno de alta densidad):** El HDPE normalmente se utiliza en envases de leche, detergente, aceite para motor, etc. El HDPE tras reciclarse se utiliza para macetas, contenedores de basura y botellas de detergente.
- c) **PVC (Cloruro de polivinilo):** El PVC es utilizado en botellas de champú, envases de aceite de cocina, artículos de servicio para casas de comida rápida, etc. El PVC puede ser reciclado como tubos de drenaje e irrigación.

- d) **LDPE (Polietileno de baja densidad):** El LDPE se encuentra en bolsas de supermercado, de pan, plástico para envolver. El LDPE puede ser reciclado como bolsas de supermercado nuevamente.
- e) **PP (Polipropileno):** El PP se utiliza en la mayoría de recipientes para yogurt, sorbetes, tapas de botella, etc. El PP tras el reciclado se utiliza como viguetas de plástico, peldaños para registros de drenaje, cajas de baterías para autos.
- f) **PS (Poliestireno):** El PS se encuentra en vasos, platos, cubiertos desechables de bebidas calientes y bandejas de carne. El PS puede reciclarse en viguetas de plástico, cajas de cintas para casetes y macetas.
- g) **Otros:** Generalmente indica que es una mezcla de varios plásticos. Algunos de los productos de este tipo de plástico son: botellas de ketchup para exprimir, platos para hornos de microondas, etc. Estos plásticos no se reciclan porque no se sabe con certeza qué tipo de resinas contienen (Pascual, 2020).

4.5.3 Reciclado de plásticos (Polímeros)

El procedimiento más simple y limpio de reciclaje de polímeros es el proceso mecánico primario. Se aplica sobre piezas limpias y descartadas de fábrica (ramas y restos de moldeo por inyección) de polímeros termoplásticos, y requiere inicialmente la desintegración de la pieza original (fresado, triturado o triturado) y luego extrusión, para preparar el material para ser utilizado de nuevo. Este polímero reciclado generalmente muestra casi las mismas propiedades y se puede agregar a polímeros vírgenes para obtener nuevos productos (Cestari, Franc, Coval, & Mendez, 2019).

El proceso mecánico secundario es bastante complejo y depende de la disponibilidad de residuos termoplásticos. Los pasos de recolección, transporte, separación, limpieza, trituración y

almacenamiento son necesarios antes de la reprocesamiento de polímeros. Pueden ocurrir algunas rupturas de cadena en el polímero durante la reintegración, dependiendo de su estructura química. El calor, la presencia de agua o los agentes químicos liberados por degradación pueden provocar la disminución de la masa molar, afectando principalmente el rendimiento mecánico. Algunos agentes protectores, aditivos estabilizantes y antioxidantes, se utilizan para compensar la posible degradación de la cadena durante el proceso de reciclaje de polímeros postconsumidos (Cestari, Franc, Coval, & Mendez, 2019).

Otra opción de reciclaje de polímeros se llama reciclaje terciario, también conocido como reciclaje químico. El objetivo de este proceso es recuperar los monómeros mediante la despolimerización química de las cadenas poliméricas. Los materiales recuperados son materias primas potenciales para las industrias de polímeros y combustibles, la recuperación asistida por reacciones enzimáticas puede considerarse reciclaje terciario (Cestari, Franc, Coval, & Mendez, 2019).

El último tipo de recuperación de polímeros se denomina reciclaje cuaternario o recuperación energética y es básicamente la incineración de los residuos poliméricos. El concepto de este proceso es transformar la energía restringida en el polímero en otras formas de energía (calor, electricidad) y también reducir el volumen de desechos plásticos. Es adecuado para residuos poliméricos heterogéneos y para polímeros impregnados con productos químicos tóxicos, contagiosos y peligrosos (Cestari, Franc, Coval, & Mendez, 2019).

4.6 Mezclas

Las mezclas son la unión de dos o más sustancias puras. La mezcla formada presenta características propias diferentes a la de sus componentes. Estas características varían según las

proporciones en que se encuentran las sustancias que la forman. Existen dos tipos de mezclas las homogéneas y las heterogéneas (Siso, Estrada, Carrascal, & Mendoza, 2015).

4.6.1 Mezclas homogéneas.

En las mezclas homogéneas las partículas de las sustancias no se pueden diferenciar a simple vista una de la otra. Un ejemplo clásico de ellas es la unión de agua con alcohol. Dentro de este tipo se encuentran las soluciones, que se definen como mezclas homogéneas constituidas por dos o más sustancias.

Los componentes que forman las soluciones son el solvente, que es el compuesto o la sustancia que disuelve. Y el soluto, el componente que está disuelto en el solvente. Existen clasificaciones de las soluciones por su concentración y por su estado físico, respectivamente solución insaturada, solución saturada y solución sobresaturada, también están la sólida, líquida y gaseosa (Siso, Estrada, Carrascal, & Mendoza, 2015).

4.6.2 Mezclas heterogéneas.

Las mezclas heterogéneas son un tipo de mezclas que presentan partículas que se pueden distinguir a simple vista una de la otra; lo que ocurre por ejemplo entre el agua con aceite o agua con arena. De éstas derivan los coloides y las suspensiones.

- a) Los coloides son mezclas que tienen partículas muy pequeñas que poseen dos fases.

En el caso clásico de la leche líquida, el agua es la fase dispersante que sirve de disolvente a una fase dispersa que está constituida por materia grasa, azúcares, entre otras sustancias nutritivas, siendo a simple vista difícil de diferenciar de una solución verdadera.

- b) Las suspensiones, son mezclas que tienen partículas pequeñas difíciles de diluir, las cuales quedan suspendidas en el líquido por un tiempo y posteriormente precipitan, como es el caso de la mezcla de agua y arena anteriormente mencionados.

Las mezclas cuentan con unas técnicas de separación. Entre los varios procedimientos es posible encontrar el tamizado, separación magnética, decantación, separación de líquidos de distintas densidades, filtración, levigación, la destilación, evaporación, cristalización y cromatografía (Siso, Estrada, Carrascal, & Mendoza, 2015).

4.6.3 Proceso de mezclado o agregado de polímeros

El proceso de mezclado o agregado de polímeros consiste en distribuir o dispersar un componente menor o secundario dentro de un componente mayor, que sirve como matriz. Puede pensarse que el componente mayor es la fase continua, y que los componentes menores son las fases distribuidas o dispersas en forma de pequeñas gotas, filamentos o aglomerados (Ospina, 2014).

Cuando se va a crear una mezcla de polímeros siempre debe tenerse en mente que esa mezcla probablemente se volverá a fundir en el procesamiento subsiguiente o en el proceso de formado. Puede suceder, por ejemplo; que un sistema rápidamente enfriado, que se congela como una mezcla homogénea, al volverse a calentar posteriormente se separe en fases a causa de la coalescencia. Para propósitos prácticos, una mezcla como esa no es procesable. Para evitar este problema, es común el uso de compatibilizantes, que son macromoléculas usadas para asegurar la compatibilidad en las capas límite entre las dos fases (Ospina, 2014).

El mezclado puede ser distribuido o dispersivo. El desarrollo morfológico de mezclas de polímeros se determina por tres mecanismos competitivos: mezclado distributivo, mezclado disperso y coalescencia (Ospina, 2014).

- a) Mezclado Distributivo: El mezclado distributivo o laminar de líquidos compatibles se caracteriza por la distribución de las pequeñas gotas o fase secundaria dentro de la matriz. Esta distribución se alcanza porque el sistema se somete a grandes deformaciones, de manera que aumenta el área entre las dos (o más) fases existentes y disminuyen las dimensiones locales, o espesores de estriación, de la fase secundaria (Ospina, 2014).
- b) Mezclado Dispersivo: El mezclado dispersivo en el procesamiento de polímeros consiste en romper una fase secundaria inmiscible o un aglomerado de partículas sólidas y dispersarlas a través de la matriz. Aquí, la deformación impuesta no es tan importante como el esfuerzo aplicado, el cual causa que el sistema se desintegre. Por lo tanto, el tipo de flujo que haya dentro del mezclador tiene un papel preponderante en la desintegración de los aglomerados de partículas sólidas o de las pequeñas gotas de fluido en el momento de dispersarlas dentro del conjunto de la matriz (Ospina, 2014).

Los WPC han atraído la atención de investigadores e industriales porque se adaptan a una amplia gama de aplicaciones como en componentes de automoción, deportes, construcción, etc. Las técnicas para la fabricación materiales compuestos poliméricos reforzados con fibra son: pultrusión, bobinado de filamentos, colocación automática de fibras, colocación automática de cintas, pulverización, moldeo por transferencia de resina y colocación manual. Sin embargo, las técnicas convencionales mencionadas anteriormente requieren el uso de moldes y, por lo tanto, los hacen costosos (Zindani & Kumar, 2019).

Los métodos más comunes utilizados para los WPC son la extrusión, el moldeo por inyección y el moldeo por compresión. Por su parte, el moldeo por transferencia de resina también se utiliza con matrices termoendurecibles y la pultrusión, se ha empleado con éxito para compuestos combinados de hilo de lino / PP y compuestos de matriz termoendurecible. Los

factores que determinan las propiedades mecánicas finales del compuesto incluyen temperatura, presión y velocidad de procesamiento. Es posible que se produzca la degradación de la fibra si la temperatura utilizada es demasiado alta, lo que limita las matrices termoplásticas utilizadas a aquellas con puntos de fusión más bajos que la temperatura a la que se producirá la degradación (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

a. Extrusión

En la extrusión, el termoplástico, generalmente se encuentra en forma de perlas o gránulos, se ablanda y se mezcla con la fibra transportada por medio de uno o dos tornillos giratorios, comprimidos y forzados a salir de la cámara a un ritmo constante a través de una matriz. La alta velocidad del tornillo puede resultar en atrapamiento de aire, temperaturas de fusión excesivas y rotura de fibras. Sin embargo, las velocidades bajas conducen a un mezclado deficiente y una humectación insuficiente de las fibras. Este método se utiliza solo o para producir precursor para el moldeo por inyección. Se ha demostrado que los sistemas de doble tornillo proporcionan una mejor dispersión de las fibras y un mejor rendimiento mecánico que las extrusoras de un solo tornillo (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

b. Moldeo por inyección

El moldeo por inyección de composites se puede realizar con matrices termoendurecibles o termoplásticas, aunque se usa mucho más a menudo para matrices termoplásticas. La variación de la orientación de la fibra ocurre a través de la sección del molde con un flujo de cizallamiento a lo largo de las paredes debido a la fricción que da como resultado que la fibra se alinee a lo largo de la pared del molde, mientras que una tasa de estiramiento más alta en el centro produce una fibra que está más alineada transversalmente a la dirección del flujo, una estructura referida a como estructura del núcleo de la piel. La alineación es más significativa con mayores contenidos

de fibra. La tensión residual en los materiales compuestos de matriz termoplástica debido a gradientes de presión, perfiles de temperatura no uniformes, alineación de la cadena de polímero y diferencias en los coeficientes de expansión térmica de la fibra y la matriz puede reducir la resistencia del material compuesto. Debido a los requisitos de viscosidad, la inyección por moldeo se limita generalmente a compuestos con menos del 40% de contenido de fibra. El desgaste de la fibra en moldeo por inyección como para la extrusión reduce la longitud de la fibra durante el procesamiento (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

c. Moldeo por compresión

El moldeo por compresión se usa generalmente para matrices termoplásticas con fibra cortada suelta o esteras de fibra corta o larga, ya sea orientadas al azar o alineadas, pero también se puede usar con matrices termoendurecibles. Las fibras normalmente se apilan alternativamente con láminas de matriz termoplástica antes de aplicar presión y calor. La viscosidad de la matriz durante el prensado y el calentamiento debe controlarse cuidadosamente, en particular para muestras gruesas, para asegurarse de que la matriz esté completamente impregnada en el espacio entre las fibras. Pueden producirse compuestos de buena calidad controlando la viscosidad, la presión, el tiempo de mantenimiento y la temperatura teniendo en cuenta el tipo de fibra y matriz. Se ha recomendado el apilamiento de películas ya que limita la degradación natural de la fibra debido a la participación de un solo ciclo de temperatura. La temperatura aún debe controlarse cuidadosamente ya que comúnmente hay poca diferencia de temperatura entre aquella a la que se puede procesar una matriz particular y aquella a la que se producirá la degradación de la fibra. Se ha demostrado que la reducción de la resistencia de la fibra se produce a temperaturas tan bajas como 150 C y 200 C, con una reducción de la resistencia del 10% en diez minutos. En general, existe un compromiso entre obtener una buena

humectación y evitar la degradación de la fibra que conduce a una temperatura óptima para una geometría / material compuesto particular (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

d. El moldeo por transferencia de resina

En el moldeo por transferencia de resina, la resina termoestable líquida se inyecta en un molde que contiene una preforma de fibra. Las principales variables de este proceso son la temperatura, la presión de inyección, la viscosidad de la resina, la arquitectura de la preforma y la configuración del molde. Las ventajas en comparación con otros procesos incluyen requisitos de temperatura más bajos y evitar la degradación termomecánica. La compactación en este proceso se ve afectada por la estructura de las fibras naturales, incluido el efecto de cierre de la luz y, debido a menores grados de alineación de las fibras, los compuestos de fibras naturales son menos compactables que los compuestos de fibra de vidrio. Se puede lograr una buena resistencia de los componentes con este proceso, que es adecuado para series de producción bajas (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

e. Impresión 3D

La fabricación aditiva se ha investigado ampliamente durante la última década debido a su potencial disruptivo en el diseño de materiales y estructuras avanzados. Entre las diversas técnicas de fabricación aditiva, la impresión 3D de fabricación de filamentos fundidos (FFF) es una de las técnicas más aplicadas a polímeros y compuestos en la literatura. El método FFF implica la deposición capa por capa de material termoplástico viscoso a través de una boquilla calentada sobre la plataforma o sobre capas previamente impresas. Las ventajas de FFF incluyen acortar el ciclo de diseño-fabricación, minimizar el costo de las tiradas de producción bajas, reducir el desperdicio de producción, poder construir geometrías intrincadas, poder adaptar la microestructura y propiedades en cada capa, y proporcionando un alto valor a las aplicaciones de

investigación. Originalmente dirigido a aplicaciones de creación de prototipos, el desarrollo de FFF se ha movido gradualmente hacia un rendimiento mecánico controlado por parámetros de corte e impresión. Los parámetros de corte incluyen el ángulo de la trama (ángulo en el plano), la altura de la capa, la distancia entre filamentos, el diámetro de la boquilla, el patrón de relleno (por ejemplo, panal, hexagonal, triangular), la orientación del filamento y la orientación de construcción (fuera del plano). La geometría de la boquilla, la velocidad de impresión, la trayectoria de impresión, la temperatura de la boquilla, la temperatura del lecho y la calibración se clasifican como parámetros de impresión (Le Duigou, Correa, Ueda, Matsuzaki, & Castro, 2020).

El desarrollo de compuestos reforzados con fibra ha mejorado las propiedades mecánicas de las piezas poliméricas impresas en 3D. Sin embargo, aún se requiere un trabajo importante para permitir que las piezas impresas en 3D cumplan con las especificaciones de la aplicación estructural. Los principales obstáculos para los composites impresos son los defectos inherentes inducidos por la extrusión, como la porosidad, que son causados por una mala unión interfacial entre las fibras y el polímero y entre las perlas impresas o las capas impresas. Por tanto, es importante distinguir entre las propiedades de los materiales y las propiedades de la pieza impresa (Le Duigou, Correa, Ueda, Matsuzaki, & Castro, 2020).

5. Estado del arte

5.1 Matrices

Los materiales compuestos se han utilizado durante mucho tiempo, pero no fue hasta la década de 1960 que la introducción de materiales compuestos poliméricos basados en fibras comenzó a captar la atención de las industrias. En los últimos 50 años, los materiales compuestos se han convertido en materiales de ingeniería comunes y se utilizan en diversas aplicaciones, incluidos componentes automotrices, infraestructuras, piezas aeroespaciales, artículos deportivos, palas de turbinas eólicas, industrias marítimas y petroleras. Al reemplazar los componentes de acero por compuestos, se puede lograr un ahorro de peso del 60% al 80% (Yong & Kumar, 2020).

Normalmente, los materiales compuestos se forman combinando refuerzos en un sistema de material de matriz. La fibra de refuerzo generalmente tiene propiedades mecánicas mucho mayores y sirve como el principal elemento portador de carga. Por su parte, la matriz desempeña el papel de aglutinante para mantener las fibras u otros tipos de refuerzo en la ubicación y orientación deseadas. La matriz transfiere la carga al refuerzo a través de la interfaz fibra- matriz (Yong & Kumar, 2020).

Dependiendo del tipo de matrices, los materiales compuestos se clasifican en:

- compuestos de matriz polimérica
- compuestos de matriz metálica
- compuestos de matriz cerámica (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).

Para Pickering, Aruan, & Le (2016), las matrices más comunes que se utilizan en la elaboración de NFC/WPC son matrices poliméricas, ya que son livianas y se pueden procesar a

temperaturas relativamente bajas, debido a que es un factor importante durante la fabricación de compuestos reforzados con fibras naturales para evitar su degradación por altas temperaturas, además, estos autores mencionan que la matriz es una parte importante de un compuesto reforzado porque además de transferir la carga, proporciona una barrera contra entornos adversos y protege la superficie de las fibras de la abrasión mecánica.

La matriz polimérica en compuestos se puede clasificar en dos tipos, es decir, termoendurecibles y termoplásticos. El polipropileno, poliuretano, nailon, etc. son ejemplos de matrices termoplásticas, mientras que el epoxi y el poliéster son algunas de las matrices termoendurecibles comúnmente utilizadas (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).

De acuerdo con Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder (2020), la matriz más utilizada en compuestos poliméricos es la resina epoxi debido a sus propiedades prometedoras, como baja contracción, baja toxicidad, buenas propiedades de adhesión y altas aplicaciones industriales. Sin embargo, la fragilidad y la baja tenacidad a la fractura del epoxi son factores que limitan su uso en las industrias.

Para Pickering, Aruan, & Le (2016), PP y PE son las dos matrices termoplásticas más comúnmente adoptadas para NFC (Natural Fiber Composites) debido a su uso extendido en las industrias de los plásticos, mientras que los principales termoendurecibles utilizados son poliéster insaturado (UP), resina epoxi, fenol formaldehído y resinas VE. Los termoplásticos pueden ablandarse repetidamente mediante la aplicación de calor y endurecerse mediante el enfriamiento y tienen el potencial de ser los más fácilmente reciclados, lo que los ha visto más favorecidos en la reciente adopción comercial, mientras que una mejor realización de las propiedades de la fibra generalmente se logra utilizando termoestables, además este autor afirma que se ha estudiado la sustitución de matrices derivadas del petróleo por matrices bioderivadas

como el PLA y lo sitúa como el líder indiscutible desde la perspectiva de las propiedades mecánicas, además menciona que se ha demostrado que proporciona mayor resistencia y rigidez con fibras naturales que el PP.

Al-Maadeed & Labidi (2014), afirman que los materiales termoplásticos que suelen predominar en las matrices de fibras naturales son el polipropileno (PP), polietileno (PE), poliamida (PA) y PVC. Mientras que, para los materiales termoendurecibles están las resinas fenólicas, epoxi y poliéster son las matrices más utilizadas, debido tanto a la disponibilidad de estas matrices como a sus mejores propiedades mecánicas.

Por último, es importante tener en cuenta que la selección de la matriz está limitada por la temperatura a la que se degradan las fibras naturales. La mayoría de las fibras naturales utilizadas para el refuerzo en compuestos de fibras naturales son térmicamente inestables por encima de 200°C, aunque en algunas circunstancias es posible que se procesen a temperaturas más altas durante un corto período de tiempo. Debido a esta limitación, solo los termoplásticos que se ablandan por debajo de esta temperatura como el polietileno (PE), PP (polipropileno), poliolefina, cloruro de polivinilo y poliestireno y los termoendurecibles (que pueden curarse por debajo de esta temperatura) se pueden utilizar como matriz. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los termoplásticos mencionados constituyen los termoplásticos más comúnmente consumidos por la industria de los plásticos y superan con creces el uso de cualquier otra matriz termoplástica generalmente utilizada (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

5.1.1 Matrices en la elaboración de WPC en Colombia

De acuerdo con Salgado & Velandia (2019), Colombia se encuentra en las primeras fases en el desarrollo de WPC y se ha visto muy limitado por los altos costos de fabricación de compuestos sin embargo, se espera en los próximos años un crecimiento en la fabricación de

estos compuestos, a continuación, se presentan las bases poliméricas reportadas en artículos científicos publicados en Colombia, en algunos casos los autores consideran aspectos diferentes a las propiedades mecánicas de los compuestos poliméricos finales obtenidos con estas matrices, no obstante, es interesante conocer cuáles han sido las matrices más estudiadas e implementadas en el país:

Las matrices más utilizadas en Colombia son:

ácido poli láctico y polietileno de alta densidad (HDPE) para estudiar desempeño ambiental con fibras de banano (Rodríguez, Fabbri, Orrego, & Owsianiak, 2020). Resina de poliéster con fibras de banana (Rodríguez, Orrego, Ribeiro, & Pecas, 2018). Resina poliéster insaturada con fibras de guadua (Moreno et al., 2018). Polipropileno (PP) con cascara de arroz (Hidalgo & Salinas, 2019). Cristalan 856 (98% resina poliéster, 2% naftenato de cobalto) (Hernández, Rojas, & Costa, 2017). Resina a base de aceite de ricino como adhesivo. Esta resina consiste en la combinación de dos componentes vegetales: un isocianato y un polioliéster, mezclados en una proporción de 1: 1,5, según las recomendaciones del proveedor y fibras de guadua (Sanchez, Aperador, & Capote, 2019). Resina poliéster con fibras de fique (Contreras, Hormaza, & Marañón, 2009). Poliuretano vegetal que es una resina bicomponente, formada por la mezcla de un prepolímero (componente A) y un polioli (componente B) a temperatura ambiente, es necesario establecer en qué proporciones deben mezclarse estos componentes, ya que esta proporción es un factor determinante en el cálculo de su masa y la elaboración de la matriz del compuesto. Siguiendo la sugerencia del proveedor de resina, estos autores adoptaron una relación de 1: 1,5, que equivale a una parte del componente A y una parte y media del componente B en volumen. El uso de estas proporciones de mezcla permite una trabajabilidad de aproximadamente 20 min (Sánchez, Aperador, & Capote, 2018). Como matriz del composite se

utilizaron un poliuretano vegetal derivado de la planta denominada "higuerilla" un bicomponente formulado a partir de la mezcla a temperatura ambiente de un prepolímero y un poliol (Sánchez, Morales, & Caicedo, 2017). Cristalán 859 poliéster insaturado ortoftálico, 100 gramos de Cristalán 859, 0,5 mL de octoato de cobalto al 6%, 1,0 mL de peróxido de metiletilcetona (Cuéllar & Muñoz, 2009). PP (polipropileno) y PEAD (polietileno de alta densidad) reciclados, como matriz polimérica, reforzada con cantidades óptimas de fibra natural tetera (*Stromanthe stromathoides*), el PP se recicló de tapas de botellas, seleccionadas y fracturadas manualmente con martillo y cortadas a tamaño variables entre 3 y 5 mm. El PEAD, se tomó de bolsas plásticas variables, que se despedazan manualmente y posteriormente se peletizan en la empresa Cooemprender de la ciudad de Pasto, en tamaño aproximado de 2-5 mm (Córdoba et al., 2010). La resina de poliéster insaturada ortoftálica (semi-preparada) con fibras de banano y plátano (Rodríguez et al., 2014). Matriz termoplástica polietileno de alta densidad (HDPE) reciclado (Amigo, Salvador, Llorens, Martí, & Sahuquillo, 2008). Matriz de polipropileno (Gutiérrez, Zuluaga, Cruz, & Gañán, 2005).

Finalmente, como se observa en el estado del arte las principales matrices son termo endurecibles como la resina de poliéster. Como se mencionó anteriormente estas resinas se caracterizan por tener excelentes propiedades, lo que podría justificar que se han implementado para diferentes estudios académicos, por ser una alternativa altamente funcional. Sin embargo, cabe mencionar que este proyecto pretende reutilizar y reciclar plásticos como matrices poliméricas para reducir el impacto ambiental de la generación de residuos plásticos. además, busca reducir costos de producción en la elaboración de WPC para ser más competitivos; por tal motivo, alcanzar equilibrio entre la disponibilidad de materiales plásticos reciclados y buenas propiedades mecánicas es un elemento importante dentro del desarrollo del proyecto. Por esta

razón, a continuación, se muestra una pequeña revisión de WPC elaborados con materiales plásticos reciclados e información acerca de cuáles son los plásticos reciclables más abundantes para tener un contexto general antes de presentar los resultados de las encuestas en el apartado de los resultados del desarrollo del proyecto.

5.1.2 WPC con matrices poliméricas recicladas

Históricamente, el uso de materiales compuestos se remonta a hace unos 3000 años en el antiguo Egipto. Se utilizaron pajitas de fibra natural como refuerzos para construir muros. A lo largo de los años, se desarrollaron materiales más duraderos y hoy tenemos compuestos reforzados con fibra que también se pueden producir a gran escala. En la década de 1960, las fibras de vidrio se utilizaron en la producción a gran escala mediante la mezcla de fibras de vidrio y resinas muy rígidas. En un intento por ahorrar peso de los materiales compuestos y reducir el costo, el reciclaje de matrices y compuestos han sido la tendencia en las últimas dos décadas (Amaechi, Agbomerie, Orok, Job, & Ye, 2019).

En la fabricación de compuestos se han empleado diferentes matrices poliméricas recicladas tanto termoplásticos como termoestables, aunque las más ampliamente utilizadas han sido las primeras y más en concreto las poliolefinas como el polipropileno (PP) y los polietilenos de alta y baja densidad (HDPE y LDPE). La utilización de poliolefinas viene propiciada por las excelentes propiedades plásticas obtenidas en los compuestos y la mayor rigidez proporcionada por las fibras junto a un incremento en mayor o menor grado de las propiedades del producto con la incorporación de fibras naturales cortas (Amigo, Salvador, Llorens, Martí, & Sahuquillo, 2008). Majewski & Bledzki, (2013), mencionan que los WPC/NFC puede ser producidos a partir de matrices plásticas recicladas, incluyendo HDPE, LDPE, PVC, PP, ABS, PS y PLA.

El WPC a base de polietileno es por mucho, el más común. De igual manera, Pickering, Aruan, & Le, (2016), confirman que las matrices como PP Y PE son altamente utilizadas en las industrias plásticas, lo que genera una alta disponibilidad de estos compuestos como residuos y pueden ser aprovechado en la elaboración de WPC.

Hoy en día es imposible disociar el uso de polímeros dentro de las actividades humanas. Su diversidad química y aplicaciones como materias primas ha llevado al aumento de la eliminación (contaminación) de desechos poliméricos, solo un pequeño porcentaje de polímeros postconsumo se envía al proceso de reciclaje. La gran mayoría de estos materiales desechados se incineran (para producir energía) o se eliminan en vertederos. Estos métodos de eliminación demandan un alto costo social y ambiental, debido a la liberación de gases tóxicos y de efecto invernadero que pueden dañar la salud humana, la vida silvestre y las especies marinas. En algunos casos, la presencia de metales en la formulación de polímeros aumenta el riesgo de contaminación y polución. Para evitar los impactos sociales y ambientales de estos materiales, se debe proponer una conciencia emergente sobre la reciclabilidad de polímeros (Cestari, Franc, Coval, & Mendez, 2019).

Los desechos plásticos consisten en una amplia variedad de matrices poliméricas. La mayor fracción de desechos está compuesta por poliolefina (60% a 70%), poliestireno (PS) (10% a 15%), poli cloruro de vinilo (PVC) (15%), y poli tereftalato de etileno (PET) (5%). Los desechos plásticos son un componente importante de los desechos sólidos en muchos países. Las principales dificultades en el reciclaje de polímeros se deben a su degradación. Es necesario para el re procesamiento producir polímeros reciclados con las propiedades mecánicas requeridas (Al-Maadeed & Labidi, 2014).

Por su parte, Córdoba C. , Mera, Martínez, & Rodríguez, (2010), respaldan lo anteriormente descrito, para estos autores los contenidos de los residuos sólidos urbanos (RSU) son mayoritariamente polietileno (PE) y polipropileno (PP) (alrededor del 60%) y en menor proporción están el poliestireno (PS), cloruro de polivinilo (PVC), polietilentereftalato (PET), poliestireno-butadieno (PS-BD), poli (metacrilato de metilo) (PMMA). Lo que sitúa al PP y PE como las matrices poliméricas recicladas como las de mayor potencial para su aprovechamiento en WPC.

Por último, Cestari, Franc, Coval, & Mendez, (2019), mencionan que el reciclaje de compuestos a base de polímeros termo endurecibles presenta problemas adicionales debido a que se encuentra embebidas con alto contenido de relleno, lo que dificulta su aprovechamiento para WPC con materiales reciclados, mencionan que una alternativa es triturar estos materiales y utilizarlos como rellenos en la fabricación de productos a los que normalmente se les añaden rellenos ordinarios (como carbonato de calcio o sílice) debido a que, estos productos tienen las mismas propiedades mecánicas, o incluso mejores, que el material compuesto inicial de primera generación.

5.2 Producción agrícola en Colombia

Se realizó una revisión de cuáles son los principales cultivos obtenidos en Colombia, para tener un contexto nacional y de posibles residuos generados. A continuación, se muestra las últimas estadísticas disponibles del total de área cultivada y la producción nacional.

Tabla 3.

Total, área cultivada por grupos de cultivos.

Grupo de cultivos	Área sembrada / plantada (ha)	Participación (%)	Área cosechada/ edad productiva (ha)	Participación (%)	Producción (ton)	Participación (%)
Total, general	5.099.774	100,0	3.610.087	100,0	50.354.048	100,0
Agroindustriales¹	2.049.067	40,2	1.691.858	46,8	32.592.356	64,7
Cereales²	1.034.065	20,3	931.012	25,8	4.636.220	9,2
Plantaciones forestales³	776.129	15,2				
Tubérculos y plátano⁴	497.867	9,8	444.301	12,3	6.207.661	12,3
Frutales⁵	450.239	8,8	303.237	8,4	4.062.634	8,1
Hortalizas, verduras y legumbres⁶	254.925	5,0	239.679	6,6	2.549.936	5,1
Otras áreas cultivadas⁷	37.482	0,7				
Árboles frutales dispersos⁸					305.241	0,6

Fuente: (DANE, 2017).

1 café, cacao, caña de azúcar, caña panelera, palma de aceite, soya y otros agroindustriales.

2 arroz, maíz amarillo, maíz blanco y otros cereales.

3 acacia, teca, pino, ciprés, eucalipto, aliso, cedro, pino, caracolí, yopo, badea, arrayan, entre otros.

4 plátano, yuca, papa y otros tubérculos.

5 banano, limón, mandarina, naranja, aguacate, curuba, granadilla, guanábana, guayaba, lulo, mango, maracuyá, marañón, mora, pitahaya, pera, tomate de árbol y otros frutales.

6 arveja, cebolla bulbo, cebolla rama, fríjol, haba, tomate, zanahoria, maní, hortalizas bulbo, hortalizas de raíz, hortalizas de fruto, hortalizas de flor, hortalizas de hoja, hortalizas de tallo y demás hortalizas.

7 otras áreas cultivadas: Maíz forrajero, caña forrajera, sorgo forrajero, entre otros. Agapanto, anturio, astromelia, ave de paraíso, claveles, girasol gladiolo, lirio, orquídeas, entre otras. Albahaca, altamisa, hierbabuena, manzanilla, limonaria, orégano, ruda, sábila, entre otras.

8 árboles hallados en forma aislada de tal manera que no es posible estimar para ellos la superficie plantada, es común encontrarlos alrededor de las viviendas, al borde de los campos de cultivos o sirviendo de linderos como cercas vivas, de los cuales se obtiene una producción destinada a venta o autoconsumo.

Dentro de la producción agrícola nacional, es importante identificar cuáles son los principales cultivos, de acuerdo con estadísticas del, DANE, (2017), en 2017 (último año con cifras disponibles), el área total sembrada fue 5.099.774 ha, los cultivos que mayor participación registraron fueron los agroindustriales (40,2%) y cereales (20,3%).

5.2.1 Grupo agroindustrial

El total de área sembrada o plantada en el país del grupo de agroindustriales fue de 2.049.067 ha. Las mayores participaciones corresponden al cultivo de café (39,8%), palma de aceite (25,3%) y caña de azúcar (13,5%). El área en edad productiva o cosechada para este grupo fue de 1.691.858 ha. Los cultivos de mayor participación fueron: café (38,1%), palma de aceite (26,9%) y caña azúcar (14,7%). La producción total reportada por los cultivos de este grupo fue de 32.592.356 toneladas. Los cultivos con mayor producción registrada fueron la caña de azúcar con 22.224.596 toneladas y palma de aceite con 7.914.444 toneladas, con una participación de 68,2% y 24,3% respectivamente (DANE, 2017).

5.3 Residuos agroindustriales

A continuación, se muestran cuáles son los principales residuos agroindustriales en Colombia:

5.3.1 Residuos de café

Colombia, es el segundo productor mundial de café, siendo éste el cultivo nacional más relevante en el sector agrícola. En la producción de café como bebida solo el 9,5% del peso del fruto es utilizado para su elaboración, quedando un 90,5% de residuos entre los que se destacan las hojas, ramas, y tallos que se generan durante la renovación de los cafetales, frutos no adecuados para la producción de café. La pulpa del fruto que representa un 44% del peso del fruto seco. Y la borra que es el producto de la preparación de café a partir del café tostado y molido, representa el 10% del peso del fruto seco. Los subproductos del café son pulpa, mucílago, cisco, borra, tallo y ripios (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

5.3.2 Residuos de arroz

Debido a que la cantidad de subproductos del arroz es elevada e industrialmente son poco reutilizados, su aprovechamiento podría estar enfocado a la obtención de etanol, la sustitución del uso de carbón para la producción de energía en las plantas de procesamiento, en la adecuación del suelo y como sustrato para los cultivos, o como para la obtención de sílice como material suplementario de cemento, entre otros (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

5.3.3 Caña de azúcar y Caña panelera

La industria azucarera es una de las más representativas en Colombia con 15 ingenios ubicados en el Valle geográfico del río Cauca. La caña de azúcar es utilizada mayoritariamente para la producción de azúcar y alcohol carburante. Durante el proceso de producción genera por tonelada de tallos 250 kg de bagazo, 30 kg de cachaza, 6 kg de cenizas, 45 kg de melaza; además, por cada L de alcohol producido, se genera hasta 15 L de vinaza. Esto sin considerar que durante la cosecha se generan residuos de hojas verdes, hojas secas, cogollo y caña remanente que representan el 25% de la caña limpia, los cuales en su mayoría son dejados en el campo y

quemados posteriormente, perdiéndose todo el potencial energético y económico de dichos residuos (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

5.3.4 Maíz

Uno de los cultivos de ciclo corto más relevantes a nivel nacional. En los cultivos de maíz, se genera una gran cantidad de materia orgánica la cual alrededor del 50% se cosecha en forma de grano y el porcentaje restante corresponde a residuos como la caña, hojas, tusa, panoja, capacho, entre otras, se generan rastrojo, tusa y de capacho. Estos residuos pueden ser utilizados en diferentes procesos como en la obtención de fibra para alimentación animal y producción de etanol o para la cobertura del suelo con el fin de protegerlo de las condiciones ambientales (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

5.3.5 Residuos de banano y plátano (*Musa paradisiaca*)

Cuando el banano y/o plátano de exportación no alcanza las características requeridas, estos frutos son rechazados y posteriormente transformados en residuos cuyo destino final reutilizable corresponde principalmente a compostaje y alimentación animal, el resto irá para los rellenos sanitarios. Con el fin de aprovechar las características potenciales de estos productos, se han podido evaluar sus propiedades fisicoquímicas para producir compuestos de valor (Peñaranda, Montenegro, & Giraldo, 2017).

5.4 Fibras naturales para la obtención de WPC en Colombia y Nariño

La geografía relacionada con la disponibilidad de fibra juega un papel importante en la selección de fibra. En Colombia se han estudiado fibras diferentes a las mencionadas anteriormente, que son consideradas como tradicionales en el desarrollo de WPC.

De acuerdo con Salgado & Velandia (2019), Colombia se encuentra en las primeras fases en el desarrollo de WPC, su mayor utilización en terrazas al aire libre comúnmente conocidas

como pisos deck. seguido de muros y paredes para algunas aplicaciones de viviendas de interés social, estos materiales utilizan como refuerzo madera pulverizada o cascarilla de café. El uso en la arquitectura nacional de este tipo de materiales no es común y debido a los altos costos de producción, un solo productor abastece el 25 % del requerimiento nacional, el resto es ocupado por productos importados de china principalmente, y en menor proporción por el mercado norteamericano y europeo.

En cuanto a investigaciones realizadas con fibras naturales, los artículos consultados se centran principalmente en la caracterización de las fibras y evaluar su potencial, al igual que evaluar el efecto de someter las fibras a tratamientos físicos y químicos para mejorar las condiciones de la interfaz, por tanto, las investigaciones de las fibras en matrices poliméricas son pocas, probablemente como se mencionó anteriormente debido al costo de producción y equipos.

Las investigaciones en Colombia se han centrado principalmente en fibras como:

Guadua Angustifolia Kunth ((Sanchez, Capote, & Carrillo, 2019); (Moreno, Florez, & Hernandez, 2018); (Sánchez, Aperador, & Capote, 2018); (Espitia, y otros, 2018); (Sánchez, Morales, & Caicedo, 2017); (Cuéllar & Muñoz, 2009)). **Fique** ((Luna, Mariño, Lizarazo, & Beltrán, 2017); (Contreras, Hormaza, & Maraño, 2009); (Muñoz, Hidalgo, & Mina, 2014)). **Plátano/banano** ((Rodríguez, Fabbri, Orrego, & Owsianiak, 2020); (Rodríguez, Orrego, Ribeiro, & Pecas, 2018); (Rodríguez, Sarache, & Orrego, 2014); (Gutiérrez, Zuluaga, Cruz, & Gañán, 2005)). Y en menor proporción fibras como **cáscara de arroz** (Hidalgo & Salinas, 2019). **Damagua** *Poulsenia armata*, **guérregue**, **palma estera** *Astrocaryum malybo*, **caña flecha** *Gynerium sagittatum*. **Iraca** *Carludovica palmata* (Mora & Ramón, 2017). **Algodón, cáñamo y sisal** (Amigo, Salvador, Llorens, Martí, & Sahuquillo, 2008). **Cisco de café, Pseudotallo**

banano, Fruto vacío palma, Bagazo palma (Acuña, 2007). **Fibras de bagazo de caña** (Luna F. , 2015). **Cisco de café** (Hernández, Rojas, & Costa, 2017).

En Nariño Córdoba C. , Mera, Martínez, & Rodríguez (2010), investigaron la fibra de Tetera (*Stromanthe stromathoides*). Las pruebas de compresión, flexión y tensión, muestran que la fibra no aumenta la resistencia, pero si incrementa su ductilidad y esto puede ser aprovechado como ventaja para materiales que requieran ser livianos y muy deformables.

Por otra parte, en Nariño Revelo, Osorio, Checa, & Vaquiro (2019), evaluaron las propiedades mecánicas de fibras naturales como la del **fique, algodón y plátano**, estos autores encontraron que la fibra de plátano presentó mayores velocidades de pérdida de calidad mecánica y que las fibras de fique y algodón presentaron menores velocidades de pérdida de calidad mecánica. Por lo tanto, estas fibras (fique y algodón) podrían utilizarse para sustituir a la fibra de polipropileno en los sistemas de tutorado en el cultivo de arveja.

En Colombia existen muy pocas empresas dedicadas a la recuperación y procesamiento de residuos fibrosos, y además considerando la alta disponibilidad de materias primas que ofrece debido a disponibilidad de materiales lignocelulósicos de fibras y residuos agro-industriales (Gómez, Navacerrada, Díaz, & Fernández, 2020). Existe una gran oportunidad de proponer nuevos materiales que podrían introducirse en la cadena productiva en torno a la recuperación y procesamiento de fibras.

6. Diseño metodológico

A continuación, se describe la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto de investigación. La descripción incluye el tipo de investigación, la metodología, las técnicas de recolección y análisis de la información.

6.1 Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental y se desarrolló desde los aportes del enfoque cuantitativo, por considerarlo coherente con el objetivo general “Evaluar la disponibilidad y características de las fibras vegetales con potencial uso en el desarrollo de materiales reforzados – Wood Plastic composites (WPC) en el Departamento de Nariño” y también con los objetivos específicos. Para resolver estos objetivos es necesario realizar un proceso de experimentación lo que nos permitirá obtener información de tipo primaria, de igual manera; se debe recurrir a fuentes de información secundaria con el fin de obtener información que permita resolver dichos objetivos.

6.2 Metodología

6.2.1 Elaborar un inventario de fibras provenientes de residuos agroindustriales que puedan ser usadas como carga en la mezcla con materiales termoplásticos

Para elaborar el inventario de fibras vegetales que se obtienen a partir de residuos agroindustriales fue necesario realizar una revisión del estado del arte de la producción agrícola en Colombia y los principales residuos agroindustriales que estas actividades generan. Adicionalmente se estudió la cadena productiva de fibras artesanales en Nariño a partir de documentos encontrados a través de la revisión del estado del arte, esto permitió elaborar una base de datos de las fibras artesanales disponibles en el departamento de Nariño.

De igual manera se desarrolló una base datos de los principales cultivos y de los municipios más importantes para hacer una preselección de algunas cadenas agroindustriales que generan fibras lignocelulósicas con potencial en el desarrollo de WPC. La técnica de recolección de información que se utilizó para realizar este apartado fue:

El análisis documental: Para esto fue necesario indagar y recabar datos a partir de información secundaria en documentos como; tesis, artículos científicos, datos estadísticos, entre otros. Esto con el fin de encontrar la información necesaria para poder realizar un inventario adecuado para el desarrollo de este objetivo. Los documentos fueron provenientes de fuentes confiables, actualizadas, con información del autor.

Con la base de datos anterior se realizaron visitas de campo a los principales municipios del departamento productores de fibras. De acuerdo a esto; se establecieron algunos criterios útiles para la selección de fibras en el desarrollo de estos compuestos reforzados. La técnica de recolección de información que se uso fue:

La entrevista formal: Durante el desarrollo de este objetivo, también fue necesario realizar visitas de campo a algunos municipios del departamento productores de fibras como: iraca, fique, caña panelera, plátano, piña, arveja, frijol, cisco de café, banano, y aserrín. Se tuvo una conversación con dichos productores en la que contaban como era la producción, que hacían con los residuos de estos productos.

Posteriormente, toda la información recolectada a partir de los documentos encontrados en internet fue clasificada según su origen (artesanales o agroindustriales) para obtener un mayor orden de estas y ayudar a la selección de las fibras, adicionalmente con la ayuda de las entrevistas formales se obtuvo aún más información que nos permitió mejorar el inventario. Con base en los datos recolectados se estudiaron algunos criterios para la selección de fibras.

Finalmente, para la selección de fibras se elaboró una matriz de comparación entre los principales factores y a cada factor se le asignó un porcentaje de importancia. A cada fibra se les evaluaron los factores escogidos y en base a la visita de campo se les asignó una calificación de 1 - 5 (donde 1 = Bajo, 2 = Medio bajo, 3 = Medio, 4 = Medio alto, 5 = Alto) el cual se multiplica por el % de importancia, la sumatoria total fue el indicador que se usó para la selección de la fibra.

6.2.2 Realizar la caracterización fisicoquímica de 4 fibras de origen agroindustrial que potencialmente puedan ser usadas como carga en la producción de polímeros reforzados

Para determinar las características fisicoquímicas y las propiedades mecánicas de las fibras escogidas gracias a la matriz de comparación, se realizaron distintas pruebas de laboratorio. Para esto fue necesario enviar algunas muestras de las fibras al laboratorio del “Grupo de Apoyo a la Investigación y Desarrollo Agroalimentario GAIDA” perteneciente a la universidad de Nariño.

Las pruebas escogidas para determinar las características fisicoquímicas y las propiedades mecánicas de estas fibras fueron:

6.2.2.1 Contenido de Humedad.

La humedad de las muestras se midió mediante una balanza de humedad KERN DBS. La evaluación se realizó con una muestra de 0,2 gramos de material que se pesaron en la balanza, la programación para evaluar el contenido de humedad fue con una rampa de incremento de temperatura gradual hasta los 200°C y posterior se mantiene la temperatura hasta un diferencial de 0.05% en el cambio de peso de la muestra y luego decrece gradualmente la temperatura.

Figura 5.

Medición del contenido de humedad



Fuente: esta investigación.

6.2.2.2 Actividad de agua (a_w)

La actividad de agua de las muestras se midió mediante un medidor Rotronic Hygrolab que consta de un medidor y un sensor previamente calibrado con silica gel (1 mm diámetro de

partícula) a temperatura ambiente. Se añadió una cantidad adecuada en el soporte plástico y se puso a ras con el borde. Por último, se colocó la muestra en el sensor y se midió la actividad de agua.

Figura 6.

Medición de actividad de agua



Fuente: esta investigación.

6.2.2.3 Absorción de humedad (AH)

La absorción se calculó teniendo en cuenta el peso entre una muestra inicial (P_0) y una muestra después de 6 horas de inmersión (P_f) en agua a temperatura ambiente (15-20 °C). La absorción de humedad se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$AH(\%) = \frac{P_f - P_0}{P_0} \times 100$$

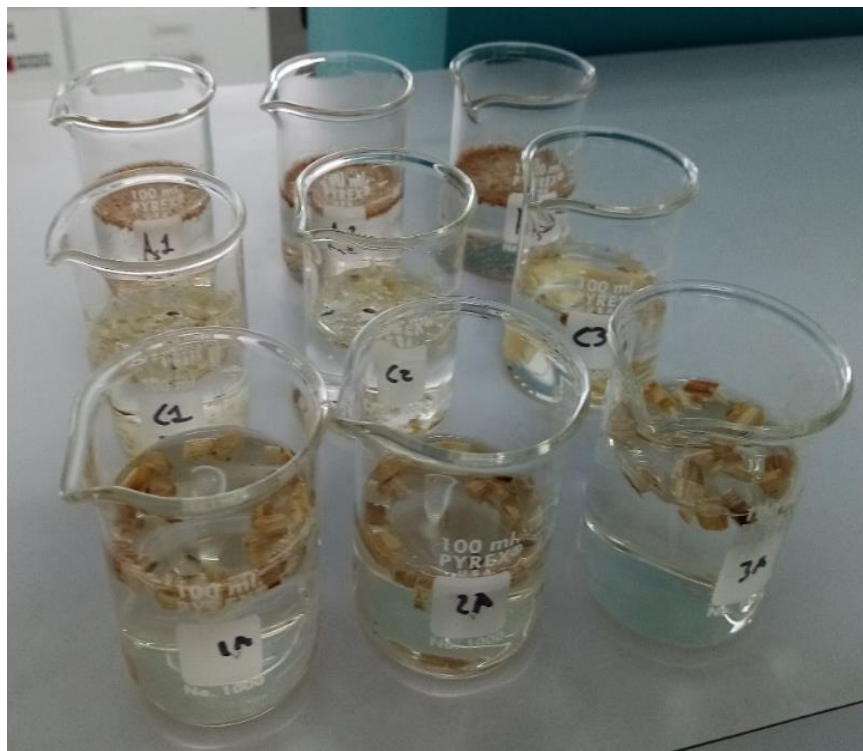
P_0 : peso inicial de la muestra antes de la inmersión.

P_f : peso final de muestra después de 6 horas de inmersión.

AH: porcentaje de absorción de humedad.

Figura 7.

Determinación de la absorción de agua



Fuente: esta investigación.

6.2.2.4 Densidad aparente (ρ_a).

La densidad aparente se calculó teniendo en cuenta la relación de masa/volumen, se colocó una cantidad de muestra en un recipiente de plástico de volumen conocido (V), se enrasó y se pesó (P_t) y se le resto el peso del recipiente (P_r). La densidad se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_a = \frac{P_t - P_r}{V}$$

V: Volumen del recipiente donde se colocó la muestra.

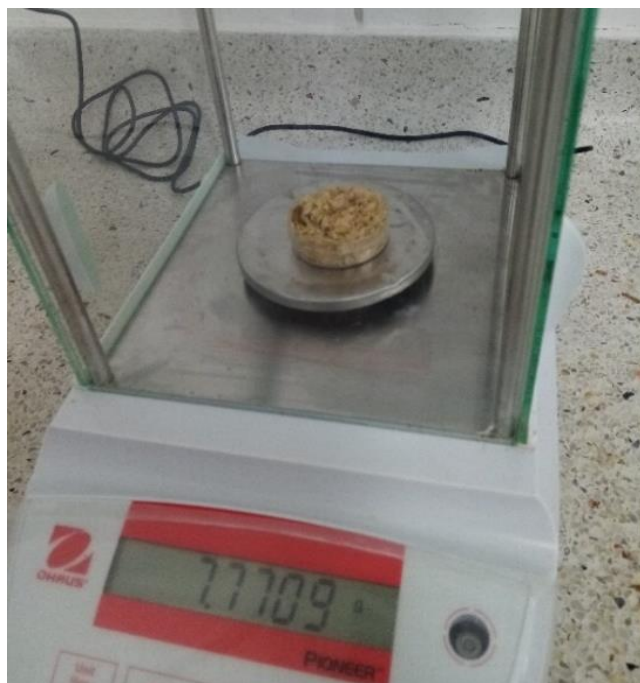
P_t : Peso la muestra dentro del recipiente.

P_r : peso del recipiente vacío.

ρ_a : Densidad aparente.

Figura 8.

Medición de la densidad aparente



Fuente: esta investigación.

6.2.2.5 Densidad Real (ρ_r).

Para calcular la densidad real las muestras de fibras y tallos primero se sometiendo a reducción de tamaño y molienda.

La densidad real se calculó teniendo presente el siguiente método, primero se pesó un frasco con esmeril completamente seco (FT), luego se llenó el recipiente con esmeril, con agua destilada hasta su capacidad máxima y se pesó (FTW). El frasco se llenó con una cantidad determinada de material (muestras), se cerró con el esmeril y se pesó (FTM), luego se llenó con agua destilada nuevamente y se pesó (FTWM). Se midió la temperatura del agua (15°C) y se calculó la densidad real siguiendo la ecuación, donde γ es el peso específico del agua a la temperatura determinada:

$$\rho_r = \frac{FTM - FT}{(FTW - FT) - (FTWM - FTM)\gamma}$$

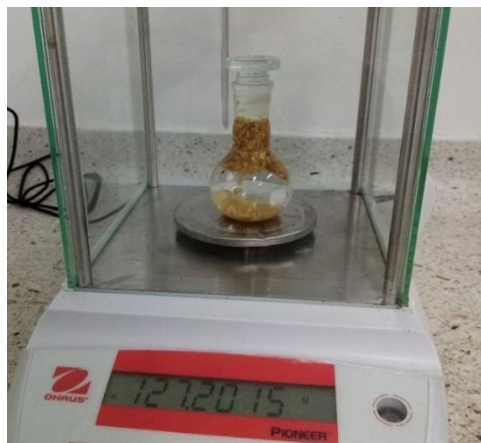
FT: Peso de un frasco con esmeril seco.

FTW: Peso del frasco con esmeril lleno hasta su máxima capacidad con agua destilada.

FTM: Peso del frasco con esmeril sin agua y con una cantidad determinada de muestra.

FTWM: Peso del frasco con esmeril con la muestra y lleno de agua destilada.

γ : Peso específico del agua a una temperatura determinada.

Figura 9.***Medición de la densidad real en un balón aforado de 50 ml con esmeril***

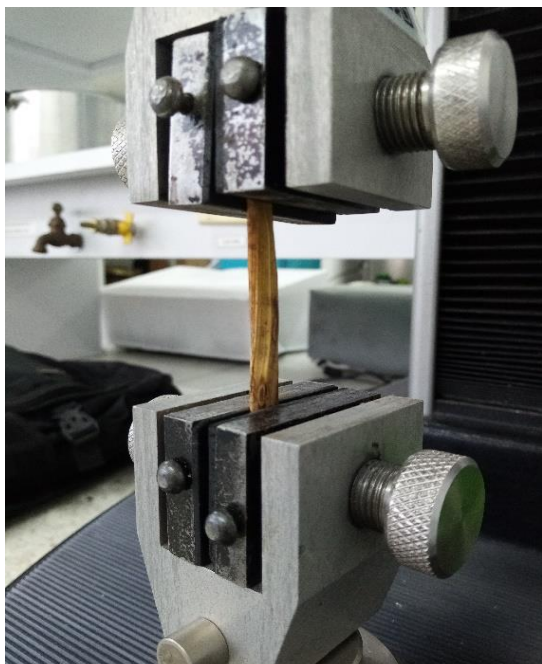
Fuente: esta investigación.

6.2.2.6 Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas se evaluaron únicamente para las muestras de hilos de fique y tallos secos de arveja. La evaluación se realizó siguiendo la norma técnica internacional ASTM D882 y ASTM D3822, en un texturómetro Lloyds LS1 adecuada con mordazas para fibras (hilos) o mordazas para películas plásticas (tallos) según el tipo de muestra. Se realizó una prueba de tensión con separación inicial de mordazas de 5 cm, velocidad de separación de 100 mm/min, precarga de 1 N y velocidad de precarga/tensión de 21mm/min. Las muestras fueron previamente almacenadas a humedad relativa 55-60% y temperatura entre 20-15°C. El texturómetro está acoplado al software Nexygen Plus que permite obtener los análisis mecánicos de carga máxima (N), resistencia a la tracción (MPa), porcentaje de elongación o deformación (%), rigidez (N/m) y módulo de Young o elasticidad (MPa).

Figura 10.

Medición de las propiedades mecánicas del tallo de arveja completo (a) y tallo de arveja en lamina (b)



Fuente: esta investigación.

Con esta información se escogió la fibra que tenía las mejores propiedades para la producción de WPC.

6.2.3 Determinar la disponibilidad de plásticos aptos para la elaboración de WPC en las recicladoras que se encuentran en la ciudad de Pasto Nariño.

Para la producción de WPC también es necesario conocer la disponibilidad de plástico existente en la ciudad de Pasto. Para esto se realizaron visitas a las empresas recicladoras más reconocidas en la ciudad, con el fin de obtener información sobre la disponibilidad, precios de compra y venta, tipos de plásticos y causas del aumento y disminución del precio de este material.

Para esto fue necesario utilizar la siguiente técnica de recolección de información:

Encuesta personal: para este apartado fue necesario realizar una encuesta a cada empresa de recolección seleccionada en la ciudad de Pasto. La encuesta fue necesaria ya que la información que se necesitaba en este objetivo no se encontraba en documentos de internet. Por lo que la opción más viable fue salir a visitar a estas empresas.

Las encuestas realizadas a las empresas permitieron conformar una base de datos de los productos plásticos reciclables disponibles en Pasto. Para el análisis de las encuestas se tuvo en cuenta una revisión del estado del arte sobre distintos productos plásticos, adicionalmente; se realizó una revisión en artículos científicos y estudios realizados en Colombia y Nariño acerca de la utilización de plásticos reciclables para la obtención de WPC.

6.2.4 Evaluar mezclas de fibra, plástico y acoplante para la producción de Wood Plastic Composites – WPC.

Una vez seleccionada la fibra y conociendo la disponibilidad del plástico en la ciudad de Pasto. Fue necesario realizar un diseño de experimentos que nos ayudara a realizar una serie de mezclas entre la fibra escogida, el plástico y el acoplante, para obtener los distintos productos finales de WPC.

El diseño que se utilizó fue un diseño compuesto central rotatorio, con 4 puntos factoriales, 2 puntos axiales, y 2 repeticiones en el punto central, para un total de 9 ensayos. El diseño se realizó con una repetición dando como resultados 18 ensayos de los cuales se obtuvieron 18 muestras. Como factores experimentales se estudiaron el porcentaje de fibra (F) (5 – 25% p/p) y el porcentaje de acoplante (A) (2 – 5 % p/p), las variables de respuesta escogidas fueron la resistencia a la compresión (RC), módulo de Young para compresión (MC), resistencia a la flexión (RF), y módulo de Young para flexión (MF).

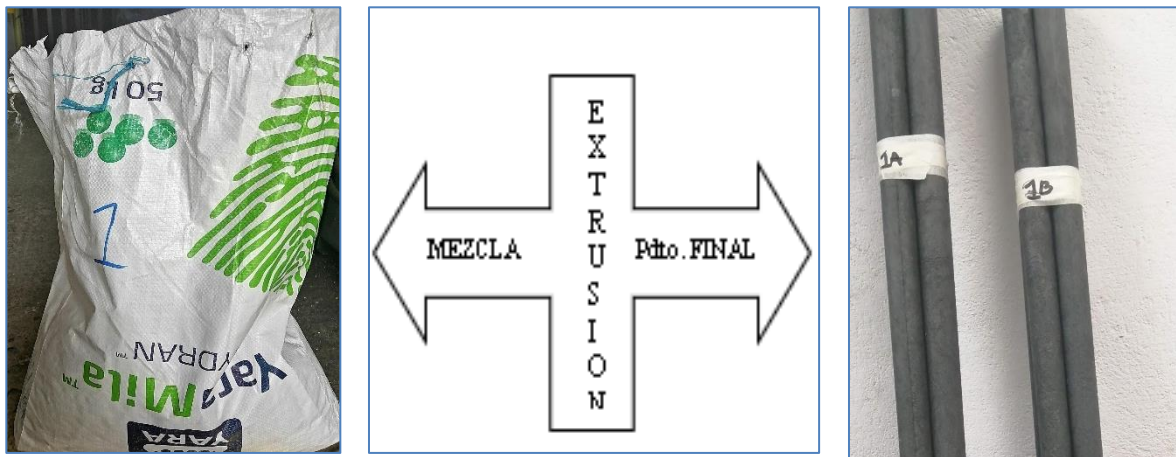
El desarrollo de las mezclas se hizo en un equipo de extrusión el cual fue proporcionado por la empresa INNOAGROCOLOMBIA S.A.S. y los productos obtenidos de estas mezclas fueron analizados con el fin de determinar cual tenía las mejores características de presión y compresión, para dicha finalidad fue necesario llevar muestras de los productos obtenidos al “Laboratorio Integrado de Ingeniería Civil – TEC INGENIERIA S.A.S.”.

Figura 11.

Proceso de mezclado entre fibra, plástico y acoplante



Fuente: esta investigación.

Figura 12.***Proceso de extrusión y resultado final***

Fuente: esta investigación.

Para el análisis del diseño central compuesto rotatorio, se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en el laboratorio especializado y las tablas arrojadas por el diseño de experimentos junto con sus fórmulas y gráficos, con ayuda de estos se procedió a analizar las muestras para definir cuál de todas era la mejor y así escoger la mezcla óptima para desarrollar los WPC.

El equipo usado para elaborar las muestras de WPC es un equipo extrusor de un solo tornillo rotatorio que cuenta con una tolva, chaqueta, un medidor de temperatura y la parte final donde se moldea el wpc en los moldes deseados. La chaqueta cuenta con 4 zonas de temperatura las tres primeras son a base de gas y la última es eléctrica. la temperatura de la camisa se trabajó por debajo de 220 °C para evitar que la fibra se carbonizara. En la tolva se cargaron 10 kg de mezcla por cada ensayo.

Figura 13.

Equipo extrusor de un solo tornillo rotatorio



Fuente: esta investigación.

Figura 14.

Tolva del equipo extrusor



Fuente: esta investigación.

Figura 15.

Chaqueta del equipo extrusor



Fuente: esta investigación.

La chaqueta cuenta con 4 zonas de temperatura 3 de gas y eléctrica:

La primera zona se recomienda mantenerla a una temperatura de 220°C y es de gas, la segunda zona (camisa) puede tener una temperatura entre 190°C y 210°C también es de gas, la temperatura de la tercera zona puede variar en el mismo intervalo que la T° de la camisa, por último, la cuarta zona puede tener valores de temperatura cercanos a 206°C y es eléctrica.

Figura 16.

Moldes para elaboración de wpc



Fuente: esta investigación.

Figura 17.

Piscina para enfriar los moldes de wpc



Fuente: esta investigación.

La mezcla de fibra, plástico y acoplante que es colocada en la tolva y pasa por todo el proceso de extrusión finalmente gracias a la presión que genera el equipo es expulsada a los moldes que se observan en la imagen 14. Los cuales se obtuvieron específicamente para el desarrollo de esta investigación. la temperatura a la que sale esta mezcla suele estar entre los 180°C y los 200°C. Una vez que los moldes estén llenos, se procede a colocarlos en una piscina (ver imagen 15) para que estos alcancen una temperatura lo suficientemente baja, que facilite la extracción de los WPC.

Figura 18.

Extracción de los wpc de los moldes



Fuente: esta investigación.

6.3 Consideraciones éticas

El proyecto no implica ningún tipo de requerimientos éticos especiales ya que no se trabaja con microorganismos, animales, seres humanos ni con comunidades. Tampoco se relaciona con el uso de fármacos ni se realizarán colectas de materiales biológicos en campo.

7. Presentación y discusión de resultados

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a partir del desarrollo y aplicación de la metodología mencionada en el capítulo anterior, se describe el desarrollo de cada uno de los métodos y el resultado final de este proyecto.

7.1 Fibras de origen artesanal

Las investigaciones de WPC en Colombia se han centrado principalmente en guadua, fique y banano. Sin embargo, es importante estudiar que fibras se generan en Nariño tanto de la explotación agrícola como para su uso para generar productos artesanales.

De acuerdo con el Plan estratégico departamental en ciencia tecnología e innovación en Nariño (2011), dentro de las cadenas productivas del departamento de Nariño se encuentran algunos elementos diferenciales muy importantes para el desarrollo en el departamento, como la cadena de las artesanías, un aporte cultural e histórico que ha utilizado a lo largo de los años fibras naturales para desarrollar diversos tipos de artesanías, pero que afronta problemáticas relacionadas con la modernización, sin embargo, este documento menciona que, a pesar de que algunas de estas prácticas tienden a desaparecer, el desarrollo proporciona a la cultura condiciones para que se desarrollen y se transformen y en este contexto la investigación puede ayudar al sector de artesanías y al departamento. El uso de fibras naturales en nuevos productos amigables con el medio ambiente, puede ser una forma nueva de aprovechamiento de estos recursos y un medio para generar innovación, ciencia y tecnología e impulsar el desarrollo del departamento.

A continuación, se presenta la tabla 4 con un resumen de los principales centros artesanales y las principales fibras producidas en el departamento de Nariño.

Tabla 4.***Núcleos artesanales más importantes en Nariño.***

Fibras vegetales	Municipios	Usos
Fique	El Rosario, Policarpa, Leiva, Sandoná, Chachagüí, El Tambo y Pasto.	cestería, sombrerería y cordelería.
Iraca	Los Andes, Pupiales, Consacá, Sapuyes, La Unión, San Pablo, La Cruz, Guaitarilla, Túquerres, Briceño, El Tambo, Buesaco, Tumaco, Ricaurte, La Llanada y Pasto.	Sombrerería y cestería.
Chin o caña de castilla	El Tambo y San Pablo	cestería.
Bejucos	La Cruz, Pasto y San Pablo	cestería.
Tetera	Ricaurte	Cestería y sombrerería.
Chocolatillo	Olaya Herrera (comunidades indígenas de El Turbio, Caimanes y Robles sobre el río Satinga) y Nueva Floresta sobre el río Sanquianga	Cestería y sombrerería.
Junco	Tumaco	Esteras.

Fuente: (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

7.1.1 Producción nacional y departamental de las fibras

Para evaluar la disponibilidad de estas fibras, que es un factor importante a la hora de desarrollar WPC, se analiza la producción nacional y departamental.

7.1.1.1 Fique.

- **Producción nacional:**

La principal región productora de fique en el país es la región Andina, Se cultiva fique en 10 departamentos de los cuales 72 municipios dependen de esta actividad económica, los seis principales departamentos productores de fique son Cauca, Nariño, Santander, Antioquia, Caldas y Guajira cubriendo cerca del 99% del área sembrada y la producción nacional (MINAGRICULTURA, 2018).

Tabla 5.***Producción nacional de fique año 2018.***

Departamento	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento(ton/ha)	Producción nacional	Área nacional
ANTIOQUIA	761,10	1.122,91	1,48	5,92	5,69
BOYACA	35,00	23,40	0,67	0,12	0,26
CALDAS	1,00	1,00	1,00	0,01	0,01
CAUCA	5.346,00	7.536,60	1,41	39,70	40,00
LA GUAJIRA	259,00	1.091,00	4,21	5,75	1,94
NARIÑO	5.957,00	7.742,20	1,30	40,79	44,57
NORTE DE SANTANDER	6,00	3,00	0,50	0,02	0,04
RISARALDA	106,00	84,80	0,80	0,45	0,79
SANTANDER	895,00	1.377,40	1,54	7,26	6,70

Fuente: (MINAGRICULTURA, 2018).

De acuerdo con las estadísticas para el año 2018 (último año con cifras disponibles), el principal productor de fique a nivel nacional es Nariño, seguido por el Cauca. El Ministerio de Agricultura (2018), afirma que a nivel mundial se presenta un déficit de la fibra de yute y sisal, lo que genera oportunidades de crecimiento y competitividad en el sector, de cara a la generación de productos amigables con el medio ambiente.

- **Producción departamental:**

A continuación, se presentan los datos de producción a nivel municipal de fique en el departamento de Nariño:

Tabla 6.

Producción de fique en Nariño año 2018.

Municipio	Área sembrada (ha)	Área cosechada (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ton/ha)
ALBAN	111,00	91,00	137,00	1,51
ARBOLEDA	286,00	261,00	522,00	2,00
BELEN	49,00	49,00	49,00	1,00
BUESACO	282,00	282,00	338,40	1,20
CHACHAGUI	278,00	218,00	436,00	2,00
COLÓN	125,00	125,00	125,00	1,00
EL TABLÓN	6,00	1,00	1,00	1,00
EL TAMBO	1.500,00	1.500,00	1.800,00	1,20
GUAITARILLA	200,00	200,00	200,00	1,00
IMUES	17,00	15,00	18,00	1,20
LA FLORIDA	1.651,00	1.644,00	1.996,80	1,21
LA UNIÓN	20,00	15,00	18,00	1,20
MALLAMA	180,00	180,00	288,00	1,60
NARIÑO	8,00	8,00	8,80	1,10
PASTO	105,00	105,00	105,00	1,00
PROVIDENCIA	5,00	3,00	5,40	1,80
SAMANIEGO	55,00	52,00	52,00	1,00
SAN BERNARDO	748,00	736,00	956,80	1,30
SAN LORENZO	300,00	290,00	377,00	1,30
SAN PABLO	72,00	70,00	140,00	2,00
SAN PEDRO DE CARTAGO	78,00	70,00	84,00	1,20
TUQUERRES	47,00	42,00	84,00	2,00

Fuente: (MINAGRICULTURA, 2018).

Como se observa, los principales productores de fique en Nariño son los municipios de la Florida, el Tambo y San Bernardo, seguidos de San Lorenzo, Chachagüí y Mallama.

7.1.1.2 Iraca (paja toquilla).

- **Producción nacional:**

Tabla 7.

Producción de Iraca a nivel nacional para el año 2018.

Departamento	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)	Producción nacional	Área Nacional
CALDAS	14,00	19,60	1,40	4,94	5,71
CAUCA	2,00	6,00	3,00	1,51	0,82
NARIÑO	229,00	371,00	1,62	93,55	93,47

Fuente: (MINAGRICULTURA, 2018).

Como lo muestran las estadísticas del Ministerio de Agricultura, el principal productor de Iraca a nivel nacional es Nariño seguido de los departamentos de Caldas y Cauca.

- **Producción departamental:**

A continuación, se presenta el área cultiva, producción y rendimiento de los 3 municipios productores de iraca en Nariño. Para el periodo de 2018 (ultima año con cifras disponibles):

Figura 19.

Área de cultivo de iraca, por municipios en Nariño periodos (2012-2018)



Fuente: Evaluaciones Agropecuarias, del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018).

Figura 20.

Producción del cultivo de Iraca por Municipios en Nariño periodos (2012-2018)



Fuente: Evaluaciones Agropecuarias, del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018).

Figura 21.***Rendimiento del cultivo de Iraca por Municipios en Nariño periodos (2012-2018)***

Fuente: Evaluaciones Agropecuarias, del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (2018).

En cuanto a la producción a nivel municipal los principales productores son Linares y Colón, como se observa en los gráficos (Figuras 17, 18 y 19). El municipio de la Unión ha disminuido su producción.

7.1.1.3 Otras especies.

Es importante tener en cuenta que, para algunas especies de fibras presentadas en la Tabla 3, no fue posible encontrar cifras y estadísticas actualizadas, de acuerdo con Linares, Galeano, N., & Figueroa (2008), en Colombia un número muy reducido de fibras tienen sistemas de cultivo extensivos como en el caso del fique que se encuentra dentro de la economía nacional y posee grandes cultivos, al mismo tiempo, la fibra de la iraca se ha desarrollado en cultivos cercanos a sitios aledaños a los centros artesanales, por tanto, estas fibras tienen alta disponibilidad en el departamento, sin embargo, el resto de fibras crecen desde sitios abiertos,

hasta bosques y selvas, por esta razón, para estas últimas, no existe información clara de su disponibilidad y producción a nivel nacional y departamental, adicionalmente algunas no han sido caracterizadas en cuanto a su calidad física, química y mecánica.

En este contexto, la china y el atacorral son bejucos que dependen de la existencia del bosque para establecerse y desarrollarse, sumado a la eliminación de la cobertura vegetal debido a la ampliación de la frontera agropecuaria y la minería, ha disminuido su disponibilidad. Esta circunstancia es bien conocida por artesanos de Nariño, quienes declaran que cada vez es más difícil encontrar plantas y por eso deben desplazarse más lejos para obtener materia prima (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

De igual manera, la fibras de chocolatillo se encuentran desde la selva, hasta ambientes disturbados semiabiertos o abiertos, sin embargo, es evidente el agotamiento de sus poblaciones a nivel local, por un lado, por la ampliación de la frontera agropecuaria, las actividades mineras y la actividad forestal que destruyen el hábitat de las especies y, por el otro, por el uso indiscriminado y la tasa de extracción de fibras no permiten la recuperación de las plantas y llevan a la disminución de sus cultivos (Linares, Galeano, N., & Figueroa, 2008).

Por esta razón, estas fibras quedan descartas para ser utilizadas dentro del proyecto de desarrollo de WPC en Nariño, por su baja disponibilidad y porque, además, para ser aprovechadas sería necesario recolectarlas de sitios muy alejados y dispersos, lo que conlleva sobrecostos de transporte, por último, tal y como lo menciona Montezuma (2012), entidades medioambientales y gubernamentales protegen estas fibras debido al impacto que su extracción deja en el ecosistema.

7.1.2 Visitas de campo

7.1.2.1 Visita de campo iraca.

Se visitó una empresa artesanal que se encuentra ubicada en la cabecera del municipio de Colón Génova en el departamento de Nariño y pertenece al señor Luis Antonio Burbano. el señor Luis recibe los sombreros ya elaborados a base de paja directamente de los artesanos, ellos compran la materia prima en este caso paja toquilla principalmente de la región norte del departamento como lo son la Unión, Santander (Nariño), algunas veredas cálidas de Colón Génova que han estado produciendo bastante material.

La paja la compran ya seca, ya que en los municipios(veredas) anteriormente mencionados se encargan de cosechar la hoja, secarla y desfibrarla por lo que los artesanos trabajan con el material listo para producir los sombreros tal y como se puede apreciar en las figuras 22 y 23.

El tejido de los sombreros se hace de forma artesanal y los procesos de terminado se los realiza en la empresa.

Figura 22.

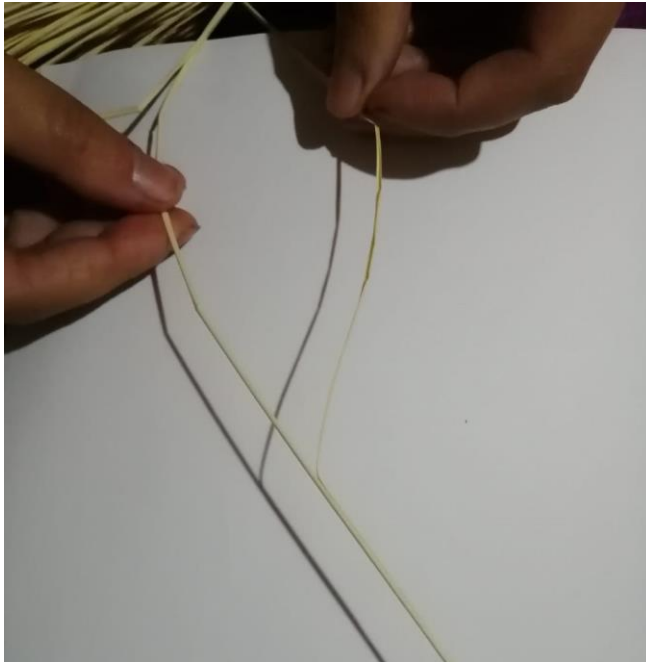
Paja toquilla utilizada para elaborar sombreros en Colon - Génova



Fuente: esta investigación.

Figura 23.

Separación de fibras de Paja



Fuente: esta investigación.

7.1.2.2 Visita de campo fique.

Se visitó a uno de los principales productores de fique, en el municipio de la Florida, en la zona existen muchos cultivos principalmente porque el cultivo de fique está impulsado por el gobierno y porque tiene un amplio mercado en la empresa de empaques de Antioquia y del Valle, por esta razón, los locales manifiestan que ha aumentado considerablemente su producción y venta, además mencionan que, hace algunos años el fique se vendía a muy bajo precio y, por tanto, su cultivo era realmente muy limitado y nada rentable.

De acuerdo con el estado del arte, la fibra de fique tiene un alto potencial para ser aprovechada para obtener WPC, además hay algunos residuos que se generan y que contiene fibra y material vegetal, estos son dejados en el campo o se utilizan como abono. En este sentido, Lozano (2012), menciona que la fibra del fique representa, aproximadamente, el 5 % del peso de toda la planta, mientras que el porcentaje restante corresponde mayoritariamente al zumo (70 %), la estopa y el bagazo (25 %), los cuales, en la mayoría de los casos, son considerados como residuo sin valor. A continuación, se muestra mediante fotografías la cadena agroindustrial del fique en el municipio de la Florida, Nariño:

Figura 24.

Planta de fique.



Fuente: esta investigación.

Figura 25.

Penca de fique.



Fuente: esta investigación.

Figura 26.

Proceso de obtención de fibras de fique, municipio de la florida.



Fuente: esta investigación.

Figura 27.

Residuos del procesamiento del fique



Fuente: esta investigación.

Figura 28.

Fibras de fique sin lavar.



Fuente: esta investigación.

Figura 29.

Lavado de fibras de fique.



Fuente: esta investigación.

Figura 30.

Secado de fibras de fique.



Fuente: esta investigación.

Figura 31.

Fibra final de fique.



Fuente: esta investigación.

Las fotografías pertenecen a la finca y los cultivos del señor Francisco García en la Florida, quien afirma que, sus cultivos de fique pueden ser cosechado durante todos los meses del año debido a que sus plantas ya se han desarrollado completamente y se puede realizar cortes mensuales, menciona también que, una planta genera aproximadamente 1 kg de fibra en una sola cosecha, aunque esto puede aumentar dependiendo del tiempo que se espere antes de cortar las pencas para procesarlas y obtener la fibra, la cosecha puede ser mensual o cada 3 o 6 meses, dependiendo de las necesidades del mercado, adicionalmente, señala que, en una hectárea cultivan aproximadamente 2000 plantas de fique, por esta razón, la disponibilidad de esta fibra para WPC es alta. Se pudo verificar gracias a la visita de campo que en la zona existen amplios cultivos, por último, los locales manifiestan que el valor por kilo de fique es de 2.500 pesos.

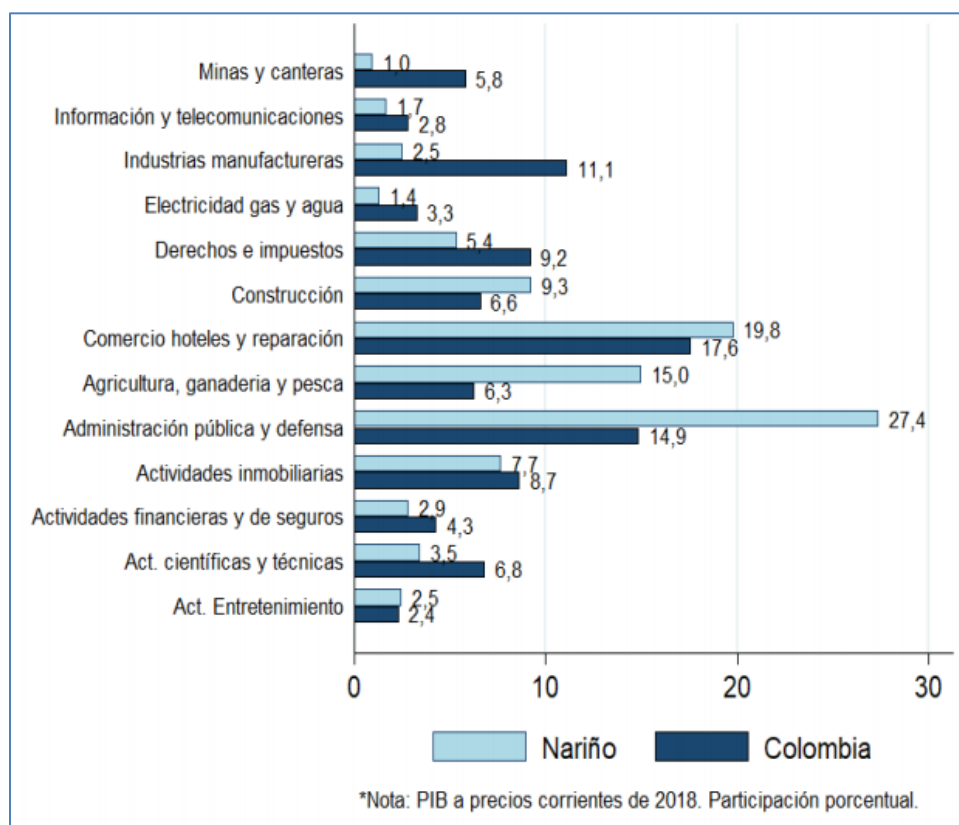
El fique es un material abundante. Por lo que no tiene problemas de disponibilidad, sin embargo, su costo de adquisición y de transporte a la planta termina siendo bastante alto, además su pre tratamiento para poder obtener los hilos, es bastante complicado y costoso. Por lo que sus probabilidades de usado como refuerzo son bajas, además a este material ya se le esta dando una gran cantidad de usos.

7.2 Fibras naturales de residuos agroindustriales

El Plan Departamental de Extensión Agropecuaria del Departamento de Nariño PDEA – (Nariño, 2019) menciona que la principal fuente económica de Nariño es la agricultura. Para el Ministerio de Comercio en el año 2020 (ver figura 32), la principal actividad económica en Nariño es administración pública y defensa, comercio, hoteles, y restaurantes, seguido de la agricultura, esta última está por encima del promedio nacional, por tanto, el departamento tiene una importante fortaleza en este sector.

Figura 32.

Composición sectorial del PIB en Nariño.



Fuente: esta investigación.

7.2.1 Producción agrícola en Nariño

A continuación, se presenta una revisión de la producción agrícola en el departamento de Nariño, para establecer cuáles son los principales cultivos en cuanto a disponibilidad y poder determinar cuáles de ellos generan fibras agroindustriales que pueden ser aprovechadas para desarrollo de WPC, los datos fueron obtenidos del Ministerio de Agricultura para el año 2018 (MINAGRICULTURA, 2018).

Tabla 8.

Productos agrícolas en Nariño en el año 2018.

Producto	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)
ACHIRA	82.800,00	239.328,00	2,89
BADEA	144,00	115,20	0,80
BOROJÓ	39.888,00	122.400,00	3,07
CACAO	2.512.080,00	597.149,28	0,24
CEBADA	36.504,00	77.244,54	2,12
CHONTADURO	64.656,00	120.672,00	1,87
COLIFLOR	21.970,00	470.834,00	21,43
HABA	57.291,00	508.859,00	8,88
HABICHUELA	29.237,00	160.417,52	5,49
PAPA CHINA	77.040,00	495.936,00	6,44
PEPA DE PAN	4.300,00	20.300,00	4,72
SÁBILA	720,00	28.800,00	40,00
TRIGO	107.146,00	195.304,11	1,82
UCHUVA	19.656,00	134.351,28	6,84
ZAPOTE	23.760,00	182.160,00	7,67
AJO	14.196,00	317.044,00	22,33
ARROZ SECANO MANUAL	196.040,00	416.019,55	2,12
ARVEJA	1.239.108,00	2.470.859,74	1,99
BANANO	924.048,00	2.327.270,40	2,52
BATATA	3.718,00	23.660,00	6,36
BRÓCOLI	13.858,00	312.650,00	22,56
CEBOLLA DE RAMA	172.549,00	1.431.458,39	8,30
CHILLANGUA	1.666,00	2.047,96	1,23
CHIRIMOYA	792,00	2.520,00	3,18
CILANTRO	36.673,00	37.282,70	1,02
DURAZNO	576,00	184,32	0,32

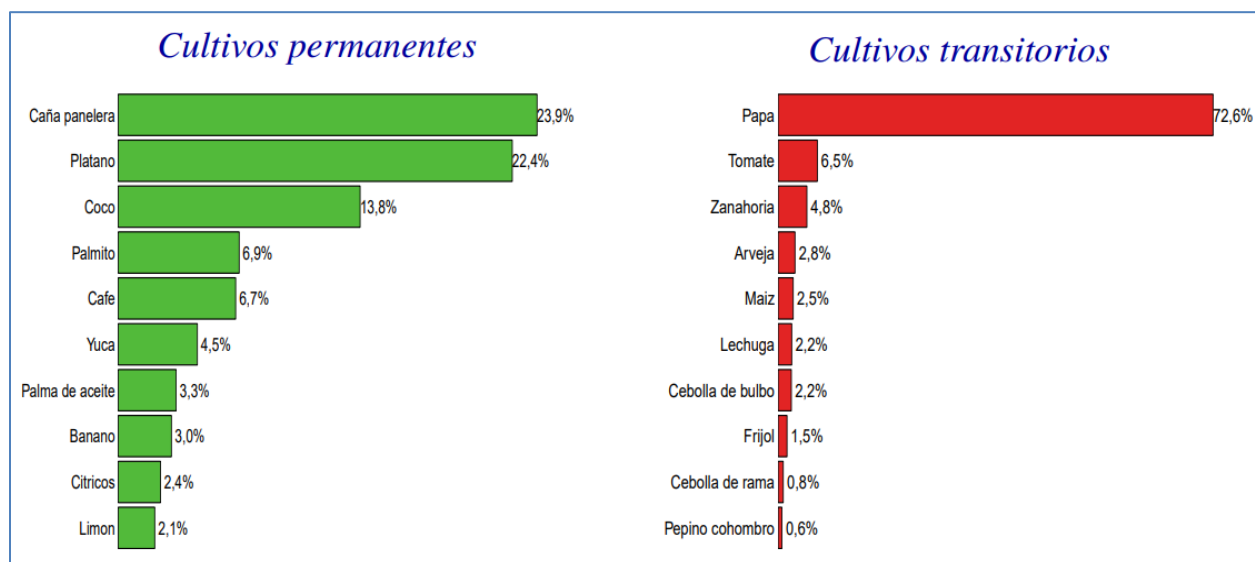
Producto	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)
GUAYABA	14.976,00	40.032,00	2,67
MAIZ TECNIFICADO	90.415,00	292.675,35	3,24
MORA	139.276,80	1.080.367,20	7,76
ÑAME	2.736,00	2.736,00	1,00
PEPINO COHOMBRO	16.224,00	522.128,37	32,18
ULLUCO	30.082,00	93.412,39	3,11
UVA	576,00	6.624,00	11,50
AGUACATE	80.222,40	352.008,00	4,39
CAÑA PANELERA	2.452.939,20	18.310.550,40	7,46
CHÍA	128,00	128,00	1,00
CHIRARAN	250,00	139,03	0,56
FRIJOL VOLUBLE	569.868,00	784.060,02	1,38
GUANABANA	22.752,00	68.976,00	3,03
HELICONIA	2.016,00	4.320,00	2,14
MAÍZ TRADICIONAL	2.220.660,00	2.953.569,29	1,33
MANGO	31.536,00	125.712,00	3,99
PIÑA	57.384,00	221.976,00	3,87
PLÁTANO	2.873.664,00	17.227.404,00	5,99
QUINUA	29.237,00	63.544,25	2,17
ZANAHORIA	129.454,00	3.547.817,00	27,41
ALBAHACA	2.541,00	2.144,19	0,84
ANTURIO	2.160,00	7.632,00	3,53
ARRACACHA	49.752,00	174.168,00	3,50
BANANITO	245.376,00	932.976,00	3,80
CEBOLLA DE BULBO	133.848,00	2.209.768,70	16,51
IRACA	32.976,00	53.424,00	1,62
LULO	87.638,40	494.049,60	5,64
MELÓN	1.014,00	3.042,00	3,00
ORÉGANO	775,00	780,03	1,01
PAPAYA	31.536,00	172.944,00	5,48
PIMENTÓN	22.139,00	42.916,51	1,94
REPOLLO	10.140,00	234.177,31	23,09
ROSA	484,00	7.260,00	15,00
TOMATE	30.758,00	580.554,32	18,87
TOMATE INVERNADERO	64.896,00	6.567.669,74	101,20
AMARANTO	80,00	80,00	1,00
FRIJOL ARBUSTIVO	836.212,00	935.039,34	1,12
GULUPA	4.320,00	10.800,00	2,50
LECHUGA	76.557,00	2.048.280,00	26,75
MANZANILLA	98,00	2.451,21	25,01
PALMITO	520.272,00	5.285.952,00	10,16

Producto	Área (ha)	Producción (ton)	Rendimiento (ha/ton)
PAPA CRIOLLA	222.066,00	2.787.527,46	12,55
PIMIENTA	2.880,00	11.520,00	4,00
ACELGA	1.352,00	2.028,00	1,50
BREVO	864,00	5.184,00	6,00
CAFÉ	4.819.037,76	5.137.836,39	1,07
CIRUELA	3.168,00	12.672,00	4,00
CÍTRICOS	540.576,00	1.845.792,00	3,41
COCO	1.514.016,00	10.573.920,00	6,98
CURUBA	734,40	3.744,00	5,10
FIQUE	857.808,00	1.114.876,80	1,30
FRESA	10.152,00	52.632,00	5,18
GRANADILLA	110.073,60	868.780,80	7,89
LIMÓN	219.672,00	1.597.824,00	7,27
MANÍ	126.581,00	220.930,68	1,75
MARACUYÁ	30.456,00	334.512,00	10,98
PALMA DE ACEITE	2.534.688,00	2.534.832,00	1,00
PAPA	3.218.774,00	67.405.899,10	20,94
POLEO	288,00	294,59	1,02
TOMATE DE ÁRBOL	42.307,20	332.438,40	7,86
YUCA	417.168,00	3.457.440,00	8,29

Fuente: (MADR, 2018).

En base a los datos del año 2018 de las evaluaciones Agropecuarias del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR, 2018) (último año con estadísticas disponibles) los principales cultivos agrícolas del departamento de Nariño son: papa, caña panelera, plátano, coco, tomate para invernadero, palmito, café, yuca, zanahoria, palma de aceite, maíz tradicional, arveja, banano, papa criolla, lechuga, cebolla de bulbo, y en menor cantidad limón, fique, críticos, mora, frijol arbustivo, cacao.

Finalmente, para destacar las fortalezas agrícolas del departamento, el Ministerio de Comercio (2020), hace la siguiente clasificación de la estructura agrícola en Nariño (figura 33), la caña panelera, plátano, el coco, palmito y el café son los principales cultivos permanentes del departamento, mientras que la papa, tomate, zanahoria y arveja son los cultivos transitorios más representativos.

Figura 33.***Estructura Agrícola en Nariño.***

Fuente: (MINCOMERCIO, 2020).

7.2.2 Residuos agroindustriales

Teniendo en cuenta la producción agrícola en Nariño, se seleccionaron aquellos cultivos que generan residuos agroindustriales con potencial para ser aprovechados como fibras naturales en la elaboración de WPC los cuales se presentan a continuación:

Tabla 9.***Producción de productos con potencial en WPC.***

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	
Caña panelera	18.310.550,40	Sandoná	37.928,00
		Ancuya	21.987,00
		Linares	12.960,00
		Consacá	11.145,00
		Samaniego	8.248,00
		El tambo	7.520,00
		La florida	3.232,00
		Chachagüí	38,00
Plátano	17.227.404,00	Tumaco	28.000,00
		El charco	12.500,00
		Los andes	10.440,00
		Francisco Pizarro	10.000,00
		La unión	9.775,00
		Sandoná	6.160,00
		La florida	5.515,00
		Samaniego	5.064,00
Coco	10.573.920,00	Tumaco	53.760,00
		Mosquera	4.970,00
		Santa Barbara	3.815,00
		Francisco Pizarro	3.750,00
		Olaya Herrera	2.963,00
		La Tola	2.325,00
		El charco	1.120,00

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	Producto
Tomate de invernadero	6.567.669,74	Samaniego	12.600,00
		Alban	7.920,00
		Linares	6.000,00
		San Pablo	2.822,00
		San Bernardo	1.800,00
		La Unión	1.530,00
		Guaitarilla	1.330,00
Palmito	5.285.952,00	Tumaco	10.000,00
		El charco	8.000,00
		Francisco Pizarro	6.600,00
		Olaya Herrera	4.448,00
		La Tola	3.540,00
		Santa Barbara	2.900,00
		Roberto Payan	1.000,00
Café	5.137.836,39	La Unión	4.393,05
		San lorenzo	3.995,49
		Buesaco	2.788,80
		Tablón	2.650,07
		Colón	2.506,77
		Alban	1.865,79
		Consacá	1.766,38
		La florida	1.734,18
		La arboleda	1.594,51
		Sandoná	1.519,90

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	Producto
Palma de aceite	2.534.832,00	San Pablo	1.122,31
		Taminango	1.059,05
		Tumaco	17.600,00
		Magui Payan	3,00
Maíz tradicional	2.953.569,29	Guaitarilla	2.297,87
		Yacuanquer	1.600,00
		Imues	1.497,50
		Samaniego	1.354,50
		Buesaco	972,00
		Tuquerres	900,00
		Ancuya	833,00
		El tambo	605,00
		Ipiales	3.675,00
		Gualmatán	2.047,50
Arveja	2.470.859,74	Tangua	1.440,00
		Contadero	1.260,00
		Potosi	1.225,00
		Pupiales	910,00
		Buesaco	599,20
		Puerres	554,40
		San lorenzo	7.600,00
Banano	2.327.270,40	Colón	2.808,00
		Barbacoas	1.995,00
		El charco	1.491,00

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	Producto
Frijol arbustivo	935.039,34	Buesaco	800,00
		Santa Barbara	544,00
		Yacuanquer	1.051,53
		Tagua	1.050,34
		Linares	887,91
		Guaitarilla	398,23
		El Tambo	285,08
		Consacá	218,87
		Alban	178,16
Cacao	597.149,28	Buesaco	166,75
		Tumaco	2.800,00
		Policarpa	309,00
		El Charco	149,40
		Los Andes	132,00
		Francisco Pizarro	116,50
		Cumbitara	108,00
		Leiva	108,00
		Olaya Herrera	106,00
Trigo	195.304,11	Imues	409,00
		Ospina	200,00
		Yacuanquer	125,00
		Pasto	117,66
		Guaitarilla	81,00
		Samaniego	60,00

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	Producto
Cebada	77.244,54	Ospina	330,00
		Tangua	90,00
		Guaitarilla	25,00
		Sapuyes	9,99
		Tuquerres	2,08
Quinua	63.544,25	Sapuyes	175,00
		Ospina	120,00
		Cumbal	32,00
		Guaitarilla	13,00
		Tangua	12,00
		Pasto	8,00
		La cruz	6,00
Piña	221.976,00	La Florida	1.036,00
		El Charco	165,00
		Tumaco	150,00
		Olaya Herrera	120,00
		Roberto Payan	48,00
		Ipiales	21,00
Sábila	28.800,00	Tumaco	200,00
		Roberto Payan	630,00
		Barbacoas	500,00
Arroz	416.019,55	Olaya Herrera	400,00
		La Tola	350,00

Producto	Producción Departamental (ton)	Producción municipal (ton)	Producto
		Tumaco	315,00
		Santa Barbara	157,04
		El Charco	75,00

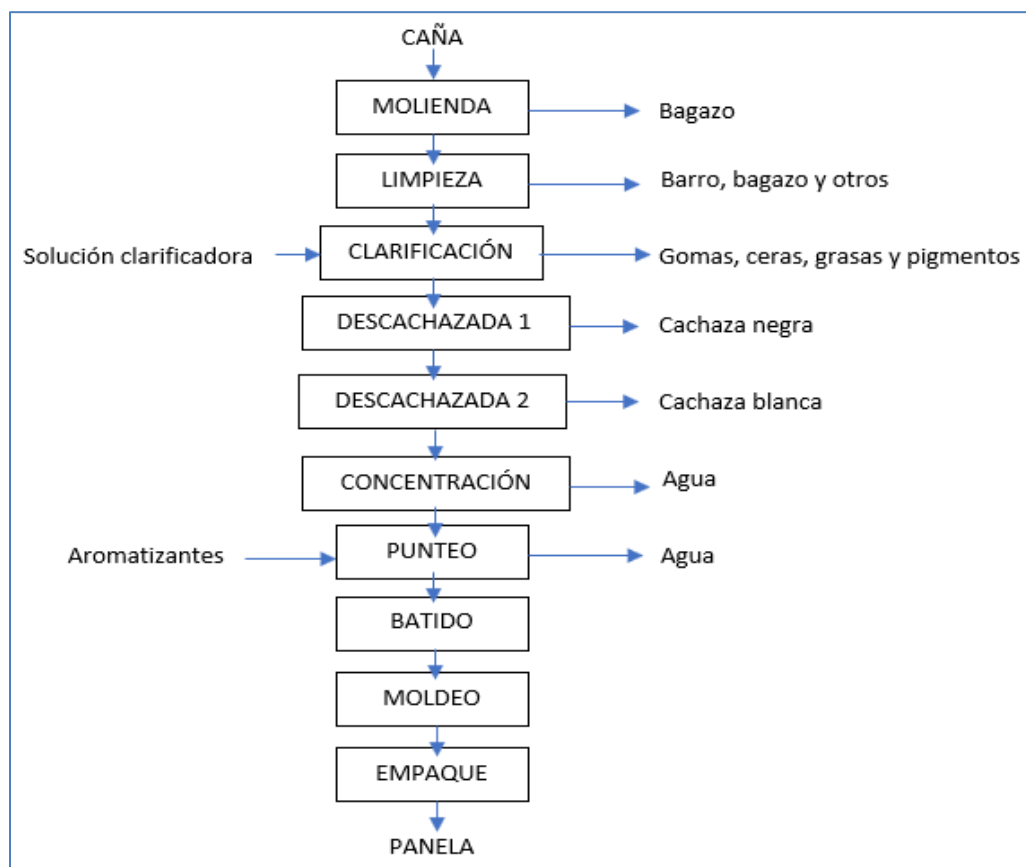
Fuente: (MADR, 2018).

Teniendo en cuenta que el proyecto busca reducir el impacto ambiental de los residuos agroindustriales, y reducir los costos utilizando estas materias primas consideradas desechos, los productos con mayor potencial y que no suponen demasiados sobre costos de transporte del lugar de cultivo a la planta de procesamiento, pueden ser los obtenidos de la agroindustria de la panela, arveja, frijol, piña, café, banano y plátano que podrían generar fibras lignocelulósicas, las cuales han demostrado su potencial para desarrollo de WPC de acuerdo con la revisión en la literatura.

7.2.2.1 Panela.

De acuerdo con FEDEPANELA (2012), durante la producción de panela el 78.4% está representado en los tallos de la caña, el 14.8% corresponde a hojas y el 6.8% a cogollo, los principales subproductos de la elaboración de panela son: cachaza, melote, cogollo y el **bagazo**, a continuación, se muestra el diagrama de flujo de la cadena agroindustrial de la panela y los residuos que esta actividad genera y posteriormente se describen estos residuos:

Figura 34.

Flujo de proceso de producción de panela.

Fuente: (Quezada, 2007).

Bagazo de caña, es la cáscara que queda después de que se extrae el jugo de la caña durante la etapa de la molienda (Quezada, 2007).

Para AGROSAVIA (2019) los residuos agroindustriales generados de la caña panelera tienen un fuerte impacto ambiental. Además, menciona que, generalmente el bagazo se utiliza para la combustión en las hornillas paneleras, en algunos casos se han desarrollado en Nariño proyectos como la elaboración de bloques nutricionales con base en el bagazo y la cachaza.

En Nariño para el periodo de 2018, el cultivo de la caña panelera fue uno de los principales cultivos con un alto volumen de producción además catalogado como un cultivo

permanente, por esta razón, y para comprobar su disponibilidad, se realizó una visita de campo a los municipio de la Florida y Chachagüí, donde se comprobó que existe una alta cantidad de cultivos de caña como también, de los residuos que la actividad agroindustrial de la cadena genera, el bagazo de caña es el que posee el mayor potencial para ser aprovechado en el desarrollo de WPC.

- **Visita de campo caña panelera**

En la vereda de Matarredonda, Chachagüí se encuentran varios productores de panela artesanal, uno de ellos es el señor Luis Carlos de la Cruz, quien se dedica en conjunto con su familia a esta actividad económica, este agricultor posee una finca de 5 hectáreas, en las cuales cultivan de forma conjunta caña panelera, fique y plátano.

En la figura 35, se muestra la cantidad de bagazo obtenido del procesamiento de 4 toneladas de caña panelera que corresponde a una cosecha trimestral, los productores no llevan un control exacto de la cantidad de bagazo que se genera y su uso se limita principalmente para la combustión de las hornillas paneleras, además, con ayuda de un molino de martillos (figura 36) obtienen fibras de bagazo de caña de dos tamaños diferentes (figuras 37, 38 y 39), los cuales son usados para elaborar bloques alimenticios para ganadería.

Con la información suministrada por el productor, se puede estimar un aproximado de 1,7 toneladas de bagazo resultantes de las 4 toneladas de caña panelera molida, estos datos son aproximados y sujetos a variación, debido a que, como lo manifiesta el productor, dependiendo de las condiciones agroclimáticas durante el año, la calidad y grosor de las cañas cambia y, por tanto, los rendimientos y producción también.

En el municipio de la Florida existen varios trapiches dedicados a la panela artesanal a cargo de los señores Fernando Linares, Bayardo Rosero, Efrén Zamora, además en la vereda de

robles la señora Mirian Hernández manifiestan que en este momento se encuentra en periodo de cosecha y la producción de panela empieza a partir de las próximas dos o tres semanas, por tanto, se encuentran en periodo de corte de caña y la elaboración de panela aún no comienza.

Para finalizar, el costo de un bulto de aproximadamente de 50 kg de bagazo de caña fino tiene un precio de 15.000 pesos, y un bulto de bagazo de caña de aproximadamente 40 kg tiene un valor de 10.000 en la finca de señor Luis Carlos de la Cruz. A continuación, se presentan los registros fotográficos de la visita de campo a la productora de panela:

Figura 35.

Bagazo de caña, Municipio de Chachagüí.



Fuente: esta investigación.

Figura 36.

Molino para obtener fibras finas de bagazo de caña.



Fuente: esta investigación.

Figura 37.

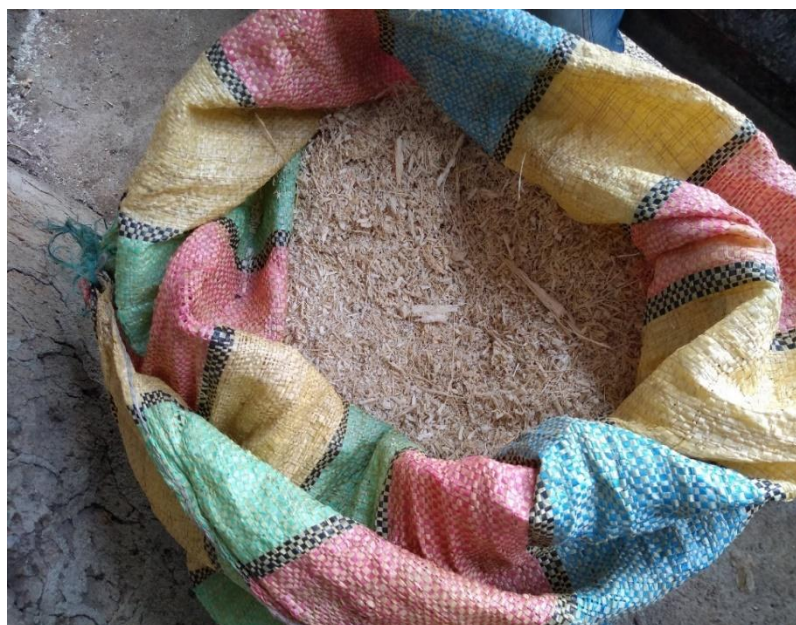
Bagazo de caña picado en molino sin hacer tamizado



Fuente: esta investigación.

Figura 38.

Bagazo de caña obtenido después del tamizado



Fuente: esta investigación.

Figura 39.

Fibras obtenidas del bagazo de caña panelera



Fuente: esta investigación.

7.2.2.2 Plátano.

- **Visita de campo**

Se realizó una visita a los cultivos de plátano en municipios de Chachagüí y la Florida, se determinó que su producción es principalmente para autoabastecimiento, como sistema de cerco o crece de forma natural sin una explotación extensiva para venta, en algunos casos es utilizado para dar sombra a productos como el café y la piña, por tanto, su disponibilidad y las fibras generadas es baja tal y como lo muestran las figuras:

Figura 40.

Pequeño cultivo de plátano como sistema de cerco en el municipio de Chachagüí



Fuente: esta investigación.

Figura 41.

Pequeño cultivo de plátano para autoabastecimiento, municipio de Chachagüí



Fuente: esta investigación.

Figura 42.

Pequeño cultivo de plátano para autoconsumo, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 43.

Pequeño cultivo de plátano como sistema de cerco, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 44.

Cultivo de plátano dentro de un cultivo de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Los residuos agroindustriales generados son principalmente hojas del pseudo tallo y tallos del árbol de plátano, de acuerdo con locales del municipio de Chachagüí como Tarín Muñoz, Mirian Lasso y Luis Carlos de la Cruz, no se hace desojado de las plantas y en conjunto con los tallos, se dejan en el campo como abono, por tanto, es difícil cuantificar estos residuos, su aprovechamiento para WPC presenta muchas dificultades, principalmente sobre costos para recolectar de varias fincas estos residuos y obtener un volumen considerable, su disponibilidad no se puede determinar claramente pero se estima es baja y no es constante.

Figura 45.

Tallos del árbol de plátano dejados en medio del campo como abono



Fuente: esta investigación.

Figura 46.

Hojas y tallos del árbol de plátano dejados en medio del campo como abono



Fuente: esta investigación.

Figura 47.

Planta de plátano sin desojar



Fuente: esta investigación.

Figura 48.

Pseudotallo de la planta de plátano



Fuente: esta investigación.

Figura 49.

Hojas del árbol de plátano



Fuente: esta investigación.

En el municipio de la Florida el señor José Jaramillo y la señora Mirian Hernández, manifiestan que el plátano es usado en esta zona para dar sombra a los cultivos de café y piña, y sus hojas son aprovechadas para envolver otros productos durante el transporte como se muestra en la (figura 50).

Figura 50.

Hojas de plátano utilizadas para el transporte de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

7.2.2.3 Piña.

Debido a que la Florida fue uno de los principales productores de piña (Tabla 9) se hizo una visita de campo a este municipio, de acuerdo con la coordinadora de la UMATA, la ingeniera Diana Ricaurte, el cultivo de piña ha sido afectado por plagas como el piojillo, lo que ha disminuido la producción y actualmente es muy limitada, esto fue confirmado con una visita a la vereda Robles. Qué, de acuerdo a la coordinadora es el principal productor de la zona, en esta vereda la señora Mirian Hernández, productora de piña menciona que en su caso, debido a las

plagas, ha cambiado la piña por cultivos como el café, caña panelera y el fique principalmente y considera que esta explotación podría desaparecer, por su parte el señor José Jaramillo, también menciona que las pérdidas de producción han sido importantes, sin embargo, aún posee algunos cultivos de piña que no han sido afectados por la plaga y comercializa su producción en el municipio de la Florida y el Tambo para su venta en la plaza de mercado.

Estos productores de piña mencionan que no existen muchos residuos del cultivo de la piña que puedan ser aprovechados en este momento, entre ellos se encuentran los que se generan en la planta: hojas, algunos tallos y raíces, sin embargo, actualmente su disponibilidad como se mencionó anteriormente, por otra parte, el acceso es bastante difícil, los cultivos se encuentran alejados de la vereda, aproximadamente a 40 minutos, y las vías y caminos son bastante limitados posee una porción de carreteras de terracería y otra en la que únicamente se puede transitar a pie o en caballo, tal y como se muestra a continuación:

Figura 51.

Vías de acceso a los cultivos de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 52.

Vías de acceso a los cultivos de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 53.

Productores de piña, vereda Robles, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 54.

Cultivos de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

Figura 55.

Cultivos de piña, municipio de la Florida



Fuente: esta investigación.

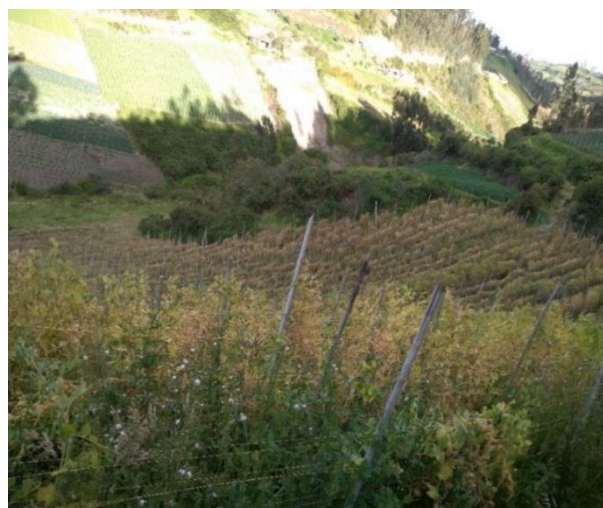
7.2.2.4 Arveja.

Se estima que, por cada tonelada de arveja producida, su vaina en peso fresco representaba 450 kg, es decir, que 45% del cultivo de arveja es considerado como un residuo agroindustrial. En sitios como los centros de acopio, la vaina de arveja es uno de los residuos agrícolas más representativos después de la hoja de mazorca y los sobrantes de las hortalizas (Gonzales, 2016).

A pesar de que la arveja es un cultivo transitorio, tal y como se puede observar en la figura 33, resulta ser una buena candidata para ser usada como refuerzo en WPC, ya que aproximadamente 3.500 ton de arveja se generan en Ipiales (ver tabla 9), y ya que el equipo extrusor se encuentra en pasto, los costos de transporte a la planta y compra de materia prima resultan ser bastante accesibles. Uno de sus puntos débiles es que requiere un pretratamiento lo que genera un mayor incremento de costos

Figura 56.

Cultivos de arveja



Fuente: esta investigación.

Figura 57.

Residuos de cultivos de arveja.



Fuente: esta investigación.

Figura 58.

Cascarilla de arveja



Fuente: esta investigación.

7.2.2.5 Frijol.

La paja de frijol es un residuo agroindustrial que se utiliza como alimento de rumiantes, posee un alto contenido de celulosa y hemicelulosa 60.6% y 14.5%, respectivamente (González, y otros, 2011).

A pesar de que los cultivos de frijol no se dan como tal en Ipiales, sigue estando en zonas aledañas por lo que le coste de transporte, y de compra resulta ser accesible. Sin embargo, la disponibilidad y el hecho de que requiere pretratamiento son sus principales defectos a la hora de ser elegida como refuerzo en la producción de WPC.

Figura 59.

Cultivos de frijol



Fuente: esta investigación.

Figura 60.

Paja de frijol



Fuente: esta investigación.

7.2.2.6 Café.

El cafeto es un arbusto o árbol pequeño, perennifolio, de fuste recto que puede alcanzar los 10 metros en estado silvestre; en los cultivos se los mantiene normalmente en tamaño más reducido, alrededor de 3 metros. Las hojas son elípticas, oscuras y coriáceas. El fruto es una drupa, que se desarrolla en unas 15 semanas a partir de la floración; el endospermo comienza a desarrollarse a partir de la duodécima semana, y acumulará materia sólida en el curso de varios meses, atrayendo casi la totalidad de la energía producida por la fotosíntesis (Coral, 2019).

El cisco de café es un subproducto de esta industria que se obtiene después de un proceso de secado y posterior trillado, que consiste en pasar el grano por cuchillas que rompen y separan el cisco y dejan pasar el grano final. Colombia es uno de los principales productores de café en el

mundo, y el primero en producir café de la variedad arábica cultivada principalmente en Colombia, Centroamérica y parte de África (Pinzón, 2009).

El pergamino de café o cascarilla es la parte que envuelve el grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa y representa alrededor de 12% del grano. Esta cascarilla constituye una excelente fuente de celulosa y lignina¹, pentosanos, sílice y cenizas, así como otros compuestos en menor proporción. En los países productores de café, los residuos y sub - productos del café constituyen una fuente de contaminación y generadora de problemas ambientales, por ese motivo, desde mediados del siglo pasado se ha tratado de buscar métodos sobre cómo utilizarlos como materia prima para la producción de bebidas, vinagre, biogás, cafeína, pectina, proteína y abono (Coral, 2019). Para la obtención de este subproducto es necesario realizar una serie de pasos:

Recolección del café: En esta etapa se cosechan únicamente los granos que alcanzan el estado de madurez completa, normalmente de color rojo o amarillo, ya que los verdes dañan el sabor de la taza de un café. Todo este proceso se desarrolla de forma manual.

Despulpado: El mismo día de la recolección, los granos de café se despulpan retirando la cereza del grano para que luego obtenga la fermentación: En esta parte del proceso, los granos permanecen en reposo

El lavado: En esta parte se retira con agua limpia los restos de mucílago que quedan en el grano y se eliminan azúcares.

El secado: Se exponen los granos de café al calor del sol en un secadero para que el grado de humedad disminuya facilitando su conservación. El grano seco se almacena en sacos limpios elaborados en fique, facilitando su traslado (Coral, 2019).

Trillado artesanal: En este proceso artesanal, se retira la cascarilla del grano llamado pergamino. Este procedimiento también puede desarrollarse de forma industrial.

A partir del proceso de la trilla de café pergamino. Se retira mecánicamente la cascara (pergamino) que cubre la almendra de café (denominada cisco en la trilla), el pergamino ya limpio entra a la máquina trilladora, y es retirada por fricción la cascarilla, obteniéndose la almendra. El cisco que acompaña la almendra, al salir de la trilladora, es succionado mecánicamente; en esta operación se causa la merma por cisco. El monitor de pergamino, es una máquina cribadora compuesta por un conjunto de tres a cuatro mallas, una campana extractora de cisco y polvo residual (Coral, 2019).

Figura 61.

Trilladora de café



Fuente: esta investigación.

Como se puede observar en la figura 62 el café pergamino una vez este seco se procede a colocar en la trilladora, para poder obtener el café sin cisco y el café almendra, en la figura 63 se observa que el café cae en un recipiente donde después será transportado para realizarle tratamientos posteriores, y el cisco de café cae en el costal que se encuentra en la parte inferior de la trilladora.

Figura 62.

Café seco dentro de la trilladora



Fuente: esta investigación.

Figura 63.

Café saliendo de la trilladora



Fuente: esta investigación.

Figura 64.

Cisco de café cayendo de la trilladora



Fuente: esta investigación.

Figura 65.*Cisco de café obtenido después del proceso de trillado*

Fuente: esta investigación.

El pergamino o cascarilla de café, es la parte que envuelve el grano inmediatamente después de la capa mucilaginosa y representa alrededor de 12% del grano de café en base seca.

Figura 66.*Caracterización cascarilla de café.*

CASCARILLA DE CAFÉ		
	<i>Masa unitaria suelta</i>	<i>Masa unitaria compacta</i> (peso 2716gr) molde 1/10 pie ³ .
A	284gr	334gr.
B	300gr	354gr.
C	310gr	344gr.
	MUS=298gr	MUC=344gr

Fuente: (Coral, 2019).

A nivel departamental la producción comparada con todo el territorio se puede decir que es muy baja ya que representa aproximadamente el 4,3% ocupando el noveno puesto a nivel

nacional, aunque en los últimos años se ha podido observar una tendencia creciente tanto de las áreas cosechadas como de la producción total (Nariño, 2019).

Figura 67.

Producción departamental de café.

Estadísticas de producción del territorio en estudio							
Años		2011	2012	2013	2014	2015	Var. Promedio
Área cosechada	hectáreas (ha)	24.264	27.806	32.137	33.608	33.491	0,09
Producción	toneladas (t)	24.074	28.078	28.607	32.322	36.608	0,11
Productividad	t/ha	0,99	1,01	0,89	0,96	1,09	0,03

Fuente: (Nariño, 2019).

Los beneficios de usar cisco de café como refuerzo en WPC, es que su disponibilidad es relativamente buena ya que, a pesar de ser obtenida solo 2 veces al año, puede ser almacenada durante bastante tiempo. Ya que su humedad relativa es baja debido a todo el proceso al que es sometida antes de finalmente ser cisco.

El mayor problema lo tiene en cuanto al coste de transporte ya que esta fibra se da principalmente en la zona norte del departamento y la planta de procesamiento se encuentra al sur. Además, requiere un pretratamiento para reducir su nivel de abrasividad y así evitar que dañe el equipo extrusor a largo plazo.

7.2.2.7 Banano.

La planta de banano es una hierba perenne de gran tamaño. Se la considera una hierba porque sus partes aéreas mueren y caen al suelo cuando termina la estación de cultivo, y es perenne porque de la base de la planta surge un brote llamado hijo, que reemplaza a la planta

madre. El término utilizado para designar a la planta madre, sus hijos y el rizoma subterráneo es mata. Lo que parece ser el tronco es, en realidad, un pseudotallo (Pedraza, 2019).

La planta de banano proviene de la familia *Musaceae* y es de la especie *Musa x paradisiaca* L. la planta es una herbácea perenne gigante, con rizoma corto y tallo aparente, que resulta de la unión de las vainas foliares, cónico y de 3,5 – 7,5 m de altura, terminando en una corona de hojas.

Figura 68.

Planta de banano



Fuente: esta investigación.

El pseudotallo es la parte de la planta de banano que parece un tronco. Está formado por las vainas de las hojas superpuestas y compactas. Aunque el pseudotallo es muy carnoso y se compone principalmente de agua, es bastante resistente y puede soportar un racimo que pesa 50 Kg o más. El pseudotallo continúa creciendo en altura a medida que las hojas emergen una tras otra y alcanza su altura máxima cuando la inflorescencia emerge en la parte superior de la planta (ProMusa., 2020).

Figura 69.***Pseudotallo de la planta de banano***

Fuente: esta investigación.

El pseudo tallo del banano tiene una morfología única. Los haces de fibras están cubiertos por una membrana no celulósica y están contruidos por dos tipos de fibras: fibras elementales con diámetros de 10-15 μm y fibras estrechas con diámetros de 3 μm -4 μm . No hay fibra elemental en la médula del banano. Las fibras estrechas se asemejan a tuberías en lugar de a los haces de fibras. Esta estructura, que nunca antes se ha informado, se considera que facilita el transporte de agua en la medula (Pedraza, 2019).

La fibra de banano es un tipo de fibra natural nueva que se extrae del pseudotallo del banano, la apariencia de la fibra es similar a la fibra natural del bambú y fibra de ramio, pero su finura y entallabilidad es mejor que cualquier otra fibra; la finura es de un promedio de 2386 Nm. La longitud de la fibra es de 60 mm.

Posee características de alta resistencia, buen brillo, peso ligero, y gran adsorción a la humedad, no se degrada fácilmente. La fibra de banano es adecuada para la confección de textiles (Torres, 2013).

Figura 70.

Pseudotallo de la planta de banano parcialmente desfibrado



Fuente: esta investigación.

La fibra que se obtiene de la planta del pseudotallo del banano, para esta investigación resulta no ser de las más adecuadas, ya su disponibilidad es baja, debido a que sus cultivos se dan principalmente para consumo propio del agricultor. El costo de transporte y costo de materia prima es muy alto tanto por sus escasas como por la distancia la empresa de procesamiento. Al igual que el cisco de café esta se da solo en la zona norte del departamento, sin embargo; su disponibilidad es mucho menor que la del cisco de café, ya que casi no hay productores que se dediquen exclusivamente a esta planta, por el contrario, la mayoría de cultivos son caseros y de uso familiar.

Además, para obtener la fibra es necesario desfibrar la planta, lo que incurrirá en mano de obra calificada que sepa realizar este proceso, debido a esto su costo de transporte y de obtención resulta ser de las más costosas.

7.2.2.8 Aserrín.

Se realizó una visita a los aserríos del municipio de pasto, para determinar la cantidad de residuos que esta actividad genera, principalmente el aserrín fino el cual puede ser aprovechado para obtener WPC.

Se visito el aserrío depósitos de maderas San Andrés, ubicado en pasto en la Cra 26# 12-1 - San Felipe. El dueño del aserrío, el señor Andrés, menciona que un día de trabajo se generan aproximadamente 40 bultos de aserrín fino, con un peso aproximado de 60 kg, que se obtiene a partir de maderas como pandala, achapo, pino, granadillo entre otras, el uso de este residuo no es aprovechado en el aserrío y su venta es para algunas ladrilleras en donde usan el aserrín en viruta para quemar en los hornos, y el aserrín en polvo fino para controlar el fuego, debido a que este se quema a una menor velocidad, adicionalmente, el aserrín fino se usa para galpones y pesebreras, el precio de un bulto de 60 kilos es 20.000 pesos, a continuación se presentan imágenes de la visita:

Figura 71.

Depósito de maderas San Andrés



Fuente: esta investigación.

Figura 72.

Depósito de maderas San Andrés



Fuente: esta investigación.

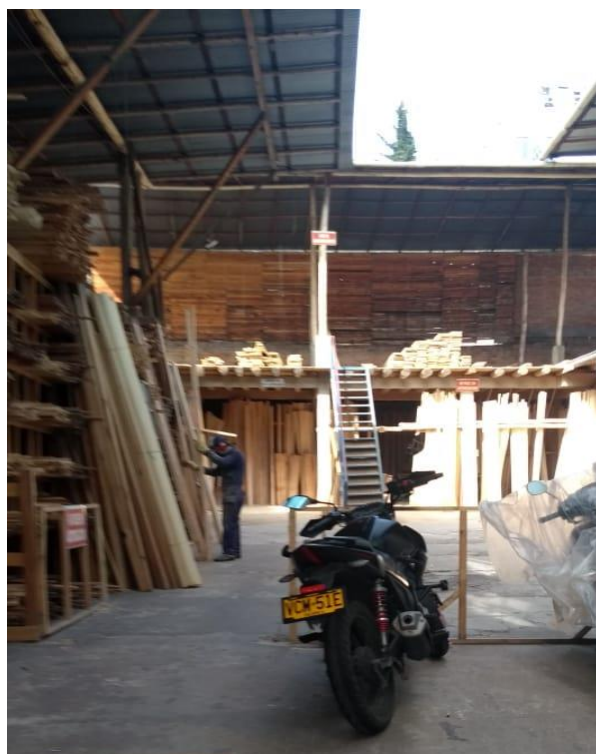
Figura 73.

Aserrín fino obtenido del depósito de maderas San Andrés



Fuente: esta investigación.

Se visitó, además, el aserrío llamado maderas y molduras de pasto, ubicado en la calle 13^a No 20-50, del barrio las Américas, en Pasto. En este lugar el administrador Carlos Ortiz, manifestó que a diario producen 5 bultos de aserrín fino, de aproximadamente 60 kilos, producidos a partir de maderas de pino, patula, y achapo únicamente, el costo del bulto de aserrín fino es de 5.000 pesos, dentro del establecimiento no le dan ningún uso al aserrín y este lo venden principalmente para galpones de conejos y gallinas, para viveros o para limpiar pisos, además manifiestan que en el año pasado su aserrín fue utilizado por estudiantes de la Universidad de Nariño para prensado para hacer muebles de madera.

Figura 74.***Aserrío maderas y molduras Pasto***

Fuente: esta investigación.

El aserrín tiene gran potencial para ser usado como refuerzo en la producción de WPC, su disponibilidad es abundante a lo largo de todo el año, el costo de transporte es mínimo ya que este material se lo puede conseguir en cualquier zona del departamento, además de que es bastante asequible y su mayor cualidad es que no requiere pretratamiento a diferencia de las otras fibras.

7.3 Criterios de selección de fibras naturales

En base a la revisión del estado de arte y la información disponible en artículos científicos se presenta a continuación algunos criterios que pueden ser útiles para la selección de las fibras con mayor potencial una vez finalizada la etapa de recopilar información de las fibras en el departamento de Nariño.

7.3.1 Composición química de las fibras

El contenido de celulosa determina las propiedades mecánicas de las fibras que a su vez afecta las propiedades del compuesto reforzado. Generalmente, se logra un mayor rendimiento y resultados con variedades que tienen un mayor contenido de celulosa y con microfibrillas de celulosa alineadas más en la dirección de la fibra, lo que tiende a ocurrir en las fibras tipo líber que tienen requisitos estructurales más altos para brindar soporte al tallo de la planta (Pickering, Aruan, & Le, 2016). Autores como Acuña (2007), menciona que se prefiere que la celulosa sea principalmente α -celulosa, que es más resistente y de cadena más larga.

La cantidad de hemicelulosa y lignina afecta las propiedades de las fibras naturales. No es deseable una gran cantidad de hemicelulosa y lignina en la fibra natural, ya que conduce a una alta absorción de humedad y biodegradación de la fibra. Para desarrollar un compuesto con buenas propiedades mecánicas, se debe utilizar una fibra natural con bajo contenido de hemicelulosa y lignina (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).

El contenido de cenizas afecta también las propiedades de los compuestos. Acuña (2007), en su investigación menciona que es deseable para la selección de fibras naturales un bajo contenido de cenizas, principalmente porque está relacionado con minerales ocluidos en las fibras que resultan abrasivos para los equipos de procesamiento, también sugiere que es deseable un bajo contenido de extractivos debido a que son principalmente ceras que dificultan la adhesión entre la matriz y la fibra y perjudican la estabilidad térmica del compuesto durante su procesamiento porque la descomposición y volatilización de estos compuestos se da a temperaturas cercanas a los 160°C, un alto contenido de extractivos puede disminuir las propiedades mecánicas de las fibras, por último, este autor menciona que es deseable un bajo contenido de humedad porque interfiere con la interfaz, es decir, con la adhesión entre la matriz

hidrofóbica y el material lignocelulósico que es hidrofílico, un alto contenido de humedad podría representar dificultades durante el procesamiento del compuesto en equipos que no tienen un buen sistema de desgasificación.

7.3.2 Propiedades físicas

Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder (2020), afirman que las propiedades físicas como la longitud y el diámetro de la fibra natural influyen en las propiedades mecánicas del material compuesto, fibras naturales que tienen un diámetro pequeño tienen un impacto positivo mayor sobre las propiedades mecánicas que fibras de gran diámetro.

En artículos como los publicados por Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder (2020), y Pickering, Aruan, & Le (2016), mencionan que existe una longitud crítica de la fibra, indican que una longitud de la fibra menor a la longitud crítica produce una disminución en la eficiencia de transferencia de tensión entre la fibra y la matriz, lo que da como resultado propiedades mecánicas deficientes, idealmente, la longitud de la fibra sería mucho mayor que la longitud crítica de la fibra para permitir un refuerzo eficaz de un material compuesto.

El porcentaje de fibras también es un factor importante para las propiedades mecánicas de los compuestos. El aumento del contenido de fibra de alta resistencia da como resultado una mejora de las propiedades mecánicas. Pero si el contenido de fibra de alta resistencia aumenta más allá del valor óptimo, puede conducir al deterioro de las propiedades mecánicas. Esto se debe a que, al aumentar el contenido de fibra, la composición de las matrices se reduce, lo que conduce a una unión interfacial más débil entre la matriz y el compuesto (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).

Además, un alto volumen de fibras conduce a una mayor porosidad del compuesto (Pickering, Aruan, & Le, 2016). Por último, un alto volumen de fibra son motivo de

preocupación debido al potencial de una mayor absorción de agua que conduce a la degradación de las propiedades a largo plazo (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

Se ha encontrado que existe una fracción de volumen crítica, en cual, volúmenes por debajo de esta medida, las fibras actúan simplemente como agujeros dentro de la matriz. Las fracciones de volumen crítico de fibra pueden ser cercanas al 8.1% y 9.3% en estudios realizados en yute y lino estos valores son mucho más altos que los valores obtenidos para compuestos de fibra sintética, aunque son más bajos que los contenidos de fibra comúnmente estudiados en la literatura superiores al 10% y por lo tanto este el efecto no se observa a menudo (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

7.3.3 Aspectos a considerar para la selección de fibras

- Algunas consideraciones acerca de la selección de la fibra puede ser la configuración de las fibras (unidireccional, bidireccional o multidireccional) en los compuestos reforzados con fibras naturales también determina varias propiedades de estos compuestos. Además, se debe tener en cuenta mejorar la unión interfacial entre la fibra y la matriz pretratamientos, que afectan la resistencia general de los compuestos (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).
- La resistencia de las fibras podría disminuir 15% durante 5 días después del tiempo óptimo de cosecha y que algunas fibras con extracción manual podrían tener una resistencia un 20% más alta que las extraídas mecánicamente (Pickering, Aruan, & Le, 2016).
- El módulo de Young generalmente aumenta con contenido de fibra, pero más modestamente que cuando la interfaz no está optimizada (Pickering, Aruan, & Le, 2016).

- Añadir al compuesto polimérico plastificantes obtenidos a partir de aceites vegetales respetuosos con el medio ambiente, como el aceite de linaza epoxidado y el aceite de linaza maleinizado, pueden mejorar en gran medida las propiedades mecánicas de los compuestos, como la resistencia a la tracción, la resistencia al impacto y la resistencia a la flexión (Kerni, Singh, Patnaik, & Narinder, 2020).
- Otros factores a considerar cuando se utiliza la fibra natural como refuerzo son la estabilidad térmica de las fibras (Santhosh & Somashekhar, 2019).

7.4 Selección de fibras

Con base en las visitas de campo y a la revisión del estado del arte se seleccionarán las fibras que tengan mayor potencial para ser aprovechadas para elaborar WPC, para este objetivo se realizará una matriz de comparación, los principales factores y porcentaje de importancia de cada factor en la decisión de selección de las fibras se presenta a continuación.

Tabla 10.

Factores de decisión y porcentaje de importancia para cada uno.

Factor	% importancia
Disponibilidad y cantidad	16,66
Disponibilidad en el año (meses)	16,66
Precio	16,66
Costo de transporte	16,66
Distancia a la planta de procesamiento	16,66
Requiere pretratamiento	16,66
Total	100 %

Fuente: esta investigación.

A cada fibra se le evaluaron los factores anteriormente mencionados y en base a la visita de campo se le asignó una calificación de 1 - 5 (donde 1 = Bajo, 2 = Medio bajo, 3 = Medio, 4 = Medio alto, 5 = Alto ; para el pretratamiento Si = 0, No = 5) el cual se multiplicó por el % de importancia, la sumatoria total fue el indicador para la selección de la fibra natural, para esta

matriz se tendrán en cuenta solo aquellas fibras que poseen una disponibilidad aceptable en el departamento y que de acuerdo al estado del arte mostraron un potencial para ser aprovechadas.

La matriz se muestra a continuación:

Tabla 11.

Matriz de selección de fibras.

Fibra natural	Disponibilidad		Disponibilidad		Precio		Pretratamiento			Distancia			Costo transporte			Total
	Cantidad		Anual		C	%	SI / NO	C	%	hasta la planta		hasta la planta				
	C	%	C	%						Km	C	%	COP	C	%	
Arveja	4	16,7	5	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	1	5	16,7	10000	5	16,7	4
Aserrín	5	16,7	5	16,7	4	16,7	NO	5	16,7	79,1	3	16,7	30000	3	16,7	4,2
Bagazo de caña panelera	4	16,7	3	16,7	4	16,7	SI	0	16,7	108	2	16,7	45000	2	16,7	2,5
Cisco de café	4	16,7	3	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	173	2	16,7	46000	2	16,7	2,7
Fique	5	16,7	5	16,7	2	16,7	SI	0	16,7	106	2	16,7	46000	2	16,7	2,7
Frijol	1	16,7	1	16,7	2	16,7	SI	0	16,7	1	5	16,7	10000	5	16,7	2,3
Iraca	5	16,7	2	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	196	1	16,7	50000	1	16,7	2,3
Hojas de piña	1	16,7	1	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	106	2	16,7	50000	1	16,7	1,7
Pseudotallo del banano	1	16,7	1	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	106	2	16,7	46000	1	16,7	1,7
Pseudotallo del plátano	1	16,7	1	16,7	5	16,7	SI	0	16,7	173	1	16,7	46000	2	16,7	1,7

*donde C = corresponde a la calificación de cada factor y % = corresponde al porcentaje de importancia.

Fuente: esta investigación.

Como se observa en la matriz de selección de las fibras (Tabla 11), las fibras que obtuvieron la mayor calificación fueron: **aserrín, arveja, cisco de café y fique**, estas fueron las fibras que se enviaron al laboratorio para conocer sus propiedades fisicoquímicas y mecánicas en el siguiente objetivo para dar continuidad al proyecto de desarrollo de WPC en Nariño.

7.5 Caracterización de propiedades fisicoquímicas y mecánicas

Tabla 12.

Propiedades fisicoquímicas de materiales.*

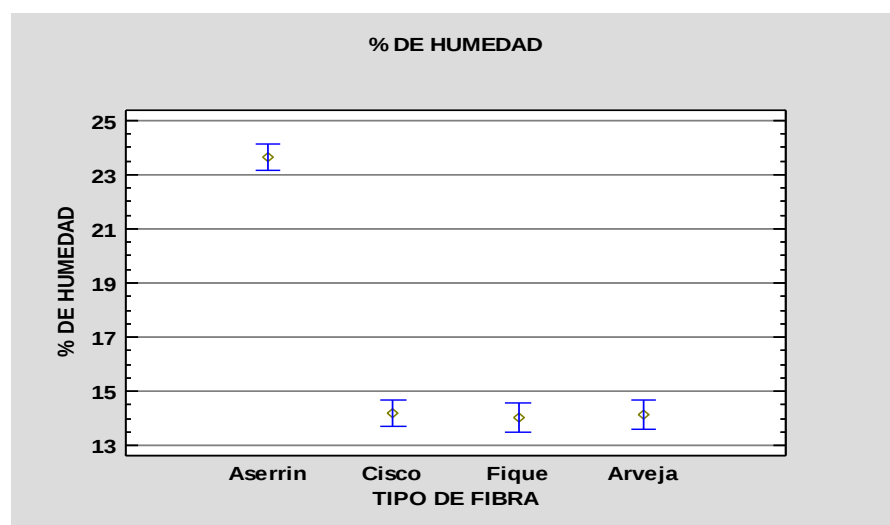
Propiedad/ Muestra	Contenido de humedad (%)	Actividad de agua (Entre 18 – 19 °C)	Absorción de agua (%)	Densidad aparente (g/mL)	Densidad real (g/mL)
Aserrín	23,66 ± 0,91	0,95 ± 0,0007	59,96 ± 7,43	0,13 ± 0,009	0,35 ± 0,11
Cisco	14,28 ± 0,60	0,69 ± 0,003	25,33 ± 6,82	0,28 ± 0,013	0,49 ± 1,62
Hilo de fique	14,02 ± 0,33	0,66 ± 0,01	62,28 ± 2,76	0,82 ± 0,016	0,94 ± 1,25
Tallo de arveja	14,15 ± 0,23	0,64 ± 0,01	76,49 ± 0,77	0,12 ± 0,01	0,88 ± 2,46

*Los resultados se presentan como un promedio de la medición por triplicado (n=3) y su desviación estándar.

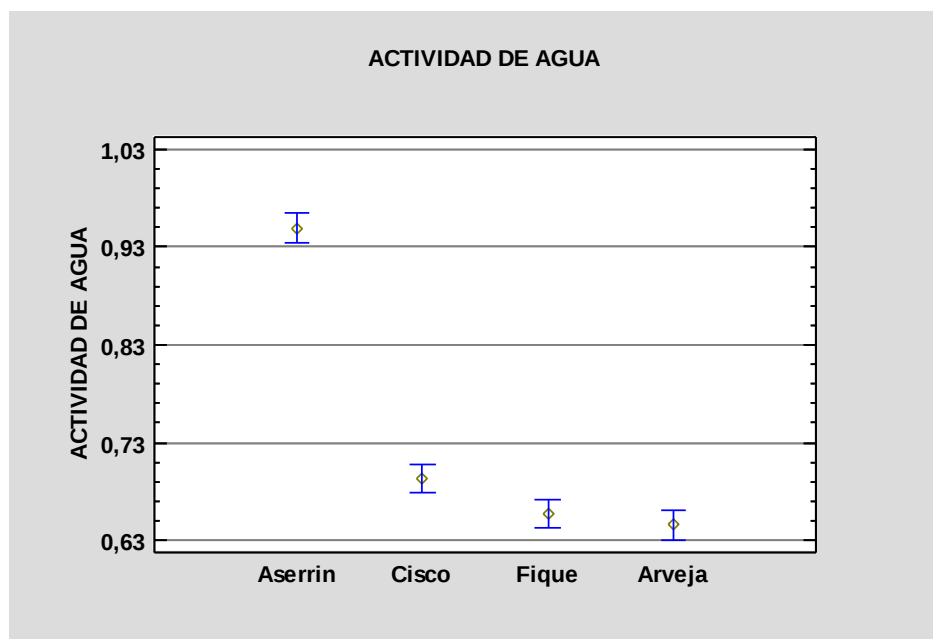
Fuente: esta investigación.

Figura 75.

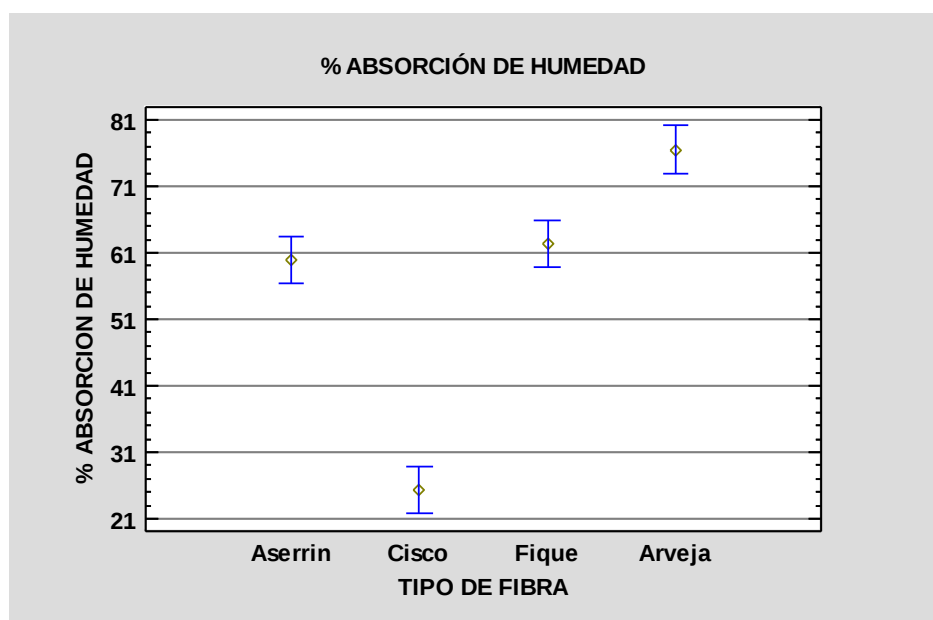
Gráfico porcentaje de humedad



Fuente: esta investigación.

Figura 76.**Gráfico actividad de agua**

Fuente: esta investigación.

Figura 77.**Gráfico porcentaje de absorción de humedad**

Fuente: esta investigación.

Tabla 13.**Propiedades mecánicas.**

Propiedad/ Muestra	Porcentaje de elongación o deformación (%)	Resistencia a la tracción o tensión (MPa)	Carga máxima (N)	Rigidez (N/m)	Módulo de Young o Elasticidad (MPa)
Hilo de fique	20,043 ± 2,816	19,056 ± 3,928	15,365 ± 2,811	1631,886 ± 223,634	145,445 ± 19,9323
Tallo de arveja (Completo)	4,457 ± 0,949	8,733 ± 2,016	141,472 ± 31,813	134132,667 ± 47638,147	414,29 ± 150,470
Tallo de arveja (Lamina)	3,687 ± 0,948	16,756 ± 5,961	67,023 ± 23,847	73055,429 ± 18026,104	913,193 ± 225,320

*Los resultados se presentan como un promedio de n= 10 y su desviación estándar.

Fuente: esta investigación.

Los materiales que se caracterizaron tienen diferente estructura física por lo cual se dificultó la medición de algunas propiedades como la densidad real y fue necesario reducir su tamaño y hacer una comparación más próxima.

En cuanto al contenido de humedad se indica que el aserrín es el material con un mayor contenido de humedad, mientras que los demás (cisco, fique y tallo) tienen un menor contenido de humedad. Cabe mencionar que entre el cisco se encontraban unas impurezas y materiales que pudieron afectar su medición.

En cuanto a los tallos de arveja la humedad puede variar dependiendo del grado de madurez de la planta, algunos tallos eran secos y quebradizos de color oscuro mientras que algunos otros eran húmedos, lisos y claros.

La actividad de agua es un parámetro importante para reconocer termodinámicamente un material puesto que a mayor actividad de agua es más susceptible a su deterioro ya sea fisicoquímico como microbiológico; la mayor actividad de agua se presenta en el aserrín y

aunque este parámetro no está directamente relacionado con la humedad se puede interpretar que el aserrín es un material muy hidrofílico que puede generar algún tipo de inconveniente cuando se utiliza como material de refuerzo.

Los porcentajes de absorción de agua son muy altos, posiblemente por ser materiales de fuente biológica, la menor absorción se presentó en el cisco de café, posiblemente se deba a que su composición es mayoritariamente celulosa. Se observó en este experimento que algunas partículas de los materiales flotaban en la superficie mientras que muy pocas partículas se sumergían, esto genera una densidad de partícula irregular. El material que se mostró más hinchado fue el tallo de arveja que al trocearse en aros pequeños se observó cómo se incrementaba su tamaño.

En cuanto a las densidades, como se menciona anteriormente se puede decir que existe una densidad no homogénea debido justamente a la diferencia de tamaño de partícula. Todos los materiales flotan en el agua es decir que tienen una densidad mucho menor. El tallo de arveja tiene una variabilidad alta debido a su irregularidad en cuanto a estado de madurez.

En cuanto a propiedades mecánicas estas se evaluaron 3 tipos de fibras (hilos de fique y tallo de arveja en lámina y en tallo), para los hilos de fique estos presentan un bajo coeficiente de desviación ($<20\%$), eso nos permite determinar que los hilos de fique tienen un comportamiento muy similar unos entre otros. Es una fibra delgada de menos de 1 mm de diámetro y es bastante elástico, muy seguramente por la presencia de lignina y hemicelulosa.

A diferencia del tallo de arveja, los hilos de fique son muy elásticos y no tan rígidos lo que les genera una carga menor, pero con una resistencia a la tensión comparable a la de las láminas del tallo de arveja.

Los tallos se evaluaron mecánicamente de dos formas la primera como tallo completo, cabe mencionar que el tallo es un cilindro hueco que tiene una borde de aproximadamente 1 mm de espesor.

El comportamiento mecánico del tallo entero fue difícil de calcular y presenta una alta variabilidad debido a dos factores. El primero pues el material no tenía el mismo grado de madurez, algunos tallos eran fresco y otros muy secos; el segundo factor debido a que el tallo entero en su área exterior tenía una superficie muy lisa que impidió que las pinzas del equipo lo sujetaran correctamente; esta superficie lisa puede ser preocupante para su inclusión como material de refuerzo pues puede afectar la compatibilidad con otros materiales, esto se podía minimizar con la reducción de tamaño y molienda.

Estos dos factores se debieron principalmente a que los productores no separan los tallos frescos de los tallos secos. Además, su cantidad se ve altamente afectada si se procede a seleccionar los tallos secos de los frescos, por lo que se procedido a enviar los tallos tal y como se los compro a los productores, para ver si esto afectaba sus características y gracias a esto se definió que los tallos de arveja no solo requieren un pretratamiento, sino que también necesitan una preselección para escoger los mejores tallos. En consecuencia, los costos se vieron afectados, y a pesar de estar cerca de la planta no es muy favorable que la fibra requiera 2 pretratamientos antes de poder ser usada. Por lo que se la descarto al final.

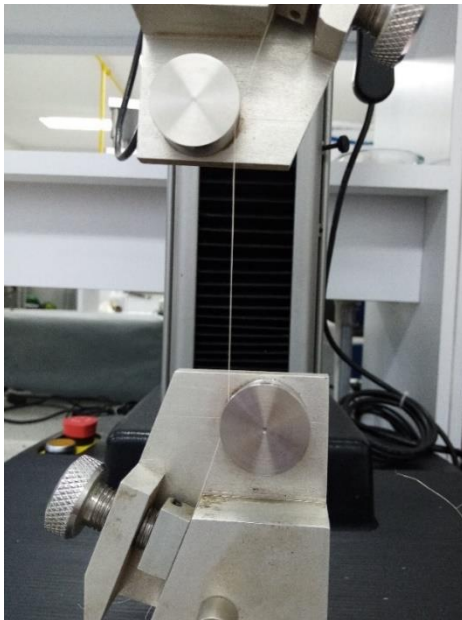
Los tallos se aplastaron un poco y se midió su anchura (8 mm aproximadamente) y su espesor (1 mm). En cuanto a la segunda forma de evaluación del tallo fue en laminas (4 mm de ancho y 1 mm de espesor) puesto que cuando el tallo se partía en dos laminas están laminas teniendo un lado menos liso, algo rugoso y similar a madera que permitía una mejor evaluación. Las láminas generadas en el tallo se basan en fibras que están en paralelo y generan una mayor

resistencia a la tracción, pero reducen su carga; tanto como lamina como tallo entero no tiene elasticidad y son materiales altamente rígidos.

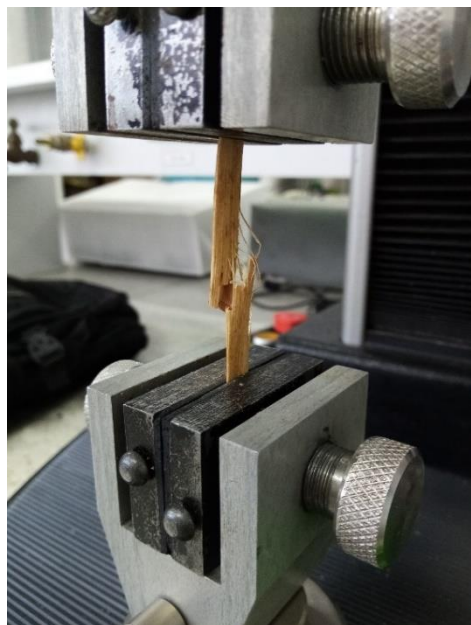
Y finalmente a pesar de que los tallos de arveja tienen uno de los puntajes de selección más altos, se terminó descartando no solo por los requerimientos necesarios para ser usada. Si no, también por sus propiedades mecánicas, ya que al no tener elasticidad y ser quebradizas los WPC, corren el riesgo de adoptar dichas características, lo cual es altamente desfavorable para este tipo de productos.

Figura 78.

Medición de las propiedades mecánicas de hilos de arveja



Fuente: esta investigación.

Figura 79.***Fractura de tallos de arveja***

Fuente: esta investigación.

Finalmente, de acuerdo a los resultados obtenidos de la caracterización de las propiedades fisicoquímicas y mecánicas, se prosiguió a escoger como material de refuerzo para la producción de WPC a la fibra de ASERRÍN. ya que cuenta con propiedades fisicoquímicas adecuadas que podrán mejorar con el agente acoplante. Al ser un material con baja absorción de humedad puede no verse muy afectado por el proceso de producción de WPC estandarizado por la empresa. Y gracias a su alto contenido de humedad puede encajar de mejor manera con el material plástico y el agente acoplante ya que este agente actúa mejor en este tipo de materiales, a pesar de tener una capacidad de absorción de humedad mayor frente al resto de fibras, sus propiedades terminan siendo más favorables. Además, su disponibilidad es mucho mayor frente a las otras fibras y sus costos se mantienen estables y no están propensos a cambiar dependiendo de la época del año, es de fácil acceso ya que esta se la puede encontrar en distintos aserríos y no afecta negativamente al equipo extrusor el cual al ser de un solo tornillo rotador,

necesitaba de un material más homogéneo, el aserrín se lo puede conseguir fino o grueso lo que mejora aún más sus cualidades de selección ya que no necesita un pretratamiento a diferencia de las otras fibras.

7.6 Empresas recicladoras en pasto

En pasto las empresas recicladoras pueden ser formales e informales, también hay algunas empresas que se encargan de comprar material, para darles un valor agregado, otras se encargan de recibir y seleccionar el material, en estas empresas al plástico reciclable lo llaman PET, PASTA, dependiendo del tipo de plástico.

Figura 80.

Pasta antes de la selección



Fuente: esta investigación.

Figura 81.

Pasta después de preselección



Fuente: esta investigación.

Figura 82.

PET antes de la selección



Fuente: esta investigación.

Figura 83.

PET seleccionado por colores



Fuente: esta investigación.

Figura 84.

PET transparente



Fuente: esta investigación.

Figura 85.

PET transparente seleccionado y listo para transportar



Fuente: esta investigación.

7.6.1 Bodega de reciclaje “COMPRENDER”

La Cooperativa Empresarial de Recicladores de Nariño E.S.P, nace como una respuesta a la necesidad de legalizar y organizar la actividad productiva de los recicladores de oficio en el municipio de Pasto. Se encuentra ubicada en el barrio Fátima Cl. 19 ##15a - 13, Pasto, Nariño.

Tabla 14.

Encuesta realizada a la empresa “COMPRENDER”.

PREGUNTAS	RESPUESTA
¿Qué cantidad mensual o semanal de PASTA o PET obtienen?	1 tonelada mensual de material plástico entre pasta y pet
¿Precio de venta y compra?	Compra: 470 Pesos/Kilo Venta: 850 Pesos/Kilo
¿Causa de aumento y disminución de precios?	Varía según la temporada, en noviembre y diciembre disminuye la oferta
¿Tipos de plásticos que manejan?	Pasta dura, PET, bolsas (Película)

Fuente: esta investigación.

7.6.2 Bodega de reciclaje “CHATARRERIA POTRERILLO”

Esta bodega es del tipo informal y pequeña, se encuentra ubicada en la zona del potrerillo.

Tabla 15.

Encuesta realizada a la empresa “CHATARRERIA POTRERILLO”.

PREGUNTAS	RESPUESTA
¿Qué cantidad mensual o semanal de PASTA o PET obtienen?	2 toneladas semanales entre pasta y pet.
¿Precio de venta y compra?	Compra: 400 Pesos/Kilo Venta: 600 Pesos/Kilo
¿Causa de aumento y disminución de precios?	Varía según la oferta y demanda de bodegas de reciclaje que manejan flujos de reciclaje grandes
¿Tipos de plásticos que manejan?	3 tipos de PET: PET limpio, PET sucio, PET transparente, PP, PVC

Fuente: esta investigación.

7.6.3 Empresa “SOLUCIONES AMBIENTALES”

Esta empresa se dedica a recibir material plástico de todo tipo, y se encarga de procesar y transformar este material, compra plástico mas no lo vende. Se encuentra ubicada en la zona del potrerillo Cra 8A # 16-57.

Tabla 16.

Encuesta realizada a la Empresa “SOLUCIONES AMBIENTALES”.

PREGUNTAS	RESPUESTA
¿Qué cantidad mensual o semanal de PASTA o PET obtienen?	Manejan alrededor de 30 a 40 toneladas mensuales
¿Precio de venta y compra?	Se encargan de comprar el material a bodegas por un precio de entre 800 a 1200 pesos.
¿Causa de aumento y disminución de precios?	Dependiendo del grado de selección del material el precio puede aumentar o disminuir, debido a la emergencia sanitaria que se produjo este año y por el cierre de la frontera con Venezuela, se produjo unos escases de material, sin embargo, esta es una causa atípica ya que se debe a razones atípicas. Por lo general la causa del aumento o disminución de precio se debe a la temporada del año, en diciembre debido a la oferta el material disminuye. Para esta empresa el color del envase también puede afectar el precio.
¿Tipos de plásticos que manejan?	3 tipos de PET: PET limpio, PET sucio, PET transparente, PP, PVC, polietileno de alta densidad de inyección, poliestireno, policarbonato.

Fuente: esta investigación.

En “soluciones ambientales” los materiales son separados de acuerdo a:

- PET: envases de gaseosas, jugos, botellas de agua, bebidas energizantes, botellas transparentes o de color, entre otras.
- PP (POLIPROPILENO): Sillas plásticas, tarros, envases, tapas de gaseosa.
- POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD: tarros de pintura, valdes
- POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD: bolsas plásticas
- SOPLADO: galones, tarros, botellas (NO PET)
- PVC: tuberías, envases, etiquetas.
- POLIESTIRENO: avisos de publicidad, vaso, platos y cubiertos desechables
- POLICARBONATO: garrafones de agua, corchos de botellas de agua,

Estas empresas fueron las escogidas ya que son muy conocidas, a pesar de que la bodega “chatarrería potrerillo” no es tan grande son conocidos entre los habitantes del barrio el potrerillo,

La bodega de reciclaje “Comprender” se dedica exclusivamente al reciclaje, en cambio la empresa “Soluciones ambientales” no solo tiene una bodega de reciclaje que se encarga de todo el proceso de preselección y de selección de plásticos, sino que, además se encarga de darle un valor agregado a estos plásticos transformándolos en WPC. A diferencia de este estudio ellos no usan fibras naturales como refuerzo.

Con esta información y la recolectada en el estado del arte se decidió trabajar con una mezcla de plástico como el PET, PP, HDPE, LDPE, POLIESTIRENO, PVC, PS. La mezcla de estos se realizará de manera manual, primero serán triturados en pequeñas partes homogéneas y luego se mezclarán para finalmente servir de carga en el equipo extrusor.

Figura 86.

Mezcla de varios plásticos



Fuente: esta investigación.

Figura 87.

Mezcla de plásticos final



Fuente: esta investigación.

7.7 Resultados de la metodología del diseño de experimento

7.7.1 Resultados de mezclas sometidas a extrusión

La tabla 17 fue elaborada en el programa Sthatchaphics y con esta se llevaron a cabo las mezclas necesarias para poder obtener las 18 muestras de WPC.

Tabla 17.

Diseño experimental para la obtención de WPC.

# de Mezcla	% de fibra	% de acoplante	Peso de fibra	Peso acoplante	Peso plástico	Total, de mezcla
5	15,00	3,50	1,50	0,35	8,50	10,35
2	5,00	2,00	0,50	0,20	9,50	10,20
8	25,00	2,00	2,50	0,20	7,50	10,20
3	5,00	5,00	0,50	0,50	9,50	10,50
7	25,00	5,00	2,50	0,50	7,50	10,50
1	0,86	3,50	0,09	0,35	9,91	10,35
9	29,14	3,50	2,91	0,35	7,08	10,35
6	15,00	1,38	1,50	0,14	8,50	10,14
4	15,00	5,62	1,50	0,56	8,50	10,56

Fuente: esta investigación.

Con ayuda del programa Sthatchaphics se aleatorizaron el orden de los tratamientos, esto con el fin de validar las pruebas y asegurar que las diferencias o errores provocados por materiales, equipo, y todos los factores no controlados se repartan de manera homogénea en todos los tratamientos.

Para obtener 2 lotes (A y B) y maximizar la confiabilidad de las pruebas, se procedió a realizar 2 mezclas iguales para cada extrusión.

Figura 88.

Lotes A y B de los WPC finales



Fuente: esta investigación.

Figura 89.

Muestras finales de WPC



**Muestras de WPC para realizar
pruebas mecánicas**

Fuente: esta investigación.

Se obtuvieron 9 mezclas por cada lote, lo que en total dieron 18 mezclas sometidas a extrusión.

A pesar que se obtuvieron 2 lotes de WPC, El lote B arrojó datos demasiado diferentes a los arrojados por el lote A. una posible causa para que estos datos se vieran tan afectados, pudo

deberse al equipo extrusor, ya que este después de procesar todas las muestras del lote A empezó a fallar. Se recalentó y empezó a quemar la mezcla, esto sucedió en más de una ocasión.

Otra posible causa pudo deberse al personal que se encargaba de manipular el equipo extrusor, ya que durante el proceso del lote B el equipo empezó a generar mucho humo que afectó significativamente al personal, provocándoles tos, enrojecimiento de ojos, y picazón en la nariz, por lo que tuvieron que para el proceso varias veces mientras el humo se dispersaba y ellos se recuperaron.

Una de las razones por las cuales se pudo obtener este tipo de variabilidad en este estudio pudo ser causado por el proceso de producción estandarizado que sigue la empresa a la hora de fabricar sus maderas plásticas, el WPC caliente es enfriado sumergiéndolo en agua para poder retirarlos del molde. Por otro lado, para la producción de WPC mediante extrusión se suele utilizar un equipo de doble tornillo diseñado específicamente para la obtención de este material, no obstante, el equipo disponible en esta investigación fue diseñado con el propósito de procesar únicamente plástico reciclado y contaba con un solo tornillo sin fin, lo que limitó el uso de un mayor contenido de fibra debido a que en estas condiciones se obtenía una mezcla muy heterogénea y zonas de fibra sin recubrimiento, por esta razón en esta investigación se trabajó con niveles bajo de fibra.

Por último, para poder utilizar el equipo era necesario procesar una alta cantidad de mezcla de polímero, fibra y agente de acoplamiento, una vez finalizado el moldeo de la muestra, era indispensable eliminar completamente los residuos de la mezcla de la cámara y dejarla limpia de material, para así ingresar una nueva mezcla. Esto causó que una alta cantidad de aire se depositara al interior de la extrusora que, en conjunto con las altas temperaturas, ocasionaba pequeñas explosiones y burbujas durante todo el proceso, motivo por el cual, algunas de las

muestras presentaron zonas con alta porosidad y zonas huecas en su interior (ver figura 90), esto pudo disminuir las propiedades mecánicas generales de los compuestos, y justificar su alta variabilidad.

Figura 90.

Muestra de WPC alcanzada la falla por flexión



Fuente: esta investigación.

Por lo que se tomaron solo los datos del lote A ya que eran los más similares de acuerdo al estado del arte.

A continuación, se muestran los resultados del lote A obtenidos en el laboratorio para la metodología de superficie de respuesta del diseño central compuesto rotatorio:

Tabla 18.***Matriz de experimentos y resultados***

Fibra	Acoplante	Densidad	Compresión			Flexión		
			Resistencia máxima	Deformación	Módulo de Young	Resistencia máxima	Deformación	Módulo de Young
% p/p	% p/p	Kg/m ³	MPa	%	MPa	MPa	mm	MPa
15,00	3,50	4068,34	2,0113	16,61	13,66	0,1196	21,84	1,70
5,00	2,00	4708,73	2,9675	21,00	15,28	0,1991	30,48	1,95
25,00	2,00	4859,41	2,3359	16,12	16,13	0,1245	21,84	1,80
5,00	5,00	4934,75	3,0136	20,52	15,49	0,2461	33,53	2,20
25,00	5,00	4821,74	2,6792	14,17	20,88	0,1618	21,34	2,44
0,86	3,50	4407,37	2,5782	21,49	12,37	0,2393	34,54	2,05
29,14	3,50	4972,42	2,3860	13,68	18,71	0,1236	19,81	1,94
15,00	1,38	4106,01	2,1839	15,63	15,55	0,1206	18,80	2,00
15,00	5,62	4294,36	2,2036	20,03	12,59	0,1089	19,81	1,74
15,00	3,50	4294,36	2,3732	19,05	14,19	0,1177	19,30	1,87

Fuente: esta investigación.

En la tabla anterior, se encuentran los datos de las pruebas de resistencia a la deformación de compresión y flexión, adicionalmente, se incluyen propiedades de los WPC obtenidos, como la densidad y el módulo de Young, los cuales son útiles para complementar los análisis que se realizarán posteriormente en la discusión de resultados.

7.7.2 Compresión

-Resistencia máxima a la deformación por compresión

Figura 91.

Muestras finales de WPC sometidas a compresión



Fuente: esta investigación.

Los datos de resistencia máxima a la deformación por compresión se encuentran en la tabla 19, los valores oscilaron entre 2,01 y 3,01 MPa.

Para realizar el análisis estadístico, a continuación, se muestran los resultados del análisis de varianza (ANOVA) para la resistencia máxima a la deformación por compresión:

Tabla 19.

ANOVA resistencia máxima a la deformación por compresión.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Fibra	0,191523	1	0,191523	2,92	0,3369
B: Acoplante	0,0217631	1	0,0217631	0,33	0,6671
AA	0,280496	1	0,280496	4,28	0,2865
AB	0,022082	1	0,022082	0,34	0,6651
BB	0,0489999	1	0,0489999	0,75	0,5460
Falta de ajuste	0,414623	3	0,138208	2,11	0,4525
Error puro	0,0654858	1	0,0654858		
Total (corr.)	0,996011	9			

Fuente: esta investigación.

Como se puede observar en el análisis de varianza, ninguno de los factores de proceso, ni sus efectos cuadráticos tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta. así mismo, la prueba de falta de ajuste no fue significativa, lo que indica que el modelo matemático es adecuado para describir el comportamiento de la variable con un R-cuadrado del 51,79 % que es relativamente bajo, el estadístico Durbin Watson fue del 1,74, por tanto, no fue significativo y los ensayos se realizaron de forma aleatoria, todo lo anterior mencionado con un nivel de confianza del 95%.

Modelo matemático para la resistencia máxima a la deformación por compresión se muestra a continuación:

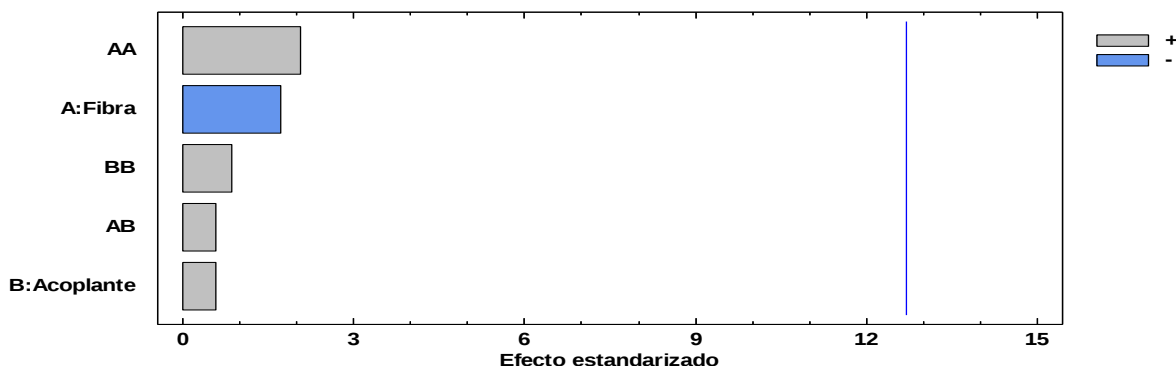
$$\text{resistencia máxima a la deformación por compresión} = 3,6837 - 0,107121 * F - 0,361626 * A + 0,00247707 * (F^2) + 0,00495333 * F * A + 0,0460139 * (A^2)$$

Donde, F = % de fibra y A = % agente acoplante.

Para corroborar los resultados obtenidos en el análisis de varianza, en la siguiente figura, se muestra el diagrama de Pareto para cada uno de los factores experimentales y sus efectos cuadráticos:

Figura 92.

Diagrama de Pareto para la resistencia máxima a la deformación por compresión



Fuente: esta investigación.

Como se observa, ninguno de los factores de proceso está por encima del nivel de significancia estadística, por tanto, no tuvieron un efecto en la variable de respuesta.

De acuerdo con los resultados, se puede concluir que reemplazar plástico con fibra natural para reducir los costos de producción de WPC es viable, porque no afecta la resistencia máxima a la deformación por compresión que puede soportar el material y el comportamiento del WPC es similar al plástico sin ningún tipo de modificación, la fibra tiene un beneficio económico por su bajo precio.

Al mismo tiempo el agente de acoplamiento no afecta la resistencia máxima a la deformación por compresión, en consecuencia, durante la formulación de los WPC se puede prescindir del uso de este insumo, no obstante, para las anteriores conclusiones no se tuvo en cuenta el análisis posterior de las otras variables de respuesta de esta investigación.

7.7.2.1 Porcentaje de deformación máximo por esfuerzo de compresión.

El porcentaje de deformación máxima es una variable que nos ayuda a comprender el comportamiento del material frente a un esfuerzo, una mayor deformación máxima es deseable, porque nos indica hasta qué punto el material puede deformarse cuando es sometido a esfuerzo, y puede recuperar su forma inicial sin perder sus propiedades elásticas.

Los % de deformación de compresión se encuentran en la tabla 18, el rango de valores obtenidos fue de 13,68% al 21,49 %. La tabla 20, muestra los resultados del análisis de varianza para el % de deformación de compresión:

Tabla 20.**ANOVA para % de deformación de compresión.**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Fibra	62,022	1	62,022	20,84	0,1373
B: Acoplante	1,79792	1	1,79792	0,60	0,5794
AA	0,0171509	1	0,0171509	0,01	0,9518
AB	0,540225	1	0,540225	0,18	0,7436
BB	0,0171504	1	0,0171504	0,01	0,9518
Falta de ajuste	9,48264	3	3,16088	1,06	0,5870
Error puro	2,9768	1	2,9768		
Total (corr.)	76,8796	9			

Fuente: esta investigación.

Como lo evidencia el análisis de varianza, ninguno de los factores de proceso o sus efectos cuadráticos tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta, de forma similar, la prueba de falta de ajuste y el estadístico Durbin Watson, no fueron significativos, todo lo anterior con un nivel de confianza del 95%.

Modelo matemático para el porcentaje de deformación:

$$\% \text{ Deformación en compresión} = 19,8098 - 0,174312 * F + 0,492987 * A - 0,000612518 * (F^2) - 0,0245 * F * A + 0,0272226 * (A^2)$$

Donde, F = % de fibra y A = % agente acoplante.

Al igual que con los resultados de la resistencia máxima a la deformación por compresión, la fibra puede ser viable para reducir los costos de producción pues no afecta las características del plástico, asimismo, el uso de agente acoplante no es insumo necesario que modifique esta variable de respuesta.

7.7.2.2 Módulo de Young de compresión.

Los valores del módulo de Young se encuentran en la tabla 18, los resultados obtenidos estuvieron entre 12,37 y 20,88 MPa. En la siguiente tabla se presenta el análisis de varianza ANOVA para el módulo de Young:

Tabla 21.

ANOVA para módulo de Young.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Fibra	28,9032	1	28,9032	205,79	0,0443
B: Acoplante	0,0748675	1	0,0748675	0,53	0,5985
AA	8,23915	1	8,23915	58,66	0,0827
AB	5,1529	1	5,1529	36,69	0,1042
BB	1,68711	1	1,68711	12,01	0,1788
Falta de ajuste	20,5445	3	6,84816	48,76	0,1034
Error puro	0,14045	1	0,14045		
Total (corr.)	63,0608	9			

Fuente: esta investigación.

De acuerdo con la tabla 21, el porcentaje de fibra es el único factor que tuvo un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta módulo de Young, el porcentaje de agente acoplante y los efectos cuadráticos no fueron significativos, la prueba de falta de ajuste y el estadístico Durbin Watson, no fueron significativos, lo que nos indica que el modelo matemático es adecuado para predecir la variable de respuesta y los ensayos experimentales fueron realizados de forma aleatoria, con un nivel de confianza del 95%.

El modelo matemático para el módulo de Young fue:

$$\text{Módulo de Young en compresión} = 21,1488 - 0,477508 \cdot F - 2,96051 \cdot A + 0,0134251 \cdot (F^2) + 0,0756667 \cdot F \cdot A + 0,27 \cdot (A^2)$$

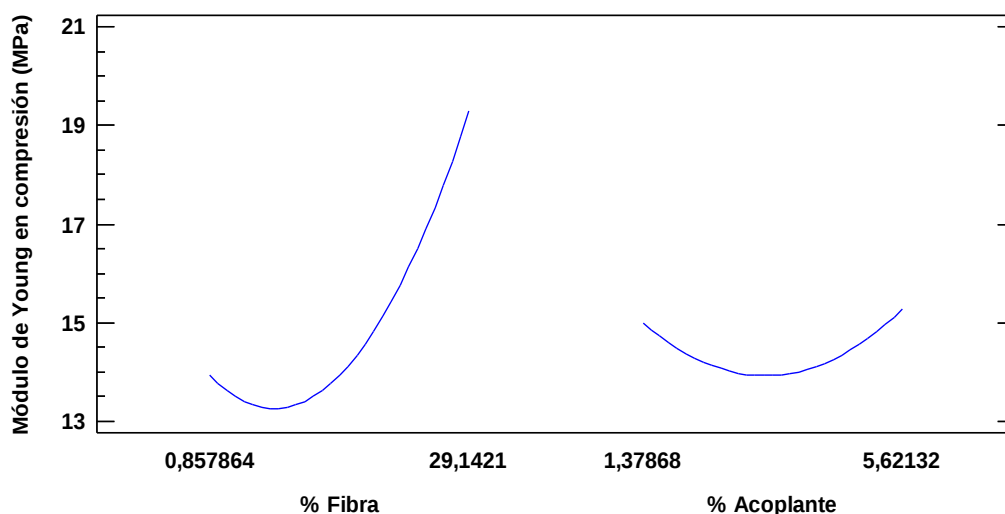
Donde, F = % de fibra y A = % agente acoplante.

El valor de R- Cuadrado para el modelo matemático es 67,18%. Que es relativamente bajo, esto nos indica una alta variabilidad que pudo ser ocasionada por los altos volúmenes de material que debe utilizar el equipo para obtener WPC.

Para continuar con el análisis estadístico de los resultados a continuación se muestra el gráfico de efectos principales para el módulo de Young:

Figura 93.

Gráfico de efectos principales para el módulo de Young



Fuente: esta investigación.

Como se puede observar en la figura 92, a medida que el porcentaje de fibra pasa de un nivel inferior a un nivel superior, el módulo de Young aumenta en su magnitud. Lo cual resulta bastante conveniente, ya que a medida que el módulo de Young aumenta, también lo hace su resistencia a deformarse, esto quiere decir que entre más porcentaje de fibra tenga el WPC, se requerirá una mayor fuerza para causar rotura o deformación.

7.7.3 Flexión

Figura 94.

Muestras finales de WPC sometidas a flexión



Fuente: esta investigación.

-Resistencia máxima a la deformación por flexión

En la tabla 22, se muestran los valores de la resistencia máxima a la deformación por flexión de los WPC, los valores obtenidos oscilaron entre 0,1089 y 0,2461 MPa. El análisis de varianza para la resistencia máxima a la deformación por flexión se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 22.***ANOVA resistencia máxima a la deformación por flexión.***

A: Fibra	0,0130028	1	0,0130028	7203,77	0,0075
B: Acoplante	0,000573821	1	0,000573821	317,91	0,0357
AA	0,00734862	1	0,00734862	4071,26	0,0100
AB	0,0000235225	1	0,0000235225	13,03	0,1720
BB	0,000207901	1	0,000207901	115,18	0,0591
Falta de ajuste	0,00369263	3	0,00123088	681,93	0,0278
Error puro	0,000001805	1	0,000001805		
Total (corr.)	0,0252534	9			

Fuente: esta investigación.

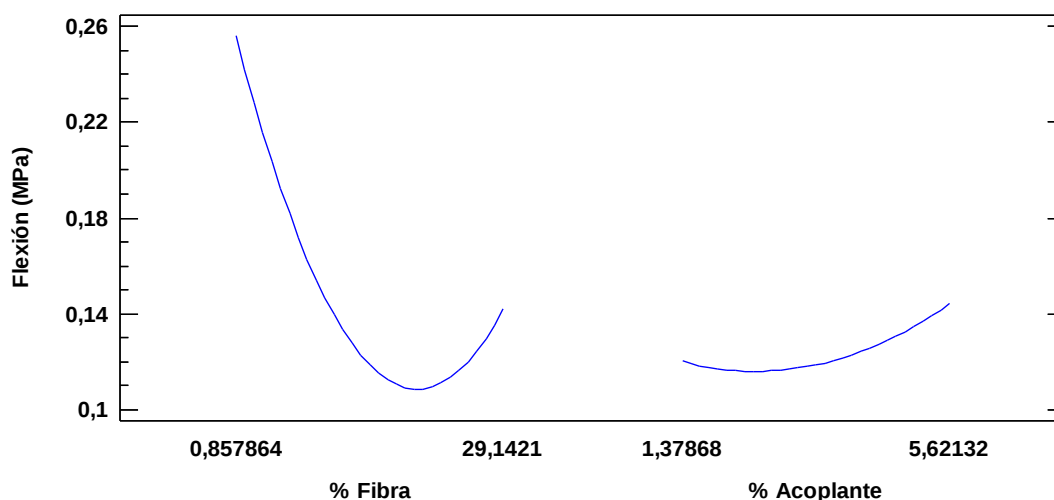
A partir de la gráfica inferior podemos establecer que los factores: porcentaje de fibra, porcentaje de acoplante, así como el efecto cuadrático del porcentaje de fibra tuvieron un efecto estadísticamente significativo sobre la variable de respuesta resistencia máxima a la deformación por flexión. Adicionalmente, la prueba de falta de ajuste tuvo un efecto significativo, por este motivo, el modelo matemático no es adecuado para predecir el comportamiento de las variables de respuesta, a pesar de que el R- cuadrado del modelo matemático fue del 85,37% de ajuste, el estadístico de Durbin Watson no fue significativo, por tanto, los ensayos experimentales fueron realizados de forma aleatoria.

El modelo matemático para la resistencia máxima a la deformación de flexión es:

$$\text{Flexión} = 0,277801 - 0,0154939 \cdot F - 0,0129094 \cdot A + 0,000400938 \cdot (F^2) - 0,000161667 \cdot F \cdot A + 0,00299723 \cdot (A^2)$$

Como la prueba de falta de ajuste fue significativa, los factores de proceso en el modelo matemático no describen la variabilidad de las respuestas.

Para comprender mejor el comportamiento de los factores de proceso, en la siguiente figura se muestra el diagrama de efectos principales para la variable de respuesta resistencia máxima a la deformación por flexión:

Figura 95.***Gráfico de efectos principales para la resistencia a la deformación por flexión***

Fuente: esta investigación.

Como lo evidencia la figura anterior, a medida que el porcentaje de fibra incrementa su magnitud de un valor inferior a uno superior, la resistencia máxima a la deformación por flexión disminuye hasta un punto mínimo, como el efecto cuadrático de este factor de proceso fue significativo, una vez alcanzado el punto mínimo de resistencia a la deformación por flexión, a partir de este punto, cuando aumentó el porcentaje de fibra, la resistencia a la deformación empezó a incrementar en su magnitud como se observa en la (figura 94).

El agente de acople tuvo un efecto positivo en la resistencia a la deformación por flexión, a medida que aumentó el porcentaje de agente acoplante, aumentó la resistencia a la deformación por flexión, como se muestra en la (figura 94).

7.7.3.1 Deformación máxima por esfuerzo de flexión.

Los resultados de la deformación máxima al someter el WPC a esfuerzo para análisis de flexión, se encuentran en la tabla 18, la deformación oscilo entre 18,80 y 34,54 mm. A

continuación, se muestra el análisis de varianza para la deformación máxima por esfuerzo durante los ensayos de flexión:

Tabla 23.

ANOVA para deformación por flexión.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Fibra	216,959	1	216,959	67,26	0,0772
B: Acoplante	1,97843	1	1,97843	0,61	0,5770
AA	80,3283	1	80,3283	24,90	0,1259
AB	3,15062	1	3,15062	0,98	0,5038
BB	0,301647	1	0,301647	0,09	0,8111
Falta de ajuste	25,4688	3	8,4896	2,63	0,4127
Error puro	3,2258	1	3,2258		
Total (corr.)	344,385	9			

Fuente: esta investigación.

Como se evidencia en la anterior tabla, ninguno de los factores experimentales, ni sus efectos cuadráticos tuvo un efecto estadístico en la variable de respuesta, el modelo matemático que se muestra a continuación es válido, pues la prueba de falta de ajuste no fue significativa, el modelo tuvo un buen ajuste del R-cuadrado de 91,67% y el estadístico Durbin Watson no fue significativo, por tanto, los ensayos fueron realizados de forma aleatoria.

el modelo matemático se presenta a continuación:

$$\text{Deformación de flexión} = 34,9452 - 1,57125 \cdot F + 0,419861 \cdot A + 0,0419188 \cdot (F^2) - 0,0591667 \cdot F \cdot A + 0,114167 \cdot (A^2).$$

7.7.3.2 Módulo de Young de flexión.

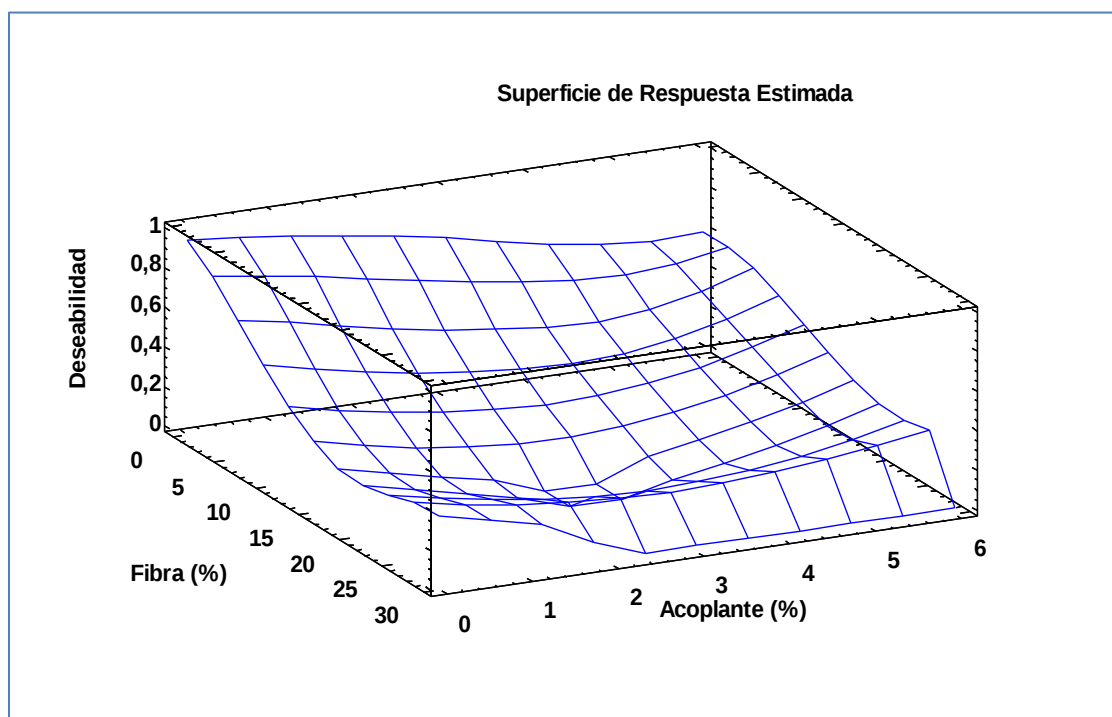
Los resultados del análisis de varianza presentados en la tabla 18 muestra que ninguno de los factores del proceso fue significativo, lo que nos permite concluir que para esta variable de respuesta el contenido de fibra no afectó la rigidez del material y los resultados de resistencia máxima a la flexión fue causado por el volumen crítico de fibra y no por posibles pérdidas de ductilidad del material.

7.7.3.3 Optimización de múltiples respuestas.

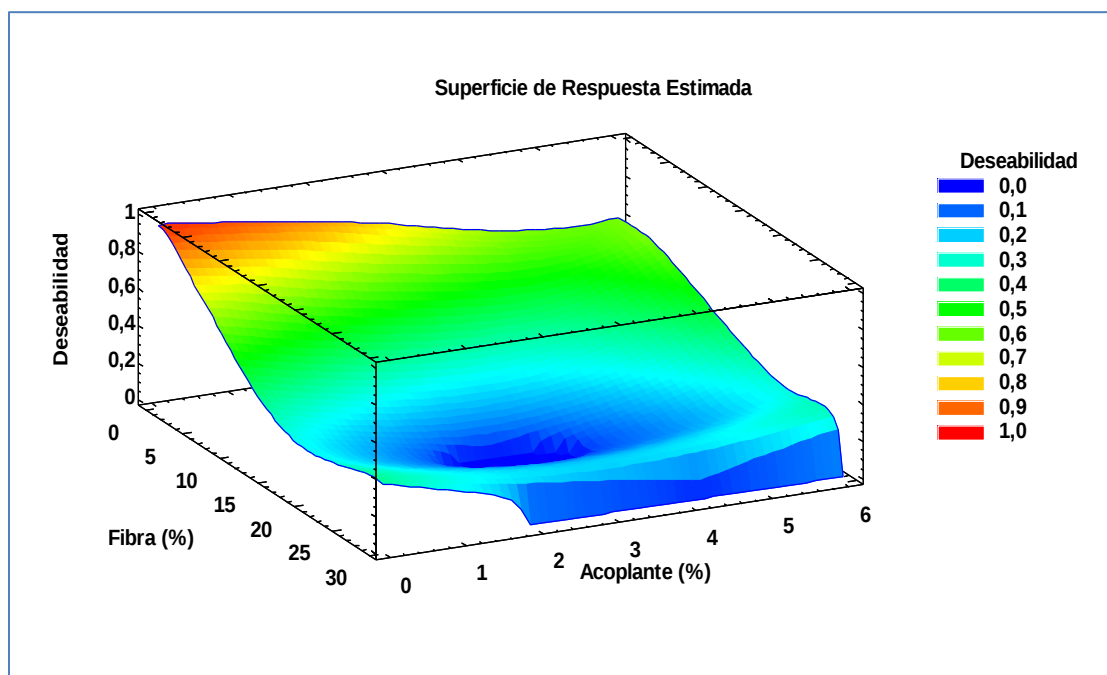
Las siguientes figuras muestran la superficie de respuesta obtenida para la optimización de múltiples respuestas, en las cuales se evalúa los factores porcentaje de fibra y porcentaje de agente acoplante, sobre la deseabilidad general de las respuestas:

Figura 96.

Superficie de respuesta



Fuente: esta investigación.

Figura 97.***Superficie de respuesta con contornos***

Fuente: esta investigación.

Como se observa en las (figuras 96 y 97), a medida que el porcentaje de fibra disminuye, la deseabilidad aumenta, de igual manera, a medida que disminuye el porcentaje de acoplante la deseabilidad aumenta.

Estos resultados muestran que en términos generales la fibra afecta a las propiedades mecánicas de los WPC obtenidos y el agente de acoplamiento mejora sus propiedades mecánicas. Sin embargo, en exceso puede ocasionar aglomeraciones y afectar a las propiedades mecánicas, tal y como lo muestra la superficie de respuesta y la figura 98 donde se observan aglomeraciones de agente de acoplamiento.

Figura 98.***Muestras de WPC con aglomeración de agente de acoplamiento.***

Fuente: esta investigación.

Por último, el gráfico de superficie de respuesta nos muestra un comportamiento similar al efecto cuadrático reportado durante los ensayos de flexión, además como se mencionó anteriormente, las limitadas condiciones de procesamiento del equipo no permitieron una mayor incorporación de fibra a la matriz plástica, por este motivo, se tomó el mayor nivel de deseabilidad alcanzado (94,73 %) en las condiciones limitadas del equipo y que permitían incorporar el mayor volumen de fibra posible para obtener el beneficio económico y ambiental que representa utilizar fibra natural como refuerzo en una matriz polimérica. Los niveles óptimos de las variables proceso se observan en la siguiente tabla.

Tabla 24.***Valores óptimos para optimización.***

<i>Factor</i>	<i>Bajo</i>	<i>Alto</i>	<i>Óptimo</i>
% de Fibra	0,857864	29,1421	0,857864
% de Acoplante	1,37868	5,62132	1,37868

Fuente: esta investigación.

la mezcla debe tener las siguientes cantidades: 0,857864 Kg de fibra, 1,37868 Kg de acoplante y 7.763456 kg de plástico para una carga total de 10 kg

Los valores estimados que se obtendrían con los niveles óptimos de las variables de proceso son:

Tabla 25.

Valores estimados de las variables de respuesta

Respuesta	Óptimo
Módulo de Young compresión (MPa)	22,927
Módulo de Young flexión (MPa)	2,52151
Resistencia máxima compresión (MPa)	2,76394
Resistencia Máxima flexión (MPa)	0,181175

Fuente: esta investigación.

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos en este trabajo, las fibras como **aserrín, arveja, cisco de café y fique**, son las que poseen el mayor potencial para el desarrollo de WPC en Nariño, estas fueron seleccionadas en base al estado del arte, por su disponibilidad, cercanía a la planta de procesamiento, entre otros parámetros.

Los tallos de arveja a pesar de ser los más accesibles tanto en costo como en disponibilidad, son los que tienen peores características mecánicas, el fique tiene buenas características fisicoquímicas y mecánicas, pero su costo es alto y ya se le está dando un buen uso, en la confección.

El contenido de fibra no tuvo un efecto en la resistencia máxima de compresión del material, por tanto, incorporarla no afecta a las características del material reforzado

El agente de acoplamiento mejora la compatibilidad de la interfaz, lo que tienen un beneficio en las propiedades mecánicas generales del WPC.

Debido al mayor módulo de Young de la madera, el plástico pierde sus propiedades de ductilidad y aumenta la rigidez del WPC.

Incorporar fibra natural como refuerzo a una matriz polimérica es viable desde el punto de vista económico para aquellas aplicaciones en las cuales se somete el material a carga de compresión predominante.

La resistencia a la flexión fue afectada por la mala distribución de las fibras por la diferencia de tamaños de partícula y debido a la configuración del equipo

Durante el desarrollo del proceso de extrusión si se evita que la temperatura de la camisa en el equipo extrusor supere los 220°C se minimiza la posibilidad de que la fibra se carbonice, y mejora el proceso de extrusión entre los componentes de la mezcla.

Para obtener las mejores características en los productos finales, la mezcla debe tener las siguientes cantidades: 0,857864 Kg de fibra, 1,37868 Kg de acoplante y el resto se debe completar con el material plástico para una carga de 10 kg de mezcla en el equipo extrusor.

El uso de plástico reciclado aumenta la variabilidad de las respuestas y hace que sea muy difícil predecir el comportamiento de los WPC obtenidos.

Recomendaciones

La cantidad de acoplante que se adicione en la mezcla afecta directamente al personal que manipula el equipo extrusor, ya que este genera una gran cantidad de humo negro que afecta la respiración y lastima los ojos, por eso se recomienda usar un equipo adecuado de protección para minimizar los riesgos por el uso del acoplante, de igual manera se recomienda no usar acoplante en exceso.

Se recomienda en lo posible realizar análisis de la composición química, celulosa, hemicelulosa y lignina de los materiales, además de análisis de espectroscopia de infrarrojo y calorimetría diferencial de barrido, además de ser posible una observación mediante microscopia electrónica de barrido; estas pruebas con el fin de obtener unos análisis más completos y una caracterización más precisa para reconocer el comportamiento fisicoquímico del material.

Se recomienda hacer el proceso de extrusión en zonas abiertas, ya que el acoplante al estar sometido al calor genera una gran cantidad de humo que afecta al operario.

Referencias

- Acuña, J. (2007). Refinamiento y funcionalización de fibras naturales en el desarrollo de un material compuestos de matriz PVC reforzado con fibras Lignocelulósicas. *Tesis de maestría*. Bogota D.C.: Universidad de los Andes.
- AGROSAVIA. (2019). *Agregando valos a los subproductos de la agroindustria panelera*. Obtenido de Bogota, Colombia: <https://www.agrosavia.co/noticias/agroindustria-panelera>
- Al-Maadeed, M., & Labidi, S. (2014). Recycled polymers in natural fibre-reinforced polymer composites. . *Natural Fibre Composites: Materials,Processes and Applications*, 103 - 114.
- Amaechi, C., Agbomerie, O., Orok, E., Job, S., & Ye, J. (2019). Economic aspects of fiber reinforced polymer composites recycling. *Encyclopedia of renewable and sustainable materials*, 1, 1 - 21.
- Amigo, V., Salvador, M., Llorens, R., Martí, F., & Sahuquillo, O. (2008). Comportamiento mecánico de polietieno de alta densidad reciclado reforzado con fibras naturales. . *Tenth international conference on non-conventional materials and technologies*, 12 - 14.
- Barrera, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2012). Compuestos laminados de matriz polimérica con fibras naturales: Comportamiento mecanico. *Scientia Et Technica*, Vol XVII, núm. 51, 51-59.
- Carbonell-Verdu, A., García-García, D., García-Sanoguera, D., Boronat, T., Montanes, N., & Balart, R. (2014). Desarrollo y caracterización de "wood plastic composites" con fibras de plumero de pampa. *II Congreso I+D+i Campus de Alcoi. Creando Sinergias*, 131-134.

Cestari, S., Franc, D., Coval, D., & Mendez, L. (2019).). Recycling processes and issues in natural fiber-reinforced polymer composites. *Green Composites for Automotive Applications*, 285 - 299.

Codigos de los plasticos. (05 de 03 de 2011). Obtenido de tecnologiadelosplasticos.blogspot.com:

<https://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com/2011/03/codigos-de-los-plasticos.html>

Contreras, M., Hormaza, W., & Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. *Revista latinoamericana de metalurgia y materiales*, 57-67.

Contreras, M., Hormaza, W., & Marañón, A. (2009). Fractografía de la fibra natural extraída del fique y de un material compuesto reforzado con tejido de fibra de fique y matriz resina poliéster. . *Suplemento de la Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, (1), 57 - 67.

Coral, J. (2019). Comportamiento del concreto con cascarilla de café y posibilidades ante textura y color. *Tesis de Maestría*. Bogota D.C.: Universidad Nacional de Colombia.

Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, tetera (*Stromanthe stromathoides*). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(7), 417-427.

Córdoba, C., Mera, J., Martínez, D., & Rodríguez, J. (2010). Aprovechamiento de polipropileno y polietileno de alta densidad reciclados, reforzados con fibra vegetal, TETERA (*Stromanthe Stromathoides*). *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 11(7), 417 - 427.

Cuéllar, A., & Muñoz, I. (2009). Fibras de guadua como refuerzo de matrices poliméricas. *DYNA*, 77(162), 137 - 142.

- Cuttillo, R., & Jackson, S. (2005). Compounding wood polymer composites with in-line Drying technology. *ANTEC*, 435-439.
- DANE. (2017). *Boletín Técnico Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA)*. DANE.
- Espitia, M., Rodríguez, N., Calderón, J., Benavides, A., Peraza, R., Espitia, G., & Nemocon, R. (2018). Mechanical and physical characterization of *Guadua angustifolia* 'Kunth' fibers from Colombia. . *Revista UIS Ingenierías* 17(2), 33 - 40.
- Estrada, M., Ramirez, F., Maldonado, A., & Correal, J. (2010). Caracterización mecánica de las fibras del bambú colombiano, *Guadua angustifolia*. *Primer simposion de Bambú y Madera Laminada*. Researchgate.
- FEDEPANELA. (2012). *Aprovechamineto de subproductos de la caña panelera en alimentación animal*. Bogota: Federación Nacional de Productores de Panela.
- Gañán, p., Zuluaga, R., Castro, C., Restrepo, A., Velásquez, J., Osorio, M., . . . Molina, C. (2017). Celulosa: un polímero de siempre con mucho futuro. *Revista Colombiana de Materiales*, 01-04.
- Gómez, T., Navacerrada, M., Díaz, C., & Fernández, P. (2020). Fique fibres as a sustainable material for thermoacoustic conditioning. . *Applied Acoustics*, 164, 2 - 9.
- Gonzales, I. (2016). Estudio experimental para la obtención de azúcares reductores a partir de la vaina de *Pisum Sativum* l. (arveja) mediante hidrólisis en agua supercrítica (Tesis pregrado). . *UNIVERSIDAD DE LA SALLE, Bogota, Colombia*.
- Gonzáles, S., Soto, N., Rutiaga, O., Medrano, H., Rutiaga, J., & López, M. (2011). Optimización del proceso de hidrólisis enzimática de una mezcla de pajas de frijol cuatro variedades (Pinto villa, Pinto saltillo, Pinto mestizo y Flor de mayo). . *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(1), 17 - 23.

- Gutiérrez, I., Zuluaga, R., Cruz, J., & Gañán, P. (2005). Influence of Steam Treatment on the Structure and Physical-Mechanical Behavior of Plantain Fibers. . *Información Tecnológica*, 16(2), 15 - 21.
- Hernández, D., Rojas, J., & Costa, Y. (2017). Characterization of NaOH-Treated Colombian Silverskin Coffee Fiber as a Composite Reinforcement. *BioResources* 12(4), 8803 - 8812.
- Hidalgo, M., & Salinas, E. (2019). Mechanical, thermal, viscoelastic performance and product application of PP- rice husk Colombian biocomposites. . *Composites Part B*, 176, 107135.
- Ingenieria Quimica, D. d. (2013). *criba.edu.ar*. Obtenido de CONICET Centro Cientifico Tecnologico BAHIA BLANCA: <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo10.pdf>
- Kerni, L., Singh, S., Patnaik, A., & Narinder, K. (2020). A review on natural fiber reinforced composites. *Materials Today: Proceedings* 28(3), 2214 - 7853.
- Le Duigou, A., Correa, D., Ueda, M., Matsuazaki, R., & Castro, M. (2020). A review of 3D and 4D printing of natural fibre biocomposites. *Materials and Design*, 194, 1 - 26.
- Linares, E., Galeano, G., N., G., & Figueroa, Y. (2008). Fibras vegetales utilizadas en artesanias en Colombia.
- López, D., & Rojas, A. (2018). Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y Termicas de materiales compuestos madero plásticos. *Entre Ciencia e Ingenieria*, Vol 12, No. 23, 93-102.
- Luna, F. (2015). Desafío para el desarrollo de materiales compuestos de matriz termoplástica y fibras naturales. I Simposio de Materiales Poliméricos. *SENA*.

- Luna, P., Mariño, A., Lizarazo, J., & Beltrán, O. (2017). Dry etching plasma applied to fique fibers: influence on their mechanical properties and surface appearance. *Procedia Engineering*, 200, 141 - 147.
- MADR. (2018). Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. *Evaluaciones Agropecuarias*. Colombia.
- Majewski, T., & Bledzki, A. (2013). Desarrollo y aplicaciones actuales de los plásticos reforzados por fibras naturales. *Memorias del XIX congreso internacional anual de la SOMIM*, (págs. 676 - 682).
- MINAGRICULTURA. (noviembre de 2018). *minagricultura.gov.co*. Obtenido de [sioc.minagricultura.gov.co: https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2018-11-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf](https://sioc.minagricultura.gov.co/Fique/Documentos/2018-11-30%20Cifras%20Sectoriales.pdf)
- Monroy, M. (2011). Caracterización macromecánica de un material compuesto a base de ácido poliláctico (PLA) y fibras naturales de cumare (*Astrocaryum chambira*). *Tesis de Maestría*. Bogota: Universidad de los Andes.
- Mora, W., & Ramón, A. (2017). Caracterización térmica, mecánica y morfológica de fibras naturales colombianas con potencial como refuerzo de biocompuestos. *Rev. Acad. Colomb. cienc. Ex.Fis.Nat.* 41(161), 479-489.
- Moreno, L., Florez, J., & Hernandez, D. (2018). Caracterización mecánica de compuestos poliéster/fibra de guadua y poliéster/fibra de guadua-vidrio. *Scientia et Technica Año XXIII, Vol. 23*, 344-348.
- Moreno, P., Ballerini, A., Gacitúa, W., & Rodrigue, D. (2017). Extrusion of foamed wood-plastic composites. Part I: Physical and morphological Characterizaacion. . *Revista Chapingo serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 23(3), 385-400.

- Muñoz, M., Hidalgo, M., & Mina, J. (2014). Fibras de fique una alternativa para el reforzamiento de plasticos. influencia de la modificacion superficial. *Biotechnologia en el sector Agropecuario y Agroindustrial*. Vol. 12 No.2, 60-70.
- Müssig, J., & Stevens, C. (2010). Industrial applications of natural fibres: Structure, properties and technical applications. 1st., Wiley, USA.
- Nariño, G. d. (2019). *Ministerio de agricultura*. Obtenido de Obtenido de Plan Departamental de Extensión Agropecuaria del departamento de Nariño PDEA - Nariño:
<https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Nari%C3%B1o.pdf>
- Ospina, C. (2014). *Evaluacion de las propiedades mecanicas de los perfiles extruidos a partir de mezclas de polimeros reciclados para la fabricacion de estibas de maderas plasticas en Maderpol S.A.S (Tesis de grado)*. MEDELLIN: Universidad EAFIT .
- Pascual, E. (06 de 05 de 2020). *La clasificación de los plásticos*. Obtenido de elblogverde.com:
<https://elblogverde.com/clasificacion-plasticos/>
- Pedraza, C. (2019).). *Caracterización de la fibra del pseudotallo de plátano como refuerzo y desarrollo de un material compuesto para fabricación de tejas . Tesis de Grado. .*
Colombia: Univerdidad Pedagógica y Tecnológica de colombia.
- Peñaranda, L., Montenegro, S., & Giraldo, P. (2017). Aprovechamiento de residuos agroindustriales en Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental* 8(2), 141 - 150.
- Pickering, K., Aruan, M., & Le, T. (2006). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Parte A*, 83, 98-112.

- Pickering, K., Aruan, M., & Le, T. (2016). A review of recent developments in natural fibre composites and their mechanical performance. *Composites: Part. A*, 83, 98 - 112.
- Pinzón, J. (2009). Secado de fibras de cisco de café como refuerzo en polímeros termoplásticos. (*Tesis de Maestria*). Bogota D.C. : Universidad de los andes, Facultad de ingeniería.
- ProMusa. (22 de 07 de 2020). *Promusa*. Obtenido de Improving the understanding of banana: <http://www.promusa.org/Banana+pseudostem>
- Quezada, W. (2007). *Guía técnica de agroindustria panelera*. Obtenido de Ibarra, Ecuador: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/934/1/Gu%C3%ADa%20T%C3%A9cnica%20de%20Agroindustria%20Panelera.pdf>.
- Ramírez, G., Padilla, M., Ortega, E., Salazar, L., Luna, C., Enríquez, L., . . . Díaz, D. (2019). *Plan departamental de extension agropecuaria del departamento de nariño PDEA - NARIÑO*. Obtenido de Miagricultura.gov.co: <https://www.minagricultura.gov.co/ministerio/direcciones/Documents/PDEA%27s%20Aprobados/PDEA%20Nari%C3%B1o.pdf>
- Revelo, J., Osorio, O., Checa, O., & Vaquiro, H. (2019). Evaluación de la Pérdida de Calidad Mecánica de Tres Fibras Naturales como Alternativa de Tutorado en el Cultivo de Arveja (*Pisum sativum L.*). . *Información tecnológica*, 30(5), 101 - 110.
- Rijkswaterstaat Ministry of Infrastructure and the Environment* . (24 de marzo de 2017). Obtenido de "Colombia: Sustainable waste management polices and sustainable waste practises".: <http://rwsenvironment.eu/subjects/from-waste-resources/projects/colombia-sustainable/>.
- Rivas, S. (2014). Valorización de hemicelulosas de biomasa vegetal. *Tesis Doctoral*. Universidad de vigo.

- Rodríguez, L. (2014). Elaboración de un material biocompuesto a partir de la fibra de plátano. *Tesis de maestría*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodríguez, L., Fabbri, S., Orrego, C., & Owsianiak, M. (2020). Comparative life cycle assessment of coffee jar lids made from biocomposites containing poly(lactic acid) and banana fiber. *Journal of Environmental Management*, 266, 110493.
- Rodríguez, L., Orrego, C., Ribeiro, I., & Pecos, P. (2018).). Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost study of Banana (*Musa sapientum*) fiber Biocomposite materials. . *Procedia CIRP*, 69, 585 - 590.
- Rodríguez, L., Sarache, W., & Orrego, C. (2014). Compuestos de Poliéster Reforzados con Fibra de Plátano/Banano (*Musa paradisiaca*) Modificada Químicamente. Comparación con Fibra de Vidrio y Fique (*Furcraea andina*). *Información Tecnológica*, 25 (5), 27 - 34.
- Salgado, J., & Velandia, F. (2019). Uso de materiales compuestos de polímeros con fibras naturales NFC en Colombia: perspectivas y oportunidades. . *Memorias del V Simposio de Mteriales Poliméricos*, pp.7-27.
- Sánchez, M., Aperador, W., & Capote, G. (2018).). Influence of the delignification process on the properties of panels made with Guadua fibers and plant resin. . *Industrial Crops & Products*, 125, 33 - 40.
- Sanchez, M., Aperador, W., & Capote, G. (2019). Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties. . *Construction and Building Materials*, 228, 116749.
- Sanchez, M., Capote, G., & Carrillo, J. (2019). Composites reinforced with Guadua fibers: Physical and mechanical properties. . *Construction and Building Materials*, 228, 116749.

- Sánchez, M., Morales, L., & Caicedo, J. (2017). Physical and mechanical properties of agglomerated panels made from bamboo fiber and vegetable resin. . *Construction and Building Materials*, 156, 330 - 339.
- Santhosh, K., & Somashekhar, H. (2019). Natural Fiber Reinforced Composites in the Context of Biodegradability: A Review. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering.. doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.11418-3.
- Sarasini, K., & Fiore, V. (2018). A systematic literature review on less common natural fibres and their biocomposites. *fibres and their biocomposites, journal of cleaner production*.
- Shao-Yuan, L., Tsu-Hsien, Y., Sheng-Fong, L., & Te-Hsin, Y. (2012). Optimized material composition to improve the physical and mechanical Properties of extruded wood-plastic composites (WPCs). *ELSEVIER*, 120 -127.
- Siso, Z., Estrada, A., Carrascal, E., & Mendoza, C. (2015). Un modelo de secuencia de enseñanza de la temática: Mezclas. Tipos y separación de mezclas. *Revista Electronica*, ISSN: 0718-1310, 124-140.
- Torres, K. (2013). Experimentación tecnológica de la fibra de banano aplicada en el diseño de objetos. *Tesis de Grado*. Cuenca, Ecuador: Universidad del AZUAY.
- Yong, K., & Kumar, K. (2020). Natural fibre composites (NFCs) for construction and automotive industries. *Handbook of Natural Fibres*, 469 - 498.
- Zindani, D., & Kumar, K. (2019). An insight into additive manufacturing of fiber reinforced polymer composite. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 267 - 278.