



POSGRADOS

Maestría en
**PRODUCCIÓN Y
OPERACIONES INDUSTRIALES**

RPC-SO-30-NO.506-2019

Opción de Titulación:

Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo

Tema:

Desarrollo de un proceso para la obtención de un material compuesto biodegradable reforzado con fibras cortas de carrizo (Phragmites Australis).

Autor:

NELSON WLADIMIR FERNÁNDEZ GUEVARA

Director:

Jorge Isaac Fajardo Seminario

QUITO – Ecuador

2026

Autor:



Nelson Wladimir Fernández Guevara

Ingeniero en Petroquímica

Candidato a Magíster en Producción y Operaciones Industriales por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Quito.

nfernandezg1@est.ups.edu.ec

Dirigido por:



Jorge Isaac Fajardo Seminario

Ingeniero Mecánico

Doctor en Ingeniería

jfajardo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2026 © Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO– ECUADOR – SUDAMÉRICA

Nelson Wladimir Fernández Guevara

DESARROLLO DE UN PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE UN MATERIAL COMPUESTO BIODEGRADABLE REFORZADO CON FIBRAS CORTAS DE CARRIZO (PHRAGMITES AUSTRALIS).

DEDICATORIA

*A mi madre Lcda. Esp. Mercedes Guevara.
A mis abuelitos Tarquino Guevara y Rosario Paredes.
A mi tío William Ojeda.*

AGRADECIMIENTO

A:

Mi madre, por su apoyo fundamental e incondicional durante mi formación académica, por su esfuerzo y sacrificio.

Ing. Jorge Fajardo, Ph.D, por su dirección en el desarrollo de la presente investigación.

Grupo de Investigación en Nuevos Materiales y Procesos de Transformación GIMAT, por su respaldo académico durante la ejecución de la tesis. La cual, se llevó a cabo en el marco del proyecto: “Aprovechamiento de residuos lignocelulósicos agroindustriales y materiales poliméricos de reciclaje para la producción de materiales compósitos y bioetanol en conceptos de biorefinería”.

Tabla de Contenido

Resumen	11
Abstract	12
1. Introducción	13
2. Determinación del Problema.....	14
2.1 Formulación del problema	15
2.2 Justificación	15
2.3 Objetivos.....	16
2.3.1 Objetivo general	16
2.3.2 Objetivos específicos	16
3. Marco teórico referencial.....	17
3.1 Antecedentes de la investigación.....	18
3.2 Aspectos teóricos fundamentales	22
3.2.1 Materiales compuestos	22
3.2.2 Carrizo.....	25
3.2.3 Explosión de vapor	27
3.2.4 Procesos de fabricación de materiales compuestos	29
3.2.5 Diagramas de flujo.....	32
4. Materiales y metodología.....	34
4.1 Materiales.....	35
4.1.1 PLA (Matriz)	35
4.1.2 BP-1 (Agente de acople)	35
4.1.3 Fibra de carrizo (Refuerzo)	35
4.2 Definición de condiciones iniciales para la extracción de fibra	36
4.2.1 Contenido de humedad.....	36

4.2.2 Acondicionamiento del carrizo.....	36
4.2.3 Factor de severidad	37
4.3 Extracción de fibra	37
4.4 Molienda y tamizado	38
4.5 Diseño central compuesto rotacional	39
4.6 Preparación de compuestos FC/PLA/BP-1	40
4.7 Obtención de probetas.....	41
4.8 Ensayos mecánicos de los materiales compuestos.....	42
4.9 Diagrama de flujo de procesos (PFD)	42
5. Resultados y discusión.....	44
5.1 Contenido de humedad del carrizo	44
5.2 Obtención de fibra de carrizo.....	44
5.3 Preparación de los composites FC/PLA/BP-1	46
5.4 Ensayo de tracción.....	48
5.5 Ensayo de flexión.....	49
5.6 Análisis estadístico de los ensayos mecánicos	50
5.6.1 Esfuerzo máximo a tracción	50
5.6.2 Esfuerzo máximo a flexión.....	51
5.7 PFD.....	53
5.7.1 Definición del producto	53
5.7.2 Descripción del proceso	53
5.7.3 Flujos máxicos.....	55
6. Conclusiones.....	58
7. Recomendaciones.....	60
Referencias	61
ANEXOS.....	67

Índice de Figuras

Figura 1. Estructura de un material compuesto [31]	22
Figura 2. Matriz reforzada con partículas [2]	24
Figura 3. Tipos de fibras [2]	24
Figura 4. Estructura de un material compuesto: laminar (a) y tipo sánduche (b) [32]..	25
Figura 5. Carrizo común (<i>Phragmites Australis</i>) [37]	26
Figura 6. Mecanismo de explosión de vapor [43]	28
Figura 7. Diagrama de un extrusor de tornillo estándar [48]	29
Figura 8. Diagrama del moldeo por inyección con: a) émbolo y b) tornillo giratorio alternativo [48]	30
Figura 9. Diagrama de moldeo por aspersion [48].....	31
Figura 10. Esquemas de moldeo por compresión: a) positivo b) semipositivo y c) rebaba [48]	31
Figura 11. Esquema de estratificación manual [48]	32
Figura 12. Íconos en un PFD [49].....	33
Figura 13. Metodología experimental de la investigación	34
Figura 14. Chips de carrizo	37
Figura 15. Fibra de carrizo extraída mediante explosión de vapor.....	38
Figura 16. Equipo de steam explosion ESE-01	38
Figura 17. Fibra de carrizo molida	39
Figura 18. Probetas	41
Figura 19. Mezclas FC/PLA/BP-1 (11 corridas)	47
Figura 20. Pellets FC/PLA/BP-1 (11 corridas)	48
Figura 21. Superficie de respuesta - esfuerzo máximo a tracción	51
Figura 22. Superficie de respuesta - esfuerzo máximo a flexión	52
Figura 23. PFD propuesto para el desarrollo de un compuesto biodegradable reforzado con fibras de carrizo	57

Índice de Tablas

Tabla 1. Composición química de fibras naturales [38]	26
Tabla 2. Equipos	35
Tabla 3. Factores y niveles de estudio de la investigación.....	40
Tabla 4. Masa de los componentes de la mezcla.....	40
Tabla 5. Condiciones operacionales para las fases y zonas de inyección	41
Tabla 6. Nomenclatura de los equipos del proceso	43
Tabla 7. Masa de muestras de carrizo y tiempo de secado	44
Tabla 8. Masa retenida de fibra de carrizo en la tamizadora AS 200	45
Tabla 9. Esfuerzo máximo a tracción de las corridas experimentales	48
Tabla 10. Esfuerzo máximo a flexión de las corridas experimentales	49
Tabla 11. ANOVA esfuerzo máximo a tracción	50
Tabla 12. ANOVA esfuerzo máximo a flexión	52
Tabla 13. Composición de los componentes del composite FC/BP-1/PLA	53
Tabla 14. Parámetros críticos del proceso	55
Tabla 15. Flujos máxicos del proceso	55
Tabla 16. Especificaciones técnicas para la extrusora de laboratorio [60].....	68
Tabla 17. Especificaciones técnicas para el ciclón [61]	69
Tabla 18. Precios referenciales de la materia prima.....	69
Tabla 19 Costos de equipos.....	70
Tabla 20. Consumo energético de los equipos	70

Lista de Siglas

FB Fibra de bambú

FC Fibra corta de carrizo

PLA Ácido poliláctico

PFD Diagrama de flujo de procesos

MC Contenido de humedad

BP-1 Poli (coetereftalato de butileneadipato) modificado con anhídrido injertado

Desarrollo de un proceso para la obtención de un material compuesto biodegradable reforzado con fibras cortas de carrizo (*Phragmites Australis*).

Autor:

NELSON WLADIMIR FERNÁNDEZ GUEVARA

Resumen

En la presente investigación, se establece un proceso experimental a escala de laboratorio para obtener un composite biodegradable con fibras cortas de carrizo como refuerzo. La fibra de carrizo fue obtenida mediante el proceso de explosión de vapor con un factor de severidad de 3.3. Se determinó el contenido de humedad promedio del carrizo (11.8 %) y el rendimiento promedio de extracción de fibra corta (149 – 250 μm) (44.01 %), datos que fueron considerados como base de cálculo para el diagrama de flujo de procesos (PFD). Mediante un diseño central compuesto rotacional con tres puntos centrales se prepararon 11 corridas experimentales variando el contenido en peso de la fibra corta de carrizo (FC) y agente de acople (BP-1). Las probetas fueron obtenidas mediante inyección y se evaluaron sus propiedades mecánicas bajo esfuerzo de tracción (ASTM D638) y flexión (ASTM D790). El composite de la corrida 8 (30 %FC, 11.46 %BP-1 y 58.54 %PLA) exhibió el valor más alto de resistencia a la tracción 50.3 MPa, presentando un incremento del 11.78 % respecto al valor del PLA puro (45 MPa). Mientras que, en el ensayo a flexión el composite de la corrida 2 (20 %FC, 10 %BP-1 y 70 %PLA) mejoró en un 11.86 % de 70 MPa (PLA puro) a 78.3 MPa. La investigación experimental denota que a mayor contenido en peso de BP-1 las propiedades mecánicas de los composites presentan un incremento significativo, puesto que, permite una transferencia eficiente de esfuerzos desde la matriz al refuerzo. Para la obtención del composite biodegradable se elaboró un PFD en AutoCAD y se establece una producción de 2.5 kg/h con una composición (30 %FC, 11.46 %BP-1 y 58.54 %PLA). Para lo cual, se requiere una alimentación fresca de carrizo de 1.94 kg/h, 0.29 kg/h de BP-1, 1.46 kg/h de PLA y 0.75 kg/h de fibra de carrizo corta. Y, se propone emplear una extrusora de doble husillo corrotante, la misma que, no debe superar la temperatura máxima de 170 °C para conservar la integridad estructural de la fibra de carrizo.

Palabras clave: compuesto, biodegradable, fibra, carrizo, tracción, flexión, proceso.

Abstract

In the present investigation, a laboratory-scale experimental process is established to obtain a biodegradable composite with short reed fibres as reinforcement. The reed fibre was obtained by steam explosion process with a severity factor of 3.3. The average moisture content of the reed (11.8 %) and the average extraction yield of short fibre (149 - 250 μm) (44.01 %) were determined, which were considered as the basis for the calculation of the process flow diagram (PFD). Using a central composite rotational design with three central points, 11 experimental runs were prepared by varying the weight content of the short reed fibre (FC) and coupling agent (BP-1). The specimens were obtained by injection moulding and their mechanical properties were evaluated under tensile (ASTM D638) and flexural (ASTM D790) stresses. The composite of run 8 (30 %FC, 11.46 %BP-1 and 58.54 %PLA) exhibited the highest tensile strength value of 50.3 MPa, presenting an increase of 11.78 % over the pure PLA value (45 MPa). While, in the flexural test, the composite of run 2 (20 %FC, 10 %BP-1 and 70 %PLA) improved by 11.86 % from 70 MPa (pure PLA) to 78.3 MPa. The experimental investigation shows that the higher the weight content of BP-1 the mechanical properties of the composites show a significant increase, since it allows an efficient transfer of stresses from the matrix to the reinforcement. In order to obtain the biodegradable composite, a PFD was elaborated in AutoCAD and a production of 2.5 kg/h with a composition (30 %FC, 11.46 %BP-1 and 58.54 %PLA) was established. This requires a fresh reed feed of 1.94 kg/h, 0.29 kg/h BP-1, 1.46 kg/h PLA and 0.75 kg/h short reed fibre. And, it is proposed to use a co-rotating twin-screw extruder, which should not exceed a maximum temperature of 170 °C to preserve the structural integrity of the reed fibre.

Palabras clave:

composite, biodegradable, fibre, reed, tensile, bending, process.

1. Introducción

Los composites verdes están fabricados de fibras naturales con una matriz de polímeros biodegradables. En aplicaciones industriales, los materiales poliméricos que poseen fibras naturales como fase de refuerzo presentan una oportunidad sustancial para el desarrollo sostenible. Sin embargo, para su uso industrial existen limitantes, siendo necesario realizar investigaciones adicionales sobre el comportamiento de los materiales y su capacidad de conservar sus propiedades a lo largo del tiempo [1], [2].

La investigación sobre compuestos poliméricos reforzados con fibras vegetales como sustituto de los materiales convencionales a base de petróleo ha ido en aumento, impulsada por el requerimiento creciente de materiales con bajo impacto ambiental en diversos sectores industriales [2]. El empleo de fibra de carrizo como fase reforzante para el desarrollo de composites biodegradables es atractivo ya que es un recurso renovable y tiene propiedades mecánicas y físicas similares a la del bambú; sin embargo, no son muy populares en comparación con los compuestos poliméricos que integran como refuerzo fibras de origen sintético.

Por lo tanto, el presente estudio pretende proponer a la fibra de carrizo como una fibra lignocelulósica potencial debido a su bajo peso, amplia disponibilidad en la naturaleza y capacidad de descomposición biológica; convirtiéndose en una alternativa más sostenible para la investigación y elaboración de materiales compuestos en el país. Por lo tanto, el carrizo y su línea de producción a escala de laboratorio podría marcar un nuevo hito en la investigación de los composites biodegradables.

2. Determinación del Problema

La industrialización del plástico, su versatilidad en aplicaciones de consumo e industriales, naturaleza no biodegradable y mala gestión son factores que han contribuido a su acumulación en el medio ambiente como vertederos y basura marina. Como una alternativa a la contaminación plástica, varios países han introducido leyes que impulsan el uso de fuentes renovables sostenibles; las mismas que han aportado a que la investigación, desarrollo y mercado de plásticos biodegradables sea cada vez más viable a escala industrial [3].

Actualmente, los materiales compuestos biodegradables integran las líneas estratégicas de investigación en el ámbito de nuevos materiales plásticos, los cuales podrían llegar a sustituir a los plásticos derivados del petróleo. En Ecuador son producidas fibras vegetales que pueden ser incorporadas como refuerzo en la elaboración de materiales compuestos, tales como: abacá, sisal, curauá, yute, ramio, coco y lino [4]. Pero, no se ha estudiado al carrizo (*Phragmites Australis*) como un potencial refuerzo en los materiales compuestos, dada su rápida tasa de crecimiento y copiosidad.

Las fibras naturales presentan excelentes ventajas: densidades bajas, accesibilidad económica, propiedades mecánicas específicas superiores, renovables, reciclables, no tóxicas y baja abrasión de máquinas. No obstante, presentan limitaciones como: presentan baja resistencia al agua, alta higroscopicidad, dificultad en su procesamiento, bajo punto de fusión y no compatibilidad interfacial podría convertirse en una restricción para la fabricación de composites. Sin embargo, los pretratamientos superficiales adecuados y la aplicación de agentes de compatibilización contribuyen a mejorar y reforzar las características mecánicas de los composites con fibras lignocelulósicas [5], [6].

Por lo tanto, se establece como una solución el desarrollo de un proceso innovador en la obtención de un composite biodegradable reforzado con fibras vegetales de carrizo, que acople sostenibilidad con propiedades mecánicas idóneas para

aplicaciones estructurales industriales. La presente investigación aborda ese vacío existente y plantea un proceso de manufactura a escala de laboratorio que contribuya al avance de diseño de nuevos materiales biodegradables y permita un probable escalamiento industrial.

2.1 Formulación del problema

¿Cómo el diseño de un proceso a escala de laboratorio permitirá la producción de un material compuesto biodegradable con refuerzo de fibras de carrizo (*Phragmites Australis*)?

2.2 Justificación

La propuesta de la investigación se deriva de reducir la dependencia de materiales basados en combustibles fósiles e incrementar los estudios sobre materiales compuestos reforzados con fibras naturales disponibles en nuestro ecosistema con el objetivo de sustituir el uso de refuerzos sintéticos. La investigación aplicada en el área de materiales biobasados proveniente de recursos renovables naturales se consideran una forma de mitigar la dependencia del plástico, puesto que, permite disminuir la huella de carbono, impacto ambiental y una transición hacia una economía circular de base biológica [7], [8], [9].

Se han realizado numerosas investigaciones sobre la incorporación de fibras vegetales sostenibles, como yute, cáñamo, piña, basalto, sisal, plátano, bambú, entre otras, en diferentes matrices poliméricas, lo que ha llevado a observar mejoras en el comportamiento mecánico de composites y de acuerdo a sus propiedades se ha determinado potenciales aplicaciones en el área de ingeniería y construcción. Sin embargo, en el país existen escasos estudios sobre el empleo como fase reforzante de la fibra de carrizo en materiales biodegradables y su proceso de obtención. La importancia científica que aporta el proyecto es relevante para futuras investigaciones pues dicha metodología será la base para la manufactura de materiales compuestos biodegradables a partir del desarrollo de un PFD.

Actualmente, Ecuador pretende reducir la contaminación plástica a través de la ley

de gestión sostenible de plásticos de un solo uso, la cual se encuentra vigente desde el 2020. Por lo tanto, la ejecución del presente estudio impulsará un cambio en la matriz productiva, ya que, se encuentra alineado al principio 10 de la química verde, el cual recomienda diseñar productos biodegradables [10] y con los objetivos 11 y 12 del Plan Nacional de Desarrollo [11]. Los materiales biodegradables son un enfoque prometedor para resolver distintas problemáticas relacionadas con el plástico que desafía nuestro entorno natural y al mundo.

2.3 Objetivos

2.3.1 Objetivo general

- Desarrollar un proceso para la obtención de un material compuesto biodegradable reforzado con fibras cortas de carrizo (*Phragmites Australis*).

2.3.2 Objetivos específicos

- Definir las condiciones de extracción de la fibra de carrizo mediante explosión de vapor para emplearlo en el desarrollo de un material compuesto biodegradable.
- Emplear un diseño central compuesto rotacional para la formulación de diferentes mezclas del bio compuesto variando el porcentaje en peso de la fibra y el porcentaje en peso del agente de acople.
- Caracterizar experimentalmente las diferentes mezclas del composite para analizar su comportamiento mecánico mediante ensayos de tracción y flexión.
- Establecer el proceso de manufactura para obtener el composite con las mejores propiedades mecánicas mediante un diagrama de flujo de procesos (PFD).

3. Marco teórico referencial

Desde la introducción de los plásticos, durante la década de 1950, su desarrollo se ha expandido exponencialmente y su tasa de producción incrementa constantemente y podría duplicarse para el 2025 y triplicarse para el 2050 [12]. El uso generalizado de plásticos petroquímicos y la falta de opciones adecuadas para su eliminación, genera anualmente alrededor de 8 millones de toneladas métricas de basura plástica que se vierten a los océanos [13]. Por lo tanto, como una posible solución a los plásticos convencionales la investigación en polímeros de origen biológico con fibras naturales como refuerzo se ha ido consolidando. En la actualidad, los compuestos de matriz polimérica con fibras naturales como refuerzo han sobresalido a causa de las propiedades prometedoras de las fibras naturales como: peso ligero, resistencia al agua, alta resistencia al impacto, rigidez, flexibilidad, respeto al medio ambiente, etc. [14], [15].

Los materiales compuestos se definen como materiales multifásicos que constan de dos o más componentes que poseen propiedades especiales. El refuerzo (fase discontinua) constituye la zona que absorbe la mayor proporción de la carga suministrada sobre el material compuesto, mientras que, la matriz (fase continua) protege y sostiene el refuerzo [16]. Comúnmente, uno de los materiales de refuerzo es la fibra natural, que ayuda a la transferencia de carga entre los compuestos y las fuerzas externas, mejorando el rendimiento del material de la matriz. La composición química de la fibra lignocelulósica afecta directamente las características estructurales y funcionales de los composites con fibra natural como refuerzo. El contenido de celulosa en la fibra vegetal determina sus propiedades mecánicas y las propiedades del composite. Mientras que, una elevada concentración de hemicelulosa y lignina en la fibra vegetal, genera un comportamiento higroscópico y a la biodegradación de la fibra [17], [18].

Las matrices termoestables y termoplásticas convencionales se utilizan comúnmente para producir compuestos, sin embargo, desde un enfoque de sostenibilidad ha incrementado el interés en matrices de origen biológico [14]. El

PLA (ácido poliláctico) es un biopolímero derivado a partir de fuentes renovables como el almidón y los azúcares [19]. A pesar de su potencial, el uso generalizado del PLA está limitado por su fragilidad, baja estabilidad térmica y mayor costo en comparación con el polipropileno y polietileno [20]. Por lo tanto, una estrategia para optimizar la aplicabilidad del PLA es incorporar refuerzos fibrosos para generar materiales competitivos menos costosos y al mismo tiempo preservar o mejorar las propiedades del material [21].

3.1 Antecedentes de la investigación

Yang et al. [22] emplearon como compatibilizador carbodiimida polimerizada (PCD) para preparar compuestos FB/PLA modificados e investigar el efecto del contenido de FB en los mismos. El porcentaje de acople se basó en el 1 % de PCD de la masa total de FB y PLA y se empleó una máquina de moldeo por microinyección para preparar las muestras de prueba. En comparación con los compuestos FB/PLA, la adición de PCD resultó en un cierto grado de mejora en el módulo de flexión, la resistencia a: flexión, impacto, tracción y el módulo de tracción de los compuestos. Entre ellos, la mejora de la resistencia al impacto fue la más significativa, de 9.5 kJ/m² a 11.4 kJ/m², un incremento del 20.9 %.

Zhang et al. [23] evaluaron el efecto de polipirrol como compatibilizador en compuestos de FB/PLA. El pirrol se polimerizó oxidativamente sobre la superficie de las FB de forma continua bajo diferentes condiciones de oxidación. Se utilizó una concentración de pirrol de 0.025 mol/L. Los compuestos FB/PLA sin tratar y modificados se fabricaron mediante un proceso de extrusión por fusión. Para producir los compuestos FB/PLA se utilizó una relación de 4:6 y se utilizó cuatro tipos de oxidantes (peróxido de hidrógeno, cloruro cúprico, cloruro férrico y persulfato de amonio). En comparación con los compuestos de control FB/PLA, la resistencia y el módulo de: flexión, tracción y la resistencia al impacto aumentaron un 22.79, 28.07, 33.43, 29.11 y 37.58 % en los compuestos FP-FB/PLA, lo que denotó que el oxidante de FeCl₃ tuvo un desempeño positivo para mejorar las propiedades mecánicas de los compuestos en el experimento. Además, los compuestos FB/PLA modificados con polipirrol exhibieron no solo excelentes compatibilidades de

interfaz, sino también una prometedora estabilidad térmica.

Lin et al. [24] investigaron la influencia del tratamiento alcalino y clorhidrato de dopamina en compuestos de fibra de bambú y ácido poliláctico. La fibra de bambú se sumergió en una solución de clorhidrato de dopamina (DA) con una proporción fija de 1 % (p/p). El tratamiento alcalino a las fibras de bambú se lo hizo en concentraciones variables de 4, 6 y 8 % (p/p), y posteriormente la solución se agitó a 300 r/min durante 8 h en un baño de agua a 40 °C. En la preparación de los compuestos, la proporción de FB/PLA fue del 40 % (p/p) y se utilizó una extrusora de doble husillo co-rotativo. Después del tratamiento sinérgico, las resistencias a la flexión y a la tracción de los compuestos ADB4/PLA (concentración de álcali 4 % (p/p)) aumentaron en un 16.1 % y un 34.4 %, respectivamente, en comparación con los compuestos de control UB/PLA. La razón principal del incremento en el desempeño mecánico denota que el tratamiento alcalino elimina significativamente la hemicelulosa y pectina en la fibra de bambú, lo que aumenta el área de superficie específica de la fibra lignocelulósica y los grupos hidroxilo, incrementando el área de unión física entre matriz/refuerzo.

Fei et al. [25] establecieron una estrategia de tratamiento sinérgico de fibras de bambú que implica un pretratamiento con álcali diluido, un recubrimiento de polidopamina y una modificación del agente de acoplamiento de silano para mejorar la compatibilidad interfacial y las propiedades mecánicas de los compuestos de FB/PLA. Las fibras de bambú se extrajeron utilizando una solución de tolueno-etanol con una relación de volumen de 2:1 durante 6 h y se secaron en una estufa de secado rápido a 60 °C durante 24 h. Las fibras de bambú secas se introdujeron en una solución de NaOH al 3 % en peso en una proporción sólido-líquido de 1:30 y se agitaron magnéticamente en baño de agua a una temperatura constante de 60 °C durante 4 h. Se observaron propiedades mecánicas óptimas para compuestos con una proporción de masa de fibra de bambú tratada sinérgicamente del 20 %. Los valores de resistencia a la tracción, alargamiento de rotura y módulo de tracción de los compuestos tratados aumentaron en un 63.06, 183.04 y 259.04 %, respectivamente, en comparación con los compuestos no tratados.

Le et al. [26] investigaron la interfase en biocompositos de PLA reforzados con fibras

naturales (lino), modificados mediante tratamientos optimizados con organosilanos. Las fibras de lino se trataron en diversas condiciones con un agente de acoplamiento de organosilano llamado GPS (3-glicidiloxipropil) trimetoxisilano elegido por su reactividad con el PLA. Estudiaron la influencia de la concentración (1, 5 y 10 %(p/p)) y la temperatura de la solución de organosilano (20 y 70 °C), el tiempo de remojo (0.08, 1 y 24 h) y la temperatura de calentamiento (60 y 105 °C). La incorporación de un 20 % en peso de fibras no tratadas conduce a una disminución drástica de la tensión de fluencia y resistencia al impacto respecto al PLA puro. A través de un análisis por SEM se identifica que los biocomposites reforzados con un 20 %(p/p) tratados, muestran una falla interfacial cohesiva a cargas mucho más altas, lo que resalta la transferencia de carga mejorada del PLA a las fibras de lino.

Qian et al. [27] prepararon y caracterizaron biocompuestos de partículas de bambú (PB) y PLA compatibilizados con anhídrido maleico (MAH). Los biocompuestos se prepararon mediante mezcla fundida y prensado en caliente. Las PB se sumergieron en una solución de NaOH 0.3 N con una proporción de 1:15 (m/v) en agua a 40 °C durante 3 h. Se pesaron cantidades de MAH para diferentes fracciones de masa 0.5, 1, 1.5, 2 y 2.5 % (basadas en 50 g de la mezcla) y se utilizó una relación fija de 70:30 PLA/PB. Las propiedades de resistencia a la tracción y elongación a la rotura de los biocompuestos PLA/PB alcanzaron valores máximos de 47.6 MPa y 6.22 %, respectivamente, cuando se trataron con 1 % de MAH. Mientras que, la resistencia máxima a la flexión y su módulo fueron de 72.61 MPa y 4.65 GPa, se obtuvieron con un tratamiento de 0.5 % de MAH, y las propiedades térmicas también mejoraron con esta concentración.

Long et al. [28] analizaron el efecto del polietilenglicol (PEG) en el comportamiento mecánico de materiales compuestos de PLA con refuerzo de fibra de bambú. Las fibras de bambú con tratamiento alcalino y sin tratamiento, se mezclaron en una proporción másica FB/PLA 10:90, 15:85, 20:80, 25:75 y 30:70 mediante un mezclador de alta velocidad durante 10 min. Los compuestos se prepararon utilizando un equipo de extrusión y moldeo por inyección. La resistencia a la tracción de las probetas alcanzó 65.46 MPa cuando el contenido de BF tratado con

álcali (ABF) fue del 20 % en peso con una mejora del 11.7 % en comparación con la del PLA puro. Mientras que, la resistencia a la flexión de las probetas alcanzó 97.94 MPa cuando el contenido de ABF fue del 10 % en peso en comparación con el PLA puro aumentó un 6.2 %. El PEG-20000 fue el mejor plastificante entre PEG-6000, PEG-10000 y PEG-20000. Cuando el componente de PEG fue del 10 % (p/p), el alargamiento aumentó en un 56 %. Los compuestos formados con la relación FB/PLA 20:80 en peso presentaron las propiedades mecánicas óptimas.

Tokoro et al. [29] estudiaron la incorporación de fibras de bambú con PLA con el objetivo de optimizar propiedades respecto al impacto y la estabilidad térmica. Extrajeron tres tipos diferentes de fibras del bambú crudo, mediante tratamiento con hidróxido de sodio (1.5 N a 70 °C durante 10 h) y explosión de vapor (175 °C, 0.7 – 0.8 MPa durante 1 h) junto con procesamiento mecánico. Las muestras compuestas se fabricaron mediante moldeo por inyección utilizando gránulos de PLA/FB preparados mediante una máquina extrusora de doble tornillo. Entre las tres fibras de bambú, el filamento explotado con vapor aumenta significativamente la resistencia a la flexión del composite de matriz de PLA debido a la mayor resistencia interfacial entre el PLA y el filamento. Las propiedades térmicas y la resistencia al calor de los compuestos de PLA y PLA/FB mejoran mucho mediante el recocido (110 °C durante 5 h) en comparación con los no recocidos.

Rao et al. [30] demostraron las características mecánicas, térmicas y morfológicas de los compuestos ecológicos procesados por moldeo por inyección. El refuerzo fue químicamente con hidróxido de sodio al 2 % durante 4 h para desarrollar los compuestos de FB/PLA. Se analizó el efecto de las condiciones de procesamiento de la fibra: longitud (2, 3, 4, 5 y 6 mm) y carga (10, 20 y 30 % en peso). Además, se investigó el efecto de los parámetros de inyección: presión (70, 90 y 110 bar), velocidad (40, 50 y 60 mm/s) y temperatura (165, 175 y 185 °C) y se analizó estadísticamente utilizando la técnica de análisis de relación gris (GRA). Los parámetros de inyección óptimos para lograr mejores propiedades mecánicas se encontraron como A2-B3-C1 (presión de inyección: 90 bares, velocidad de inyección: 60 mms⁻¹ y temperatura de inyección: 165 °C) y la combinación óptima de parámetros de fabricación fue L3– D2 (longitud de fibra: 4 mm y carga de fibra:

20 %).

3.2 Aspectos teóricos fundamentales

3.2.1 Materiales compuestos

Un material compuesto se fabrica al integrar diferentes materiales que permite generar propiedades específicas. Es decir, un material compuesto puede definirse como una combinación de fases diferenciadas, en el cual cada una de las fases constituyentes (matriz y refuerzo) representan significativamente en el diseño de propiedades específicas requeridas [31]. La estructura elemental de un composite reforzado con fibras en una matriz de resina se puede observar en la Figura 1.

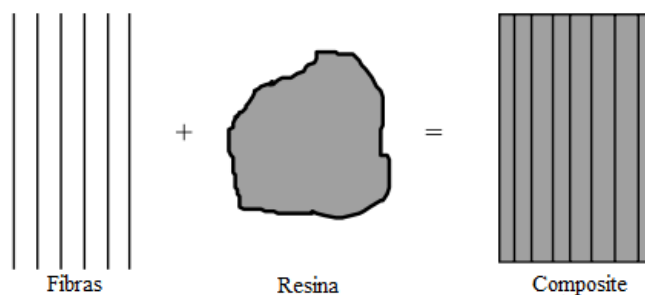


Figura 1. Estructura de un material compuesto [31]

Los materiales compuestos son diseñados para presentar múltiples propiedades específicas demandadas y que constituyen la gran parte de materiales ingenieriles, las cuales, se obtienen a través de la selección de sus componentes, proporción másica o volumétrica, morfología, grado de cristalinidad, estructura cristalográfica, etc. [4].

3.2.1.1 Matriz

En un composite la fase continua (matriz), esencialmente soporta la fase dispersa (refuerzo) y confiere continuidad y consistencia a la estructura compuesta. Entre las funciones importantes de una matriz se mencionan las siguientes [31]:

- Unir las fibras y transferirles la carga. Además, proporciona rigidez y forma a la estructura.
- Separar las fibras para que cada una de ellas pueda actuar de forma independiente, de esta forma se detiene o reduce la propagación de una fisura (grieta).

- Conferir una elevada calidad de acabado superficial y facilitar la producción de piezas con forma.
- En función de la matriz seleccionada, las características de comportamiento influyen en propiedades como: ductilidad, resistencia al impacto, etc. Una matriz dúctil aumentará la tenacidad de la estructura. Para requerimientos de tenacidad elevados, se seleccionan matrices termoplásticas.
- Garantizar la protección de las fibras de refuerzo contra ataques químicos y daños mecánicos (desgaste).

Los tipos de matriz en los composites se agrupan en tres tipos: metálicas, cerámicas y poliméricas

3.2.1.1 Refuerzo

Las funciones principales de la fase discontinua en un material compuesto son [31]:

- Soportar la carga. En un compuesto estructural, entre el 70 y 90 % de la carga la soporta las fibras.
- Proporcionar rigidez, tenacidad, estabilidad térmica y otras propiedades únicas estructurales a los materiales compuestos.
- Proporcionar conductividad eléctrica o aislamiento, según el tipo de fibra que se utilice.

Existen tres tipos de refuerzo: partículas, fibras y elementos estructurales. A continuación, se enuncian sus características y aplicaciones.

Partículas: pueden ser partículas grandes y partículas consolidadas por dispersión. Los composites reforzados con partículas grandes, no presenta una eficiente interacción matriz-partículas y no alcanzar mejoras sustanciales en el comportamiento mecánico. Sin embargo, este tipo de refuerzo son usados para incorporar funcionalidades múltiples en materiales, tal como: el concreto, el cermet, etc. Las partículas consolidadas por dispersión poseen diámetros entre 10 y 100 nm y sus interacciones matriz-partículas suceden a nivel atómico o molecular [32]. La principal relevancia de reforzar materiales compuestos con partículas es el bajo coste y su facilidad de producción y conformado en comparación con los reforzados con fibras [33]. En la Figura 2, se observa una matriz reforzada con material particulado.

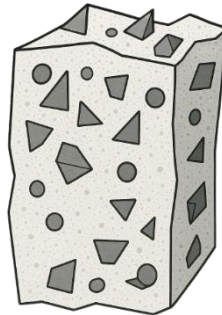


Figura 2. Matriz reforzada con partículas [2]

Fibras: pueden ser asociadas en tres grupos: whiskers, fibras y alambres. Los whiskers son finos monocristales que poseen una alta relación longitud/diámetro y por su tamaño tienen un elevado grado de perfección cristalina (libres de defectos), lo cual describe sus resistencias altas, pero son refuerzos muy costosos. Las fibras son materiales policristalinos o amorfos caracterizados por poseer diámetros pequeños y grandes longitudes. Comúnmente, los materiales son poliméricos o cerámicos (aramidas, fibra de vidrio, fibra de carbono, boro, óxido de aluminio y carburo de silicio). Además, se consideran a las fibras naturales (sisal, bambú, coco, kenaf, algodón, lino etc.), las cuales permiten reducir los costos de manufactura e impacto ambiental. Los alambres (acero, molibdeno y tungsteno) poseen diámetros moderadamente grandes y se emplean como refuerzos radiales en las llantas de los vehículos [32]. La clasificación de las fibras se visualiza en la Figura 3.

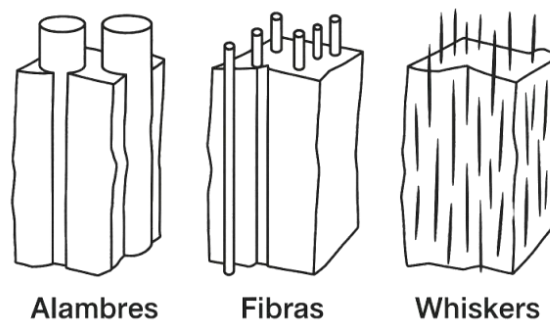


Figura 3. Tipos de fibras [2]

Elementos estructurales: son materiales que se caracterizan porque sus propiedades están condicionadas por la geometría de los elementos estructurales que lo constituyen. Existen dos tipos de compuestos: laminares y tipo sánduche. Un compuesto laminar se encuentra constituido por laminas con una orientación predominante de alta resistencia. Las capas son apiladas y consecutivamente

consolidadas de tal forma que la que la orientación predominante del refuerzo en cada capa varíe de una lámina a otra, produciendo un composite laminado de alta resistencia en dos dimensiones. Mientras que, los materiales compuestos de tipo sánduche poseen delgadas capas del material de revestimiento ligadas a un material liviano de relleno (espumas de polímeros) [4]. Las estructuras de un compuesto laminar y de tipo sánduche se visualizan en la Figura 4, respectivamente.

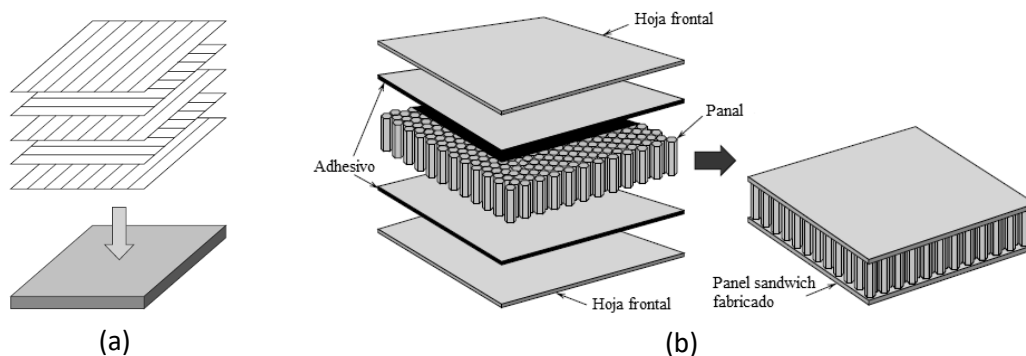


Figura 4. Estructura de un material compuesto: laminar (a) y tipo sánduche (b) [32]

3.2.2 Carrizo

El carrizo (*Phragmites Australis*) es una caña perenne y de rápida tasa de crecimiento perteneciente a la especie Poaceae. Y, denominado como: junco común o caña gigante. Crece a partir de tallos subterráneos y puede alcanzar una altura entre 1 a 6 m y 2 cm de diámetro. Posee hojas anchas y puntiagudas con dimensiones de (15 - 60 cm) largo y (1 - 6 cm) ancho, y densas, esponjosas, grises o moradas cabezuelas de flores de 15 a 40 cm [34]. La composición química del carrizo (% en peso) reportada en varias investigaciones es: hemicelulosa (14.5 – 32 %), celulosa (29.2 – 43.1 %), lignina (19.2 – 24.3 %), cenizas (4.2 – 6.1 %) y extracto (9.3 %) [35], [36]. En la Figura 5, se presentan las principales características del carrizo común.



Figura 5. Carrizo común (*Phragmites Australis*) [37]

La composición química de las fibras lignocelulósicas está determinada por su procedencia, edad de la planta y entorno climático. Sin embargo, de manera general se ha determinado que la proporción entre la celulosa, hemicelulosas y lignina es aproximadamente de 4:3:3. El contenido y composición de los componentes en las fibras vegetales permite deducir su comportamiento al ser expuestas a diversas aplicaciones industriales [4]. La composición química de las fibras más empleadas en investigaciones e industrias se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Composición química de fibras naturales [38]

Fibra	Celulosa (% peso)	Hemicelulosa (% peso)	Lignina (% peso)	Ceras (% peso)
Abacá	56 – 63	20 - 25	7 - 9	3
Coco	32 - 43	0.15 - 0.25	40 - 45	-
Algodón	85 - 90	5.7	-	0.6
Lino	71	18-6 – 20.6	2.2	1.5
Yute	61 - 71	14 - 20	12 - 13	0.5
Kenaf	68	15	10	0.8
Bambú	26 - 43	30	21 - 31	-
Piña	81	-	12.7	-
Sisal	65	12	9.9	2
Ramio	68.6 – 76.2	13 - 16	0.6 – 0.7	0.3

Al igual que la madera, el carrizo está formado por haces de fibras paralelas al eje del tallo. Su cohesión está gobernada principalmente por enlaces secundarios entre estas fibras, que conducen a propiedades mucho más fuertes a lo largo de la dirección axial que en la transversal. En este tipo de planta, la caña tiene un diámetro mayor en la raíz que en la parte superior y está dividida por nudos [39]. La superficie del tallo del carrizo no absorbe agua ni humedad debido a su recubrimiento de silicona. Por lo tanto, permite la difusión del vapor y el aire a través de las paredes [40].

Los prometedores hallazgos han impulsado numerosas investigaciones en la incorporación de fibras lignocelulósicas en áreas como: reducción de pérdida de calor en edificaciones, paneles acústicos, manufactura de tableros MDF [41], [42], [43].

3.2.3 Explosión de vapor

Actualmente, se han investigado diferentes técnicas (físicas, químicas, mecánicas y biológicas) para extraer la fibra natural, las cuales incluso pueden combinarse dependiendo de los requerimientos para su aplicación industrial. Las fibras naturales producen compuestos con altas relaciones resistencia-peso en función de las mejores propiedades de cada componente. Los investigadores han encontrado productos industriales sostenibles de alta calidad que se pueden generar a partir de materias primas como por ejemplo las fibras de bambú.

Los dos tipos de procesamiento empleados para obtener fibras naturales son: el procesamiento mecánico y el químico, ambos requieren previamente la división de las tiras de fibra, y generalmente se controlan mediante procesos mecánicos o químicos. El proceso químico implica la obtención de fibras de celulosa mediante hidrólisis alcalina (NaOH) antes de que se realice un blanqueo multifásico al pasar las fibras de celulosa tratadas con álcali a través CS_2 . Este proceso es el procedimiento que requiere menos tiempo para obtener fibras naturales y es utilizado por la mayoría de las industrias. Mientras que, el proceso mecánico se complementa con un tratamiento enzimático de la materia prima previamente triturada la cual produce una masa esponjosa, y las fibras individuales se extraen con la ayuda de un peine mecánico. Aunque el proceso es menos económico en

comparación con el proceso químico, presenta un menor impacto ambiental [44], [45].

El proceso de explosión por vapor puede descomponerse en cuatro etapas (Figura 6). En la primera etapa, la biomasa de alimentación se rehidrata mediante inyección de agua. El agua penetra en la biomasa y ablanda su estructura. La segunda etapa corresponde a la de introducción de gas, durante la cual se inyecta vapor saturado en el reactor y el vapor se condensa parcialmente. Sucesivamente, el agua penetra la red porosa de la alimentación mientras incrementa la temperatura y presión del reactor. La etapa 3 es la de calentamiento del gas, en la que la temperatura y la presión aumentan hasta un valor establecido. En esta fase, se alcanza un equilibrio entre la evaporación y la condensación. La etapa 4 es la fase de explosión del vapor, en la que la presión disminuye bruscamente, lo que provoca la intermitencia del agua sobrecalentada y la desintegración de la estructura interna de la biomasa [46].

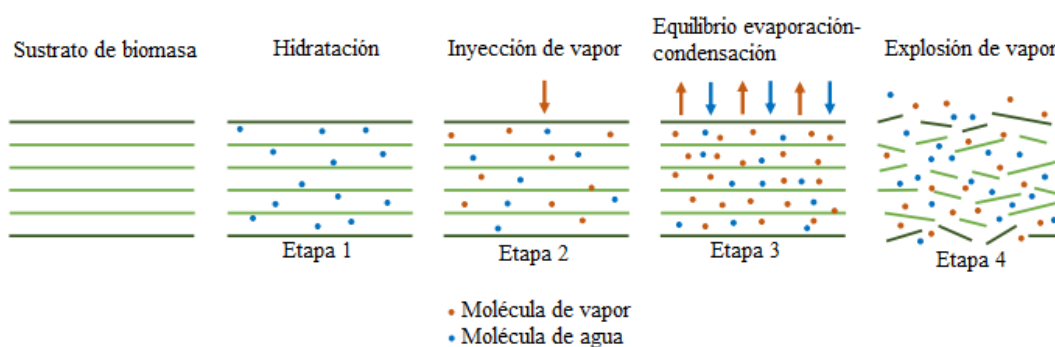


Figura 6. Mecanismo de explosión de vapor [43]

Al presente, la tecnología de explosión de vapor se ha promovido gradualmente desde la escala de laboratorio a la escala industrial, sin embargo, esta producción a mayor escala aún representa un desafío, porque la estructura única de la explosión de vapor limita el tiempo de liberación, lo que reduce el efecto de delaminación en la biomasa [47]. Se considera una tecnología atractiva debido a su bajo consumo de energía y bajo impacto ambiental; sin embargo, todavía hay investigaciones relativamente limitadas para mejorar la eficiencia de extracción de fibras naturales.

3.2.4 Procesos de fabricación de materiales compuestos

La selección del proceso de fabricación de composites es una parte esencial, puesto que, se determina con base en las características técnicas del producto en una aplicación determinada. La fabricación de un composite constituye una parte significativa del costo total del producto, la cual, oscila entre el 50 y 60 % [48]. Comúnmente, los procesos empleados para la fabricación de composites son: extrusión, inyección, moldeo por aspersión, moldeo por compresión y estratificación manual.

3.2.4.1 Extrusión

La alimentación al barril del extrusor de tornillo se lleva a cabo mediante una tolva, en donde la materia prima termoplástica se carga. El tornillo helicoidal localizado en la parte interna del barril permite homogenizar la mezcla y conducirla hacia el dado. Debido a la fricción generada por el movimiento del tornillo incrementa la temperatura hasta fundir los pellets. Una vez fundido el polímero, es forzado mediante un dado adquiriendo la geometría requerida. A continuación, el producto del proceso se enfría mediante exposición a aire a presión o a través de un sistema de circulación de agua [48].

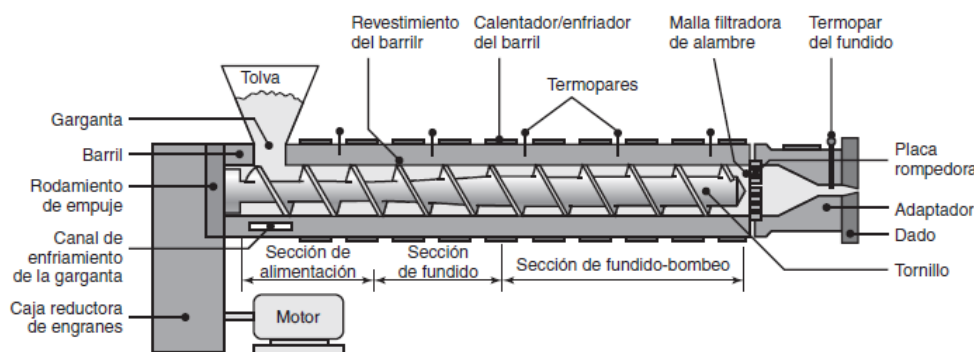


Figura 7. Diagrama de un extrusor de tornillo estándar [48]

3.2.4.2 Inyección

Los pellets ingresan en el cilindro caliente y la fusión se lleva a cabo en el interior del molde mediante un émbolo accionado hidráulicamente o a través de un mecanismo de tornillo rotativo. Actualmente, las máquinas emplean un sistema de tornillo alternativo (Fig. 8b). Se trata de un método de fabricación que se caracteriza por su rapidez y elevado grado de precisión dimensional. Dependiendo

del material y condiciones del proceso, los ciclos operativos se encuentran en un rango de 5 a 60 s [48].

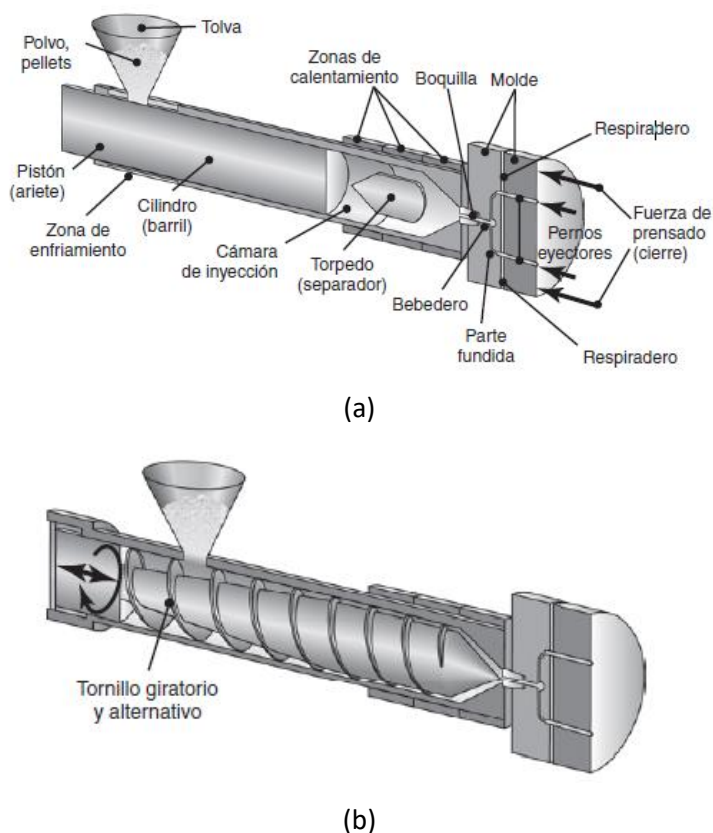


Figura 8. Diagrama del moldeo por inyección con: a) émbolo y b) tornillo giratorio alternativo [48]

3.2.4.3 Moldeo por aspersión

El proceso de moldeo por aspersión se desarrolla mediante el rociado de resina/ fibras fragmentadas sobre la superficie moldeada. Dependiendo el caso, el proceso requiere compactar con un rodillo los materiales depositados con el objetivo de eliminar la fracción volumétrica de poros en el material [48]. El moldeo por aspersión es empleado para la fabricación de piezas en las cuales la resistencia del material no es crítica. Una de las limitaciones del proceso es la complejidad para controlar la fracción volumétrica de la fase reforzante y espesor, lo cual va a depender de las habilidades del operador [4].

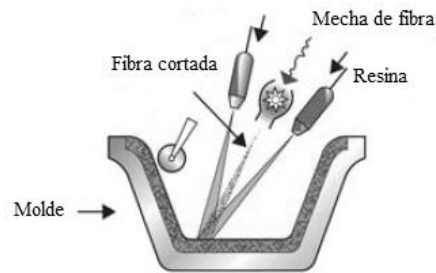


Figura 9. Diagrama de moldeo por aspersión [48]

3.2.4.4 Moldeo por compresión

En dicho proceso, se sitúa la masa preformada del polímero en el interior de una cavidad moldeadora que posee una temperatura mayor o igual a 200 °C. El proceso es empleado con plásticos termofijos, sin embargo, es factible trabajar con termoplásticos. La unión entre moléculas se completa en la matriz caliente. Según la naturaleza del material, forma del componente y espesor; el tiempo de curado oscila entre 0.5 a 5 minutos. Las presiones del proceso se encuentran dentro del rango de 10 a 150 MPa. La rebaba que se forma en el proceso se elimina al recortarlas [48].

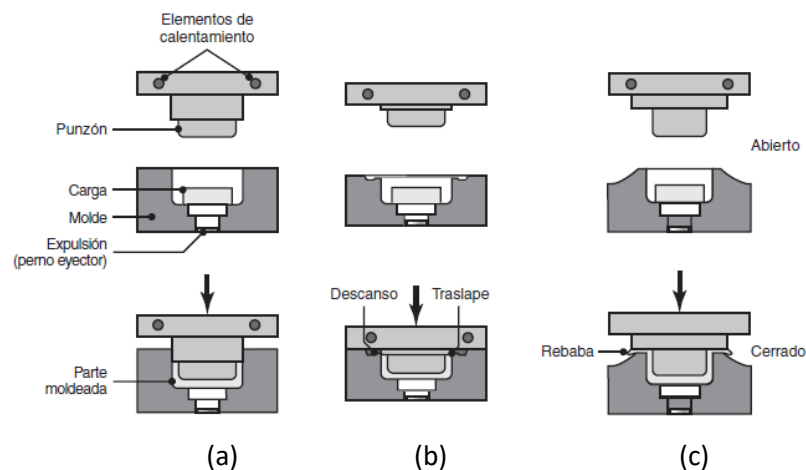


Figura 10. Esquemas de moldeo por compresión: a) positivo b) semipositivo y c) rebaba [48]

3.2.4.4 Estratificación manual

La materia prima (resina y refuerzo) se colocan en la secuencia correcta empleando una brocha y se moldean manualmente con un rodillo. La presión ejercida por el rodillo elimina las burbujas de aire atrapadas y permite compactar la pieza. Los refuerzos dispuestos en el molde pueden presentar distintas formas, lo cual incluye los materiales preimpregnados. Por lo tanto, es factible controlar

su orientación [48]. Un material pre impregnado está constituido de fibras de refuerzo dispuestas en una dirección específica. Generalmente, los preimpregnados de matriz termoplástica son procesados a la temperatura de fusión del polímero [4].

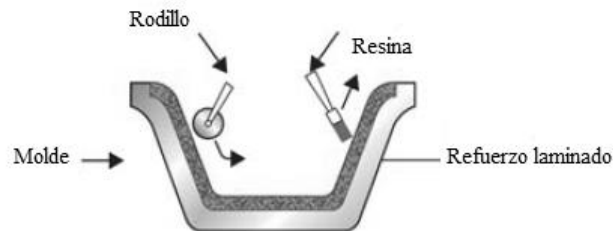


Figura 11. Esquema de estratificación manual [48]

3.2.5 Diagramas de flujo

En Ingeniería, conforme se profundiza el estudio sobre el diseño de un caso base, a través de una secuencia estructurada de diagramas de flujo son un instrumento esencial para la transferencia de información. Y, existen tres tipos de diagramas:

Diagrama de bloques (BFD): en este tipo de esquema se describen los segmentos fundamentales del proceso a través de bloques. Además, se proporciona los balances generales de materia y condiciones operacionales por etapa. Permite sintetizar las principales etapas operacionales y resulta idóneo en fases iniciales del desarrollo de caso base, en las que suelen considerarse procesos alternativos [49].

Diagrama de flujo de procesos (PFD): proporcionan un análisis del proceso con un mayor nivel de detalle, tales como, unidades de procesamiento, flujos y lazos de control. Mediante software de simulación de procesos son elaborados estos tipos de esquemas. Usualmente se preparan PFDs detallados utilizando programas informáticos como AutoCAD y Visio. Las corrientes son enumeradas y se representan mediante líneas y se orientan de izquierda a derecha en la mayoría de casos. Cada flujo debe ser etiquetado con un rombo enumerado. Y, los flujos de alimentación y del producto se identifican por su nombre. Además, es importante mencionar las condiciones operacionales para cada tipo de unidad que se encuentra en el proceso. Y, materiales de construcción, presión y temperatura de funcionamiento.

En la Figura 12. se ilustran los íconos convencionales que se suelen emplear al desarrollar los PFDs [49].

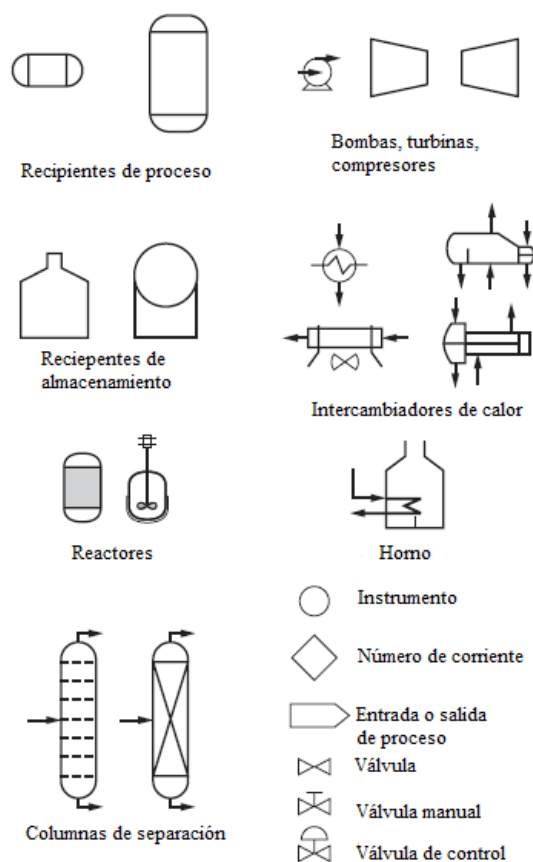


Figura 12. Íconos en un PFD [49]

Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID): es el documento técnico suministrado por el departamento encargado del diseño del proceso al departamento responsable de la construcción de la planta. Además, se utiliza para apoyar la puesta en marcha, el funcionamiento del proceso y la formación de los operarios. El documento detalla: instrumentos de medición y control (ubicación y tipos), válvulas y materiales seleccionados para las tuberías [49].

4. Materiales y metodología

El enfoque metodológico de la investigación de acuerdo al objetivo establecido requiere de una investigación proyectiva, que se caracteriza por implicar un factor innovador para relacionar elementos y articularlos de forma adecuada a la realidad de un problema, generando una propuesta como posible solución [50]. Y, el presente estudio se enfoca en desarrollar experimentalmente un composite biodegradable con fibras de carrizo como refuerzo y establecer su proceso de producción a escala de laboratorio.

En la Figura 13, se detallan los diferentes procesos que se llevaron a cabo para alcanzar los objetivos previamente establecidos.

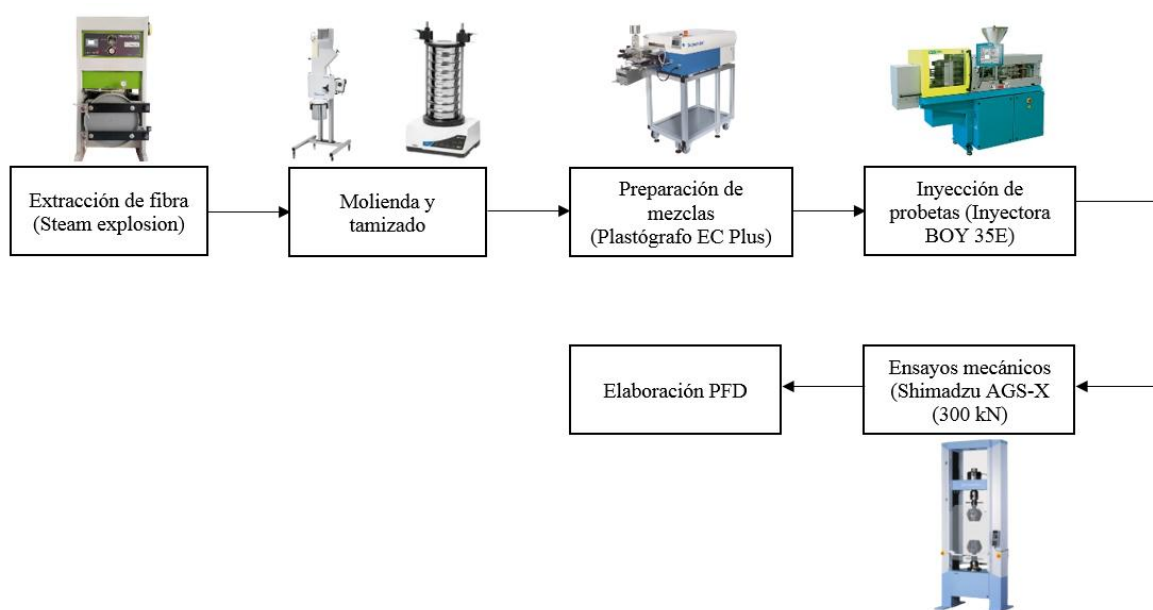


Figura 13. Metodología experimental de la investigación

Los equipos que se emplearon para la obtención de la fibra procedente del carrizo, preparación de mezclas y evaluación de propiedades mecánicas de los composites FC/PLA/BP-1 (Fibra de carrizo/Ácido poliláctico/Agente de acople) se detallan en la Tabla 2, los mismos que; se encuentran localizados en los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.

Tabla 2. Equipos

Equipos	Marca	Modelo
Steam explosion ESE-01	ELECON	
Plastógrafo	Brabender®	EC Plus W-50 EHT
Estufa	Memmert	UN 110
Inyectora	BOY 35E	350 kN
Trituradora de plásticos	C.W. Brabender Instruments, Inc.	
Máquinas de ensayos	Shimadzu	AGS-X (300kN)
Tamizadora	Retsch	AS 200
Balanza analítica	Mettler Toledo	NewClassic ML
Molino de corte	Retsch	SM 100

4.1 Materiales

4.1.1 PLA (Matriz)

El polímero considerado como matriz fue el Luminy® PLA LX175, con especificaciones: 1.24 g/cm³ (densidad), 155 y 60 °C (temperatura de fusión y transición vítrea) y 3500 MPa y 45 MPa (módulo de tracción y resistencia) [51].

4.1.2 BP-1 (Agente de acople)

El agente de acople que se utilizó para incrementar la compatibilidad entre la matriz termoplástica (PLA) y fase reforzante (FC) es un poli (cotereftalato de butileno adipato) modificado con anhídrido injertado (BP-1), adquirido de la empresa Coace Chemical Company Limited. La densidad del BP-1 es de 1.21 g/cm³, posee un color blanco o amarillo claro, su presentación es en forma granular y el contenido de anhídrido maleico (% en peso) es ≥ 0.8 . El presente acople permite incrementar la compatibilidad con múltiples polímeros biodegradables y una excelente adhesión entre matriz y refuerzo.

4.1.3 Fibra de carrizo (Refuerzo)

El carrizo se obtuvo en los mercados comerciales de la ciudad de Cuenca y posteriormente fue acondicionado para la extracción de su fibra. En la investigación

se empleó la explosión de vapor (*steam explosion*), utilizada para la obtención de fibra de bambú de alta resistencia, la cual, permite la separación eficiente de la lignina y separando de esta manera la celulosa empelada como elemento de refuerzo en composites verdes [52]. Dicha técnica puede ser empleada en la investigación, puesto que, el carrizo es una variedad que forma parte del bambú [34].

4.2 Definición de condiciones iniciales para la extracción de fibra

4.2.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad (MC) del carrizo se analizó conforme al método A de la norma ASTM 4442-20 (Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials) y se calculó mediante la Ecuación (1) [53]. Este parámetro es fundamental para establecer el volumen de agua que se debe suministrar al reactor de explosión de vapor.

$$MC (\%) = \frac{A - B}{B} \times 100 \quad (1)$$

Donde:

A = Masa inicial, [g]

B = Masa seca, [g]

4.2.2 Acondicionamiento del carrizo

Una vez que se obtiene la materia prima, se desprendió la corteza que recubre los entrenudos y las hojas de la planta. Posteriormente, el carrizo se redujo de tamaño obteniendo chips de dimensiones (1.5 x 4.5 cm), a fin de mejorar el procedimiento de obtención de fibra lignocelulósica (Fig. 14). Es importante, descartar los chips que posean marcas de hongos (moho).



Figura 14. Chips de carrizo

4.2.3 Factor de severidad

El factor de severidad (FS) es un término común que describe los efectos sinérgicos de temperatura, pH y tiempo de reacción. La ecuación está fundamentada en una cinética de primer orden que obedece a la ley de Arrhenius [46]. El factor de severidad fue propuesto por Overend y Chornet en 1987 y se lo calcula mediante la Ecuación (2) [54]. Al utilizar un valor preciso permite una eficaz extracción de fibra de la materia prima, para el presente estudio se estableció un valor de FS = 3.3.

$$\log FS = \int_0^t \exp\left(\frac{T(t) - 100}{14.75}\right) dt \quad (2)$$

Donde:

t = tiempo de residencia [min], expresado como cociente entre el volumen del reactor y el caudal de alimentación.

T = temperatura [°C], relacionada con el tiempo de permanencia durante el periodo de calentamiento.

4.3 Extracción de fibra

La explosión de vapor es una tecnología atractiva debido a su bajo consumo de energía, sin embargo, todavía hay investigaciones relativamente limitadas para mejorar la eficiencia de extracción de fibra de carrizo. Zhao et al. en su investigación realiza la explosión de vapor con 500 g de muestra de bambú a una presión de 2 MPa durante 4 min, posteriormente las fibras se recogen, se lavan en agua y luego se secan a 60 °C durante 24 h [55].

En la investigación, se utilizaron 300 g de muestra, 3 L de agua y un factor de severidad de 3.3 en el reactor de explosión de vapor. La fibra fue extraída mediante un tamiz, lavada con agua, colocada en un recipiente de aluminio y se introdujo en una estufa durante 24 h a una temperatura de 103 °C.



Figura 15. Fibra de carrizo extraída mediante explosión de vapor

En la Figura 16, se presenta al equipo de explosión de vapor empleado para la investigación, disponible en el laboratorio PG Wood de la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.



Figura 16. Equipo de steam explosion ESE-01

4.4 Molienda y tamizado

La fibra extraída se procesó en un molino de corte SM 100 - Retsch empleando la malla N° 4. Posteriormente, se preparó el juego de tamices de la tamizadora analítica en orden ascendente: base, N° 100, N° 60, N° 40, N° 30, N° 20 y N° 10, se encendió la máquina durante 10 min y se registró la masa retenida en cada tamiz,

respectivamente.



Figura 17. Fibra de carrizo molida

En el desarrollo del material compuesto se utilizó la fibra retenida en los tamices N° 100 y N° 60, con un tamaño de partícula que oscila entre (149 – 250 μm). El tamizado se repitió 3 veces, con el objetivo de recuperar la mayor cantidad de fibra en los tamices de interés y se calculó el rendimiento mediante la Ecuación (3).

$$\text{Rendimiento (\%)} = \frac{m_{N^{\circ}60} + m_{N^{\circ}100}}{m_{\text{carrizo}}} \times 100 \quad (3)$$

Donde:

m_{carrizo} = Masa inicial del carrizo, [g]

$m_{N^{\circ}60}$ = Masa retenida en la malla N° 60, [g]

$m_{N^{\circ}100}$ = Masa retenida en la malla N° 100, [g]

4.5 Diseño central compuesto rotacional

Los compuestos FC/PLA/BP-1 se prepararon empleando un diseño central compuesto rotacional con 2 factores y 5 niveles, el cual, permite analizar relaciones no lineales y optimizar la resistencia a la flexión y tracción del composite biodegradable. El presente diseño experimental incorpora puntos factoriales, axiales y centrales que permiten evaluar la curvatura y mejorar la precisión del modelo. Los puntos factoriales analizan las interacciones de los niveles extremos de los factores. Mientras que, los puntos axiales estudian puntos más alejados de los niveles factoriales, los cuales están establecidos por un valor alfa para evaluar la curvatura del modelo. Y, los puntos centrales permiten medir la variabilidad del experimento y calibrar el modelo [56].

En la Tabla 3, se especifican los puntos, factores y niveles que se analizarán en la investigación, siendo nuestra variable de interés la resistencia a la flexión y tracción del material compuesto.

Tabla 3. Factores y niveles de estudio de la investigación

Orden corrida	FC %(p/p)	BP-1 %(p/p)	PLA %(p/p)
1	20	5	75
2	20	10	70
3	40	5	55
4	40	10	50
5	15.86	7.5	76.64
6	44.14	7.5	48.36
7	30	3.54	66.46
8	30	11.46	58.54
9	30	7.5	62.5
10	30	7.5	62.5
11	30	7.5	62.5

4.6 Preparación de compuestos FC/PLA/BP-1

Las mezclas de los composites se prepararon en el equipo *Brabender Plastograph EC Plus*, a 160 °C y 50 rpm. El equipo posee una limitante, puesto que, permite preparar mezclas hasta 40 g, por lo tanto, se realizaron 9 réplicas obteniendo 360 g del composite. En la Tabla 4, se determinó la cantidad de masa requerida de cada componente para la obtención de 40 g de mezcla.

Tabla 4. Masa de los componentes de la mezcla

Orden corrida	FC [g]	BP-1 [g]	PLA [g]
1	8	2	30
2	8	4	28
3	16	2	22
4	16	4	20
5	6.344	3	30.656
6	17.656	3	19.344

Orden corrida	FC [g]	BP-1 [g]	PLA [g]
7	12	1.416	26.584
8	12	4.584	23.416
9	12	3	25
10	12	3	25
11	12	3	25

4.7 Obtención de probetas

Las probetas de los composites se obtuvieron mediante un proceso de inyección en la inyectora BOY 35E. La calibración de la inyectora es esencial para la obtención de probetas idóneas para la fase de análisis de propiedades mecánicas. El tiempo de ciclo sugerido es de 74 s y un tiempo de enfriamiento de 55 s. Las medidas nominales de las probetas fueron: 80 mm (largo), 10 mm \pm 1 % (ancho) y 4 mm \pm 4 % (espesor) (Fig. 18).



Figura 18. Probetas

Las condiciones operacionales para las fases de la etapa de inyección se especifican en la Tabla 5.

Tabla 5. Condiciones operacionales para las fases y zonas de inyección

<i>Fase de llenado</i>								
Zonas	7	6	5	4	3	2	1	0
Distancia [mm]	5		30		50			83
Velocidad del tornillo [mm/s]	25		30		50			50
Presión [bar]	80		100					
<i>Fase de presión fijada</i>								
Tiempo [s]	9			2.5				0

Presión [bar]	65	50	0					
<i>Fase de plastificación</i>								
Zonas	0	1	2	3	4	5	6	7
Distancia [mm]	0	1	20					82.5
Velocidad de rotación [rpm]	80	80	120					120
Presión [bar]	15	15	10					0
<i>Zonas de calefacción</i>								
Zonas		1	2	3	4	5		
Temperatura [°C]		182	184	186	188	190		
ΔT [\pm °C]		10	10	10	10	10		

4.8 Ensayos mecánicos de los materiales compuestos

Los ensayos de tracción y flexión de los composites de FC/PLA se desarrollaron mediante una máquina universal de ensayos de la marca Shimadzu modelo AGS – X (300 kN), de acuerdo con las normas ASTM D638 y ASTM D790. El ensayo de tracción se ejecutó fijando la longitud de la galga y la velocidad de la cruceta en 61.8 mm y 5 mm/min, respectivamente [57].

Mientras que, el ensayo de flexión se efectuó mediante el procedimiento A (flexión en tres puntos), con una velocidad fijada en 1.6 mm/min y una longitud del soporte de 32 mm [58].

4.9 Diagrama de flujo de procesos (PFD)

Se desarrolló el PFD, una vez que se analizan las propiedades mecánicas de las diferentes formulaciones de los materiales compuestos y se elige el material FC/PLA/BP-1 con potenciales aplicaciones industriales. Se elaboró un PDF para desarrollar materiales compuestos a escala de laboratorio, el mismo que será de relevancia para investigaciones futuras y el desarrollo de nuevos materiales reforzados con fibras.

Con base en la información recopilada experimentalmente se desarrollaron los balances de masa en las diferentes operaciones unitarias que se requieren para la obtención del composite biodegradable. El PFD fue desarrollado en AutoCAD,

utilizando la nomenclatura U-XYX para identificar a los equipos, donde U es una letra exclusiva asignada al tipo de unidad. X es un único número que señala el área del proceso donde la unidad se encuentra instalada y “Y” son dos dígitos que denotan a la unidad en sí. En la Tabla 6, se presenta el sistema de nomenclatura aplicado para la identificación de las unidades (equipos) en el proceso de síntesis del composite.

En el desarrollo del PFD a escala de laboratorio, se establecen 3 secciones importantes, en la sección 1 se extrae la fibra de carrizo mediante explosión de vapor, mientras que en la sección 2 se obtiene el compuesto PLA/BP-1 peletizado y finalmente en la sección 3 se produce el composite biodegradable FC/PLA/BP-1.

Tabla 6. Nomenclatura de los equipos del proceso

Equipo	Código
Tolva acoplada con tornillo de alimentación	H-XYX
Reactor de explosión de vapor	R-100
Cyclone	C-100
Secador rotatorio	D-XYX
Molino de corte	M-100
Tamizadora	S-100
Extrusora de doble tornillo co-rotante	E-XYX
Peletizadora	P-XYX
Tanque de enfriamiento	V-XYX
Banda transportadora	B-300

5. Resultados y discusión

5.1 Contenido de humedad del carrizo

En la Tabla 7, se detalla el tiempo de secado para las tres muestras de carrizo analizadas y su masa, respectivamente. La norma ASTM D4442-92 menciona que se ha alcanzado el punto final del procedimiento, cuando la pérdida de masa en un intervalo de 3 h es igual o inferior a dos veces la sensibilidad de equilibrio seleccionada (20 mg) [53]

Tabla 7. Masa de muestras de carrizo y tiempo de secado

Tiempo [h]	Muestra A [g]	Muestra B [g]	Muestra C [g]
0	4.5200	4.0820	4.8110
3	4.0733	3.6966	4.3397
6	4.0502	3.6719	4.3052
9	4.0471	3.6532	4.2953

El contenido de humedad presente en la muestra A de carrizo fue determinado a partir de la Ecuación (1), permitiendo una caracterización precisa de la materia prima.

$$MC = \frac{A - B}{B} \times 100 \%$$
$$MC = \frac{4.5200 - 4.0471}{4.0471} \times 100 \%$$
$$MC = 11.68 \%$$

Mientras tanto, el MC para las muestras B y C son 11.74 y 12.01 %, respectivamente. El contenido de humedad promedio para las muestras analizadas de carrizo es de 11.80 % y será el valor considerado para los cálculos en los balances de masa del proceso de obtención del material compuesto. El valor obtenido experimentalmente es similar al valor del 12 % reportado por Eller *et al.* [34]

5.2 Obtención de fibra de carrizo

La fibra de carrizo extraída a través de un reactor de explosión de vapor se secó a una temperatura de 103 °C durante 24 h. Para su proceso de molienda, es importante reducir su contenido de humedad al 1 %, puesto que obstruye el rotor

del molino. En la Tabla 8, se presenta la masa retenida en cada malla ASTM. Es importante mencionar que con el objetivo de incrementar el rendimiento de obtención de la fibra de carrizo se realizaron tres tamizados. La masa inicial de carrizo que ingresó al equipo de explosión de vapor fue de 300 g y se obtuvo una masa seca de 170.76 g.

Tabla 8. Masa retenida de fibra de carrizo en la tamizadora AS 200

Malla ASTM Nº	Tiempo [min]		
	10		
	Primer tamizado	Segundo tamizado	Tercer tamizado
	Masa retenida [g]	Masa retenida [g]	Masa retenida [g]
10	6.01	0	0
20	10.32	0.87	0.1
30	26.96	2.65	0.33
40	35.03	18.93	0.88
60	44.07	25.59	1.87
100	39.96	16.86	0.91
Base	31.21	18.48	1.22

La fibra que se incorporó en la elaboración del material compuesto es la retenida en las mallas Nº 60 y 100. Y, su rendimiento de extracción fue del 43.08 %, el cual se calculó a partir de la Ecuación (2), siendo un valor promedio reportado en literatura sobre extracción de fibras vegetales.

$$\text{Rendimiento} = \frac{m_{N^{\circ} 60} + m_{N^{\circ} 100}}{m_{\text{carrizo}}} \times 100 \%$$

$$\text{Rendimiento} = \frac{129.26 \text{ g}}{300 \text{ g}} \times 100 \%$$

$$\text{Rendimiento} = 43.08 \%$$

El rendimiento promedio de los procesos de extracción de fibra calculado para cada explosión de vapor fue del 44.01 %, siendo este valor una base de cálculo para los balances de masa en el proceso.

5.3 Preparación de los composites FC/PLA/BP-1

Las once mezclas obtenidas en el plastógrafo se presentan en la Figura 19. Los composites presentan una variación entre café ligeramente claro a oscuro, lo cual se puede inferir que lo adquiere de la tonalidad de la fibra de carrizo y no se identifica una diferencia significativa en el color entre las diferentes corridas. Se identifica experimentalmente que, a mayor cantidad de fibra de carrizo en el composite, la mezcla presenta una baja plastificación (corrida 4 y 6).



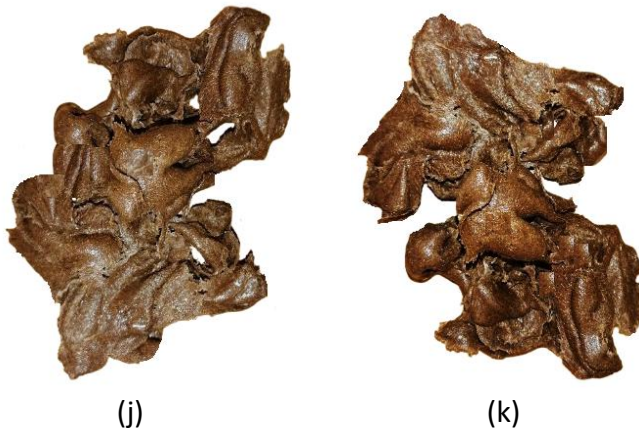


Figura 19. Mezclas FC/PLA/BP-1 (11 corridas)

Una vez que se obtienen las diferentes mezclas, fueron peletizadas empleando un triturador de plásticos no observándose una diferencia significativa en el color de los pellets entre las corridas experimentales, como se visualiza en la Figura 20.

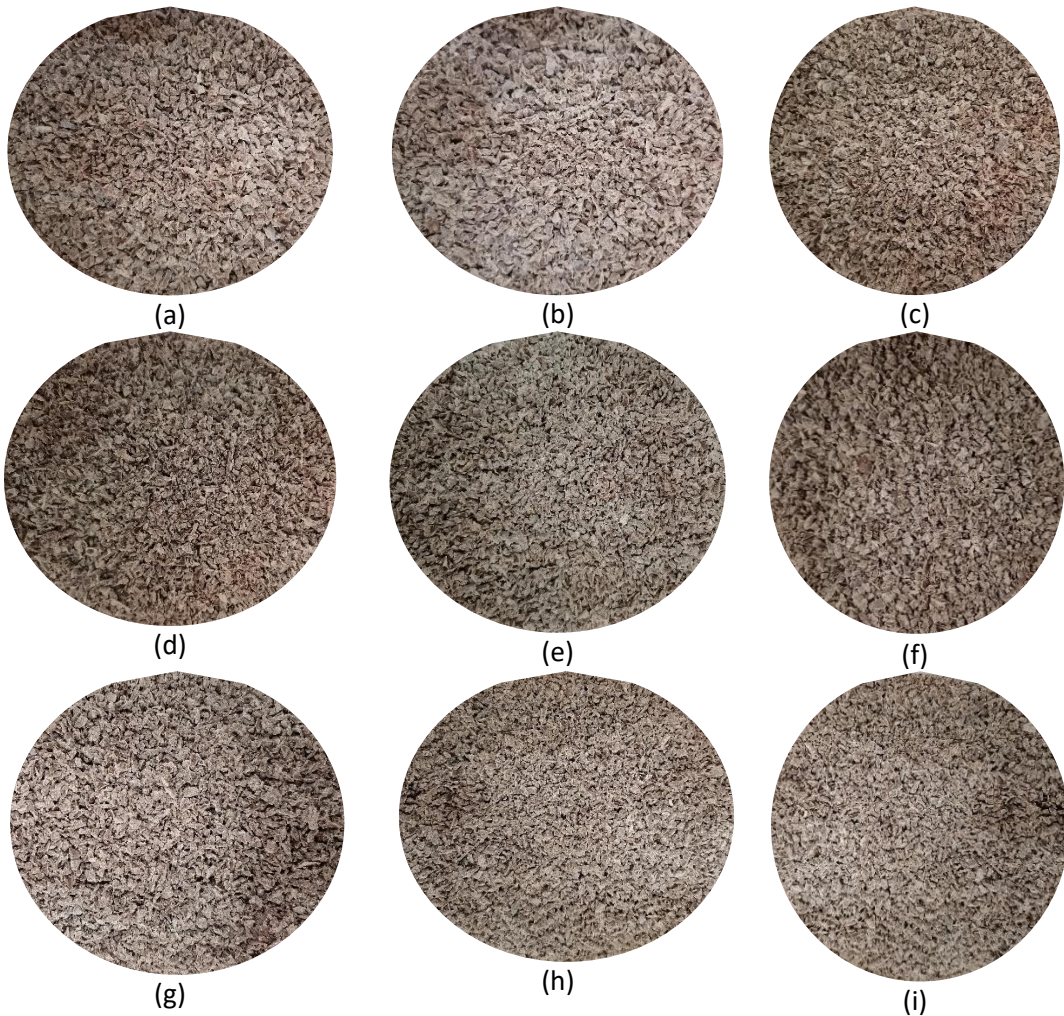




Figura 20. Pellets FC/PLA/BP-1 (11 corridas)

5.4 Ensayo de tracción

Las características de tracción de los compuestos están determinadas por el porcentaje de carga de fibra, el estado de dispersión, la estructura de la fibra, los grupos funcionales disponibles y la unión fibra/matriz [59]. Los valores promedios del esfuerzo máximo a tracción de las 11 corridas experimentales se detallan en la Tabla 9. Los datos demuestran variaciones significativas, los cuales oscilan entre 44.2 y 50.3 MPa. El valor de resistencia a la tracción de la matriz termoplástica fue de 45 MPa.

Tabla 9. Esfuerzo máximo a tracción de las corridas experimentales

Corrida	FC %(p/p) (A)	BP-1 %(p/p) (B)	PLA %(p/p)	Esfuerzo máximo [MPa]
5	15.86	7.50	76.64	44.20
1	20.00	5.00	75.00	46.43
2	20.00	10.00	70.00	50.00
7	30.00	3.54	66.46	46.10
9	30.00	7.50	62.50	47.70
10	30.00	7.50	62.50	47.70
11	30.00	7.50	62.50	47.70
8	30.00	11.46	58.54	50.30
3	40.00	5.00	55.00	45.30
4	40.00	10.00	50.00	48.16
6	44.14	7.50	48.36	50.20

Los valores de los ensayos a tracción denotan que mientras se incrementa el porcentaje en peso del agente de acople (BP-1) mejora significativamente la resistencia mecánica a la tracción de los composites. Se identifica que la formulación de la corrida 8 (30 %FC, 11.46 %BP-1 y 58.54 %PLA) permite obtener un material compuesto con una resistencia a la tracción de 50.3 MPa, lo cual representa un incremento del 11.78 % en relación al valor del PLA puro. Esta mejora en la propiedad mecánica denota una unión interfacial fuerte entre el refuerzo, BP-1 y la matriz termoplástica.

5.5 Ensayo de flexión

La resistencia a la flexión de un composite se define como la tensión de flexión más alta necesaria para fracturar una probeta cuando se aplica una prueba de flexión de tres puntos [59]. Los valores promedios de resistencia a la flexión demuestran variaciones significativas entre 71.6 y 78.3 MPa (Tabla 10). El valor de resistencia a la flexión del PLA puro fue de 70 MPa. La adición del agente de acople BP-1 permite obtener composites con valores superiores al valor referencial del PLA puro. El composite de la corrida 2 presenta el máximo valor de la investigación 78.3 MPa, exhibiendo una mejora del 11.86 % respecto al valor del PLA puro.

Tabla 10. Esfuerzo máximo a flexión de las corridas experimentales

Corrida	FC %(p/p) (A)	BP-1 %(p/p) (B)	PLA %(p/p)	Esfuerzo máximo [MPa]
5	15.86	7.50	76.64	74.30
1	20.00	5.00	75.00	74.80
2	20.00	10.00	70.00	78.30
7	30.00	3.54	66.46	73.40
9	30.00	7.50	62.50	73.90
10	30.00	7.50	62.50	74.70
11	30.00	7.50	62.50	74.90
8	30.00	11.46	58.54	77.60
3	40.00	5.00	55.00	74.30
4	40.00	10.00	50.00	76.90

Corrida	FC %(p/p) (A)	BP-1 %(p/p) (B)	PLA %(p/p)	Esfuerzo máximo [MPa]
6	44.14	7.50	48.36	71.60

La incorporación del BP-1 en la preparación de los composites permitió solucionar la falta de compatibilidad que usualmente presentan las fibras lignocelulósicas y las matrices poliméricas, siendo un importante hallazgo para la investigación.

Las corridas 9, 10 y 11 son réplicas en la presente investigación, sin embargo, presentan diferentes valores a la resistencia a la flexión lo cual puede atribuirse a errores sistemáticos durante la etapa de preparación de las mezclas o una variabilidad en el proceso de ensayo.

5.6 Análisis estadístico de los ensayos mecánicos

5.6.1 Esfuerzo máximo a tracción

El análisis de varianza para evaluar el modelo de regresión correspondiente al esfuerzo máximo a tracción se detalla en la Tabla 11. De acuerdo con los resultados el contenido en peso del BP-1 es estadísticamente significativo ($p = 0.0388$), influyendo directamente en la variable de respuesta. Por el contrario, la variable A no presenta un efecto significativo ($p = 0.3230$) al igual que los efectos cuadráticos A^2 ($p = 0.7729$) y B^2 ($p = 0.9633$), y la interacción entre ambas variables (AB) ($p = 0.8536$). El modelo podría simplificarse excluyendo los términos no significativos, considerando principalmente el efecto lineal de BP-1.

Tabla 11. ANOVA esfuerzo máximo a tracción

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Fibra de carrizo	3.8994	1	3.8994	1.20	0.3230
B: BP-1	25.1284	1	25.1284	7.74	0.0388
AA	0.3012	1	0.3012	0.09	0.7729
AB	0.1225	1	0.1225	0.04	0.8536
BB	0.0075	1	0.0075	0.00	0.9633
Error total	16.2264	5	3.2452		

Total (corr.)	45.6891	10
---------------	---------	----

El estadístico R^2 evidencia que el modelo ajustado explica el 64.48 % de la variabilidad de los datos en el ensayo mecánico. Mientras que, el estadístico R^2 ajustado es del 28.97 %. En la superficie de respuesta de la Figura 21, se identifica que el esfuerzo máximo a tracción incrementa significativamente con mayores niveles de BP-1, alcanzando su máximo valor cerca del nivel 11.04 %(p/p). La influencia del contenido de fibra de carrizo es ligera y no es significativa estadísticamente en el rango estudiado. Además, no se observa una curvatura fuerte ni interacción relevante entre A y B.

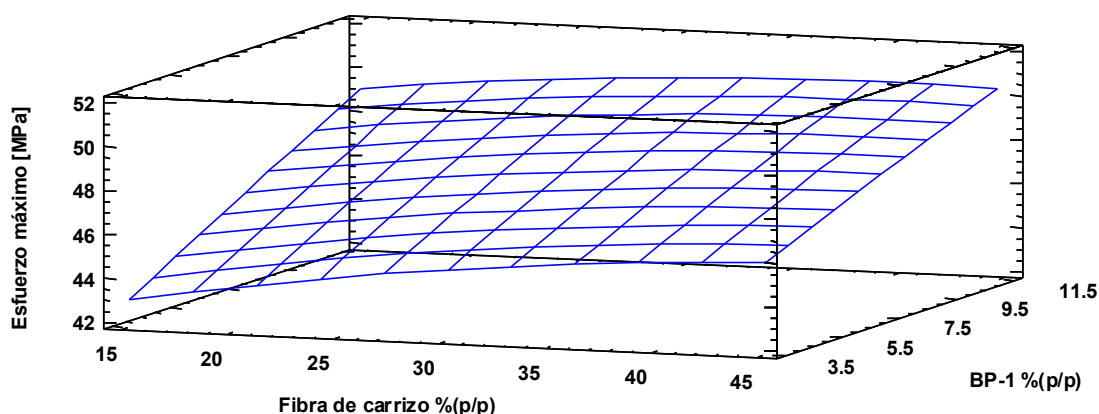


Figura 21. Superficie de respuesta - esfuerzo máximo a tracción

La superficie de respuesta (Fig. 21) muestra un claro óptimo local hacia niveles altos de BP-1 entre 10 –11.5 %(p/p) y contenido de fibra de carrizo medio o bajo alrededor del 30 %(p/p).

5.6.2 Esfuerzo máximo a flexión

El ANOVA para evaluar el modelo de regresión del esfuerzo máximo a flexión se presenta en la Tabla 12. De acuerdo con los resultados el contenido en peso del BP-1 es estadísticamente significativo ($p = 0.0271$), influyendo directamente en la variable de respuesta. Por el contrario, la variable A no presenta un efecto significativo ($p = 0.2009$) al igual que los efectos cuadráticos A^2 ($p = 0.6153$) y B^2 ($p = 0.2170$), y la interacción entre ambas variables (AB) ($p = 0.7564$) de igual

manera no fue significativa. El modelo podría simplificarse excluyendo los términos no significativos, considerando principalmente el efecto de BP-1.

Tabla 12. ANOVA esfuerzo máximo a flexión

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
A: Fibra de carrizo	4.0874	1	4.0874	2.17	0.2009
B: BP-1	18.0341	1	18.034	9.57	0.0271
AA	0.5403	1	0.5403	0.29	0.6153
AB	0.2025	1	0.2025	0.11	0.7564
BB	3.7591	1	3.7591	1.99	0.2170
Error total	9.4257	5	1.8851		
Total (corr.)	37.7018	10			

El estadístico R^2 indica que el modelo ajustado explica el 74.99 % de la variabilidad de los datos en el esfuerzo máximo a la tracción. Mientras que, el estadístico R^2 ajustado es del 49.99 %. Se observa en la superficie de respuesta (Fig. 22) que el esfuerzo máximo a flexión incrementa significativamente al incrementar el contenido en peso del BP-1. La influencia del contenido de fibra de carrizo no presenta un efecto significativamente relevante en el modelo, sin embargo, presenta un coeficiente negativo. Además, no se observan interacciones ni curvaturas fuertes importantes entre A y B.

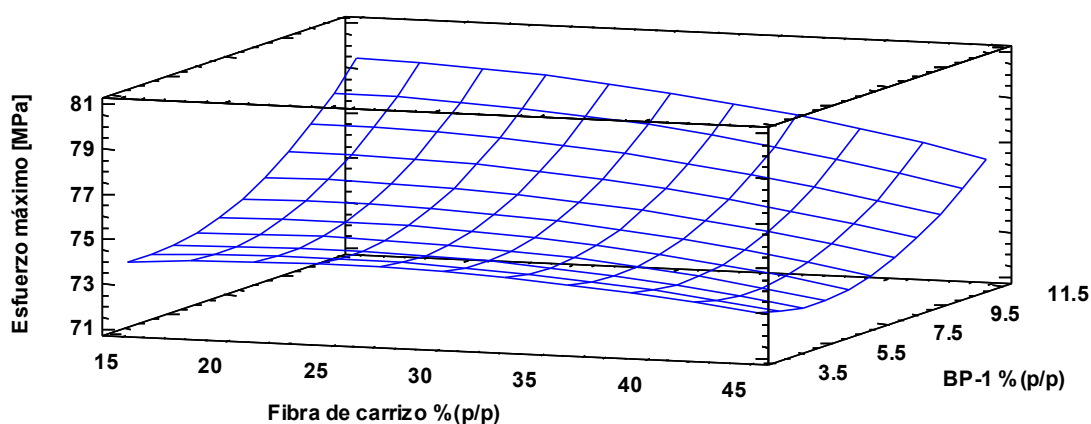


Figura 22. Superficie de respuesta - esfuerzo máximo a flexión

La superficie de respuesta (Fig. 22) permite identificar que la formulación óptima para maximizar el esfuerzo a flexión de los composites varía entre: BP-1 [10 – 11.5 % (p/p)], fibra de carrizo [20 – 30 % (p/p)] y PLA [70 – 58.5 % (p/p)].

Considerando que el objetivo de la investigación es obtener un composite con excelentes propiedades mecánicas (esfuerzo máximo a tracción y flexión) y minimizar los costos de la materia prima para la línea de producción, se establece como base de cálculo la formulación de la corrida 8 (30 %FC + 11.5 %BP-1 + 58.5 %PLA).

5.7 PFD

5.7.1 Definición del producto

Para el desarrollo del proceso a escala de laboratorio del material compuesto biodegradable reforzado con fibra de carrizo se calculó una producción de 2.5 kg/h y su composición se especifica en la Tabla 13.

Tabla 13. Composición de los componentes del composite FC/BP-1/PLA

Material	Porcentaje [%]
Fibra de carrizo (149 – 250 μ m)	30
BP-1 (Agente de acople)	11.5
Ácido poliláctico (PLA)	58.5

5.7.2 Descripción del proceso

La línea de producción de un composite biodegradable a escala de laboratorio con fibras de carrizo como refuerzo, operará de manera continua. Para el cual, se establecen las siguientes condiciones de operación:

- La humedad del carrizo es del 11.80 % por lo que se requiere una etapa de secado para reducir el contenido de humedad al 1 %.
- La temperatura máxima en las extrusora E-300 debe ser de 170 °C para conservar la integridad estructural de la fibra de carrizo.

- En la extrusora E-300 ingresa inicialmente la corriente PLA/BP-1 y posteriormente se dosifica la fibra de carrizo, con el objetivo de lograr una alta compatibilidad interfacial entre matriz, refuerzo y agente de acople.
- Al equipo de explosión de vapor (R-100) la corriente de vapor debe ingresar a 151.7 °C para alcanzar un factor de severidad de 3.3.
- Los secadores rotativos se emplean para evitar que las corrientes de las materias primas absorban humedad durante el proceso.

La alimentación fresca de carrizo se almacena en la tolva H-100 y será transportada al reactor de explosión de vapor R-100. Al reactor ingresan dos corrientes: carrizo y vapor. El factor de severidad del reactor será configurado en un valor de 3.3 y controlado mediante el software del equipo. Una vez que se produce la explosión de vapor, la corriente 4 ingresa a un ciclón que permite la separación de fases vapor/sólido (biomasa). La corriente de la biomasa se almacena en un tanque V-100 y se alimenta la fase sólida al secador rotativo D-100. La corriente 9 resultante del proceso de secado ingresa a la tolva H-101, para posteriormente ser procesada en un molino de corte M-100. La fibra de carrizo que se obtiene del M-100 ingresa una tamizadora vibratoria de la cual se obtiene dos corrientes: fibra de carrizo (larga) y fibra de carrizo (corta). La corriente 12 perteneciente a la fibra de carrizo corta es suministrada al secador D-101 y almacenada en la tolva H-102 (corriente 14). La corriente de la fibra de carrizo (larga) es un subproducto del proceso, que puede ser almacenado y comercializado a centros de investigación.

De forma paralela, en la extrusora E-200 se desarrolla la segunda parte del proceso, en la cual se alimenta las corrientes de los polímeros BP-1 y PLA almacenados en las tolvas H-200 y H-201, respectivamente. Ambas corrientes se transportarán por husillos corrotantes para su proceso de mezclado y fundición, obteniéndose filamentos extruidos de la mezcla PLA/BP-1, los cuales ingresan a un tanque de enfriamiento V-200. Posteriormente, se elimina la humedad de la corriente mediante un secador rotativo D-200, se almacena en la tolva H-202 e ingresa al peletizador P-200. El polímero peletizado (PLA/BP-1) se almacena en la tolva H-203 (corriente 21).

En la extrusora E-300 ingresan las corrientes 14 y 21 pertenecientes a la fibra de carrizo corta y los pellets PLA/BP-1; en donde se obtendrán perfiles extruidos tipo filamento. La corriente se someterá a un proceso de enfriamiento en el tanque V-300 y secada en el

equipo D-300. La corriente 24 se almacenará en H-300, para posteriormente ser peletizada en P-300 y transportada mediante una banda B-300 para ser distribuidos en sacos de 5 kg y finalmente ser almacenados para su comercialización. El PFD propuesto para la obtención del composite se presenta en la Figura 23.

En la Tabla 14, se establecen los parámetros críticos y rangos aceptables que requiere la línea de producción del polímero biodegradable. Los mismos que, son establecidos de acuerdo al lote piloto ejecutado experimentalmente y a los resultados prometedores alcanzados en los ensayos mecánicos de las probetas.

Tabla 14. Parámetros críticos del proceso

Parámetro (corriente/equipo)	Valor crítico	Rango
Factor de severidad (R-100)	3.3	3.2 – 3.4
Temperatura de extrusión (E-200 / E-300)	165 °C	150 – 170 °C
Temperatura de secado (D-101 / D-200)	105 °C	100 – 110 °C
Contenido de humedad de la fibra (corriente 13)	1 %	≤ 1.1 %
Contenido de humedad PLA/BP-1 (corriente 15 y 16)	0.1 %	≤ 0.1 %
% fibra de carrizo (E-300)	30 % (p/p)	25 – 35 % (p/p)
% agente de acople (E-300)	11.5 % (p/p)	10 – 12 % (p/p)

5.7.3 Flujos máxicos

Los flujos máxicos requeridos para el proceso de obtención del material biodegradable se especifican en la Tabla 15 y se detallan en el Anexo I. Además, se determina el flujo de agua que se eliminará en el primer secador rotativo (D-100), siendo un factor esencial para permitir un óptimo funcionamiento del molino de corte.

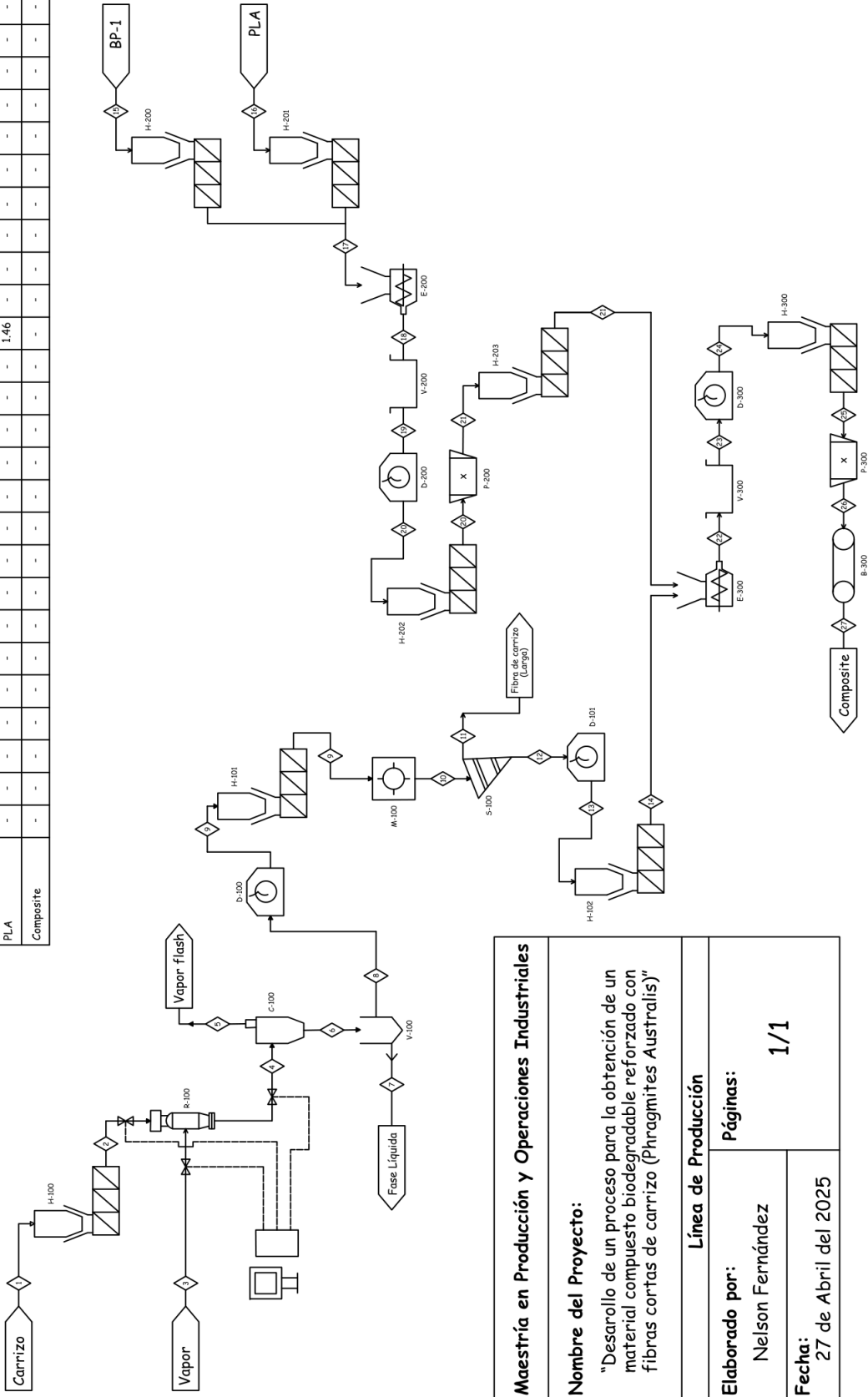
Tabla 15. Flujos máxicos del proceso

Corriente	Flujo máxico [kg/h]
PLA	1.46
BP-1	0.29
Carrizo	1.94
Fibra de carrizo	1.72
Fibra de carrizo (corta)	0.75
Fibra de carrizo (larga)	0.96

Agua_{D-100}

0.22

Flujo Másico [kg/h]																											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Carrizo	1.94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fibra de carrizo	-	-	-	-	-	-	-	-	1.72	-	0.96	0.75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
BP-1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.29	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PLA	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.46	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Composite	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2.5



Maestría en Producción y Operaciones Industriales	
Nombre del Proyecto: "Desarrollo de un proceso para la obtención de un material compuesto biodegradable reforzado con fibras cortas de carrizo (Phragmites Australes)"	
Línea de Producción	
Elaborado por: Nelson Fernández	Páginas: 1/1
Fecha: 27 de Abril del 2025	

Figura 23. PFD propuesto para el desarrollo de un compuesto biodegradable reforzado con fibras de carrizo

6. Conclusiones

- El diseño central compuesto rotacional empleado para la preparación de mezclas (FC/BP-1/PLA), permitió identificar que el contenido en peso del BP-1 es estadísticamente significativo, influyendo directamente en las variables de respuesta del esfuerzo máximo a tracción y flexión. Y, promueve una excelente transferencia de esfuerzos y reduce la incompatibilidad química entre matriz-refuerzo.
- Se desarrollaron materiales compuestos de PLA reforzados con fibras cortas de carrizo empelando un agente acople (BP-1), como una alternativa ecológica a los plásticos sintéticos. Se obtuvieron composites con propiedades mecánicas superiores a la del PLA puro. El composite de la corrida 8 con la composición (30 %FC + 11.5 %BP-1 + 58.5 %PLA) presenta valores con un incremento del 11.78 % y 11.86 %, en relación a los datos de resistencia a la tracción y flexión del PLA puro (45 MPa y 70 MPa), respectivamente. Estas propiedades permiten obtener materiales compuestos idóneos para diversas aplicaciones: industria del empaque sostenible (bandejas, contenedores, envases rígidos y semirrígidos), productos de consumo (accesorios, artículos de escritorio y utensilios), sector automotriz (paneles interiores y componentes no estructurales) y agricultura (bandejas de germinación).
- Se elaboró un PFD a escala de laboratorio, para la obtención de un composite biodegradable reforzado con fibras cortas de carrizo. Para el cual, se requiere una alimentación de 1.94 kg/h de carrizo, 0.29 kg/h de BP-1 y 1.46 kg/h de PLA. El reactor de explosión de vapor debe operar con un factor de severidad de 3.3 y los secadores rotativos deben mantener las corrientes de la materia prima con un contenido de humedad inferior al 1 %. La extrusora seleccionada para la producción es de doble husillo corrotante y su temperatura máxima de funcionamiento debe ser de 170 °C. Las operaciones unitarias y condiciones operacionales establecidas permiten la

producción propuesta del material de 2.5 kg/h, con un costo de producción aproximado de 5.1 \$/kg.

7. Recomendaciones

- Analizar la estructura de los composites resultantes mediante SEM con el objetivo de evaluar la adhesión e interacción de fases.
- Para incrementar el rendimiento de extracción de la fibra de carrizo se recomienda aplicar un tratamiento químico a la materia prima.
- Analizar la degradación de la fibra de carrizo que se obtiene del proceso *steam explosion* a diferentes niveles de factor de severidad, con el propósito de desarrollar composites con excelentes características mecánicas.
- Realizar un análisis integral de los costos de producción del composite y un estudio de factibilidad de mercado, que permita determinar la aceptación del producto, los sectores industriales más prometedores y su posicionamiento frente a alternativas tradicionales. Este tipo de evaluación complementaría los resultados técnicos obtenidos y proporcionaría una base sólida para la eventual introducción del producto en el ámbito comercial.

Referencias

- [1] K. M. F. Hasan *et al.*, "Sustainable bamboo fiber reinforced polymeric composites for structural applications: A mini review of recent advances and future prospects," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 8, p. 100362, Dec. 2023.
- [2] A. Mundhe and B. Kandasubramanian, "Advancements in natural fiber composites: Innovative chemical surface treatments, characterization techniques, environmental sustainability, and wide-ranging applications," *Hybrid Adv.*, vol. 7, p. 100282, Dec. 2024.
- [3] T. D. Moshood, G. Nawair, F. Mahmud, F. Mohamad, M. H. Ahmad, and A. AbdulGhani, "Sustainability of biodegradable plastics: New problem or solution to solve the global plastic pollution?," *Curr. Res. Green Sustain. Chem.*, vol. 5, no. November 2021, 2022.
- [4] V. Guerrero *et al.*, *Nuevos materiales: aplicaciones estructurales e industriales.*, vol. 53, no. 9. 2013.
- [5] Y. Wang *et al.*, "A Sustainable and Biodegradable Building Block: Review on Mechanical Properties of Bamboo Fibre Reinforced PLA Polymer Composites and Their Emerging Applications," *Fibers Polym.*, vol. 23, no. 12, pp. 3317–3342, 2022.
- [6] K. Nirmal Kumar *et al.*, "Mechanical and Thermal Properties of Bamboo Fiber-Reinforced PLA Polymer Composites: A Critical Study," *Genet. Res. (Camb).*, vol. 2022, 2022.
- [7] X. Zhao *et al.*, "Sustainable bioplastics derived from renewable natural resources for food packaging," *Matter*, vol. 6, no. 1. 2023.
- [8] K. Jögi and R. Bhat, "Valorization of food processing wastes and by-products for bioplastic production," *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 18, 2020.
- [9] E. Sarikaya, H. Çallioğlu, and H. Demirel, "Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties," *Compos. Part B Eng.*, vol. 167, pp. 461–466, Jun. 2019.
- [10] M. del C. Doria Serrano, "Green Chemistry: a new approach for environmental care," *Educ. Química*, vol. 20, no. 4, pp. 412–420, 2009.

- [11] Secretaría Nacional de Planificación, “Plan de Creación de Oportunidades 2021 2025,” 2021. [Online]. Available: https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/Plan-de-Creación-de-Oportunidades-2021-2025-Aprobado_compressed.pdf.
- [12] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, “Production, use, and fate of all plastics ever made,” *Sci. Adv.*, vol. 3, no. 7, pp. 25–29, 2017.
- [13] X. Liu, T. Lei, A. Boré, Z. Lou, B. Abdouraman, and W. Ma, “Evolution of global plastic waste trade flows from 2000 to 2020 and its predicted trade sinks in 2030,” *J. Clean. Prod.*, vol. 376, p. 134373, Nov. 2022.
- [14] A. Khan *et al.*, “An examination of cutting-edge developments in Bamboo-PLA composite research: A comprehensive review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 188, no. October, p. 113832, 2023.
- [15] L. Kerni, S. Singh, A. Patnaik, and N. Kumar, “A review on natural fiber reinforced composites,” *Mater. Today Proc.*, vol. 28, pp. 1616–1621, Jan. 2020.
- [16] R. Hsissou, R. Seghiri, Z. Benzekri, M. Hilali, M. Rafik, and A. Elharfi, “Polymer composite materials: A comprehensive review,” *Compos. Struct.*, vol. 262, p. 113640, Apr. 2021.
- [17] A. K. Mohanty, M. A. Khan, and G. Hinrichsen, “Influence of chemical surface modification on the properties of biodegradable jute fabrics—polyester amide composites,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 31, no. 2, pp. 143–150, Feb. 2000.
- [18] A. R. Sena Neto *et al.*, “Comparative study of 12 pineapple leaf fiber varieties for use as mechanical reinforcement in polymer composites,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 64, pp. 68–78, Feb. 2015.
- [19] R. A. Ilyas, S. M. Sapuan, M. M. Harussani, M. Y. A. Y. Hakimi, M. Z. M. Haziq, and M. S. N. Atikah, “Polylactic Acid (PLA) Biocomposite : Processing , Additive,” *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 1326, pp. 1–34, 2021.
- [20] I. S. Fahim, H. Chbib, and H. M. Mahmoud, “The synthesis, production & economic feasibility of manufacturing PLA from agricultural waste,” *Sustain. Chem. Pharm.*, vol. 12, no. March, p. 100142, 2019.
- [21] A. S. Getme and B. Patel, “A Review: Bio-fiber’s as reinforcement in composites of polylactic acid (PLA),” *Mater. Today Proc.*, vol. 26, pp. 2116–2122, Jan. 2020.

- [22] Y. Yang *et al.*, "Preparation and properties of bamboo fiber/polylactic acid composite modified with polycarbodiimide," *Ind. Crops Prod.*, vol. 218, no. December 2023, p. 118829, 2024.
- [23] K. Zhang, Z. Chen, L. M. Smith, G. Hong, W. Song, and S. Zhang, "Polypyrrole-modified bamboo fiber/polylactic acid with enhanced mechanical, the antistatic properties and thermal stability," *Ind. Crops Prod.*, vol. 162, no. December 2019, p. 113227, 2021.
- [24] J. Lin, Z. Yang, X. Hu, G. Hong, S. Zhang, and W. Song, "The effect of alkali treatment on properties of dopamine modification of bamboo fiber/polylactic acid composites," *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 4, 2018.
- [25] B. Fei *et al.*, "Bamboo fiber strengthened poly(lactic acid) composites with enhanced interfacial compatibility through a multi-layered coating of synergistic treatment strategy," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 249, no. July, p. 126018, 2023.
- [26] N. Le Moigne, M. Longerey, J. M. Taulemesse, J. C. Bénézet, and A. Bergeret, "Study of the interface in natural fibres reinforced poly(lactic acid) biocomposites modified by optimized organosilane treatments," *Ind. Crops Prod.*, vol. 52, pp. 481–494, 2014.
- [27] S. Qian, H. Mao, E. Zarei, and K. Sheng, "Preparation and Characterization of Maleic Anhydride Compatibilized Poly(lactic acid)/Bamboo Particles Biocomposites," *J. Polym. Environ.*, vol. 23, no. 3, pp. 341–347, 2015.
- [28] H. Long *et al.*, "Effect of polyethylene glycol on mechanical properties of bamboo fiber-reinforced polylactic acid composites," *J. Appl. Polym. Sci.*, vol. 136, no. 26, pp. 3–10, 2019.
- [29] R. Tokoro, D. M. Vu, K. Okubo, T. Tanaka, T. Fujii, and T. Fujiura, "How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers," *J. Mater. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 775–787, 2008.
- [30] G. S. Rao, K. Debnath, and R. N. Mahapatra, "Mechanical, Thermal, Morphological, and Fibre Characteristics During Injection Moulding of Green Composites," *Fibers Polym.*, vol. 25, no. 1, pp. 331–346, 2024.
- [31] S. Mazumdar, *Composites manufacturing: Materials, product and process engineering*, 1ra ed. Estados Unidos: CRC Press, 2003.
- [32] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An*

- Introduction*, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc, 2009.
- [33] M. C. Tanzi, S. Farè, and G. Candiani, *Organization, Structure, and Properties of Materials*. 2019.
- [34] F. Eller *et al.*, “Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: The common reed *Phragmites australis*,” *Front. Plant Sci.*, vol. 8, no. November, 2017.
- [35] D. Ramos, N. E. El Mansouri, F. Ferrando, and J. Salvadó, “All-lignocellulosic fiberboard from steam exploded *Arundo donax* L.,” *Molecules*, vol. 23, no. 9, pp. 1–12, 2018.
- [36] F. Vitrone, D. Ramos, V. Vitagliano, F. Ferrando, and J. Salvadó, “All-lignocellulosic fiberboards from giant reed (*Arundo donax* L.): Effect of steam explosion pre-treatment on physical and mechanical properties,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 319, no. December 2021, 2022.
- [37] M. Paquin, “*Phragmites australis* ssp. *australis*,” 2021. [Online]. Available: <https://mexico.inaturalist.org/observations/92256553>. [Accessed: 24-Sep-2024].
- [38] A. Gholampour and T. Ozbakkaloglu, *A review of natural fiber composites: properties, modification and processing techniques, characterization, applications*, vol. 55, no. 3. Springer US, 2020.
- [39] H. W. Reinhardt, M. H. Salahi, and T. Schatz, “Strength of reed from Egypt,” *Mater. Struct.*, vol. 28, no. 6, pp. 345–349, Jul. 1995.
- [40] M. Machaka, J. Khatib, S. Baydoun, A. Elkordi, and J. J. Assaad, “The Effect of Adding *Phragmites australis* Fibers on the Properties of Concrete,” *Buildings*, vol. 12, no. 3, 2022.
- [41] C. S. Shon, T. Mukashev, D. Lee, D. Zhang, and J. R. Kim, “Can Common Reed Fiber Become an Effective Construction Material? Physical, Mechanical, and Thermal Properties of Mortar Mixture Containing Common Reed Fiber,” *Sustain.* 2019, Vol. 11, Page 903, vol. 11, no. 3, p. 903, Feb. 2019.
- [42] C. Díaz, M. Jiménez, M. Á. Navacerrada, and A. Pedrero, “Acoustic properties of reed panels,” *Mater. Construcción*, vol. 62, no. 305, pp. 55–66, Mar. 2012.
- [43] M. R. Habibi, “Investigation on Possibility of MDF Production from Reeds,” *Rev. For. Wood Prod. Wood Biotechnol. Iran Ger. Inst. For. Bot. Georg. Göttingen*

- Göttingen, Ger.*, pp. 82–94, 2006.
- [44] A. Muhammad, M. R. Rahman, S. Hamdan, and K. Sanaullah, “Recent developments in bamboo fiber-based composites: a review,” *Polym. Bull.*, vol. 76, no. 5, pp. 2655–2682, May 2019.
- [45] S. Biswas, Q. Ahsan, A. Cenna, M. Hasan, and A. Hassan, “Physical and mechanical properties of jute, bamboo and coir natural fiber,” *Fibers Polym.*, vol. 14, no. 10, pp. 1762–1767, Oct. 2013.
- [46] A. W. Bhutto *et al.*, “Insight into progress in pre-treatment of lignocellulosic biomass,” *Energy*, vol. 122, pp. 724–745, Mar. 2017.
- [47] C. Asada, K. Honjo, and Y. Nakamura, “Utilization of Steam-Treated and Milling-Treated Lignin from Moso Bamboo as Curing Agent of Epoxy Resin,” *Waste and Biomass Valorization*, vol. 12, no. 11, pp. 6261–6272, Nov. 2021.
- [48] S. Kalpakjian and S. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5ta ed. México: Pearson Educación, 2008.
- [49] W. D. Seider, J. D. Seader, D. R. Lewin, and S. Widagdo, *Product and Process Design Principles Synthesis, Analysis, and Evaluation*, 3rd ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [50] G. Mousalli-Kayat, “Métodos y Diseños de Investigación Cuantitativa,” *Mérida*, no. June, pp. 1–39, 2015.
- [51] L. T. Lim, R. Auras, and M. Rubino, “Processing technologies for poly(lactic acid),” *Prog. Polym. Sci.*, vol. 33, no. 8, pp. 820–852, 2008.
- [52] A. U. M. Shah, M. T. H. Sultan, M. Jawaid, F. Cardona, and A. R. A. Talib, “A Review on the Tensile Properties of Bamboo Fiber Reinforced Polymer Composites,” *BioResources*, vol. 11, no. 4, pp. 10654–10676, 2016.
- [53] ASTM International, “ASTM D4442-20 Standard Test Methods for Direct Moisture Content Measurement of Wood and Wood-Based Materials,” 2020.
- [54] W. Stelte, “Steam explosion for biomass pre-treatment,” *Danish Technol. Inst.*, pp. 1–15, 2013.
- [55] W. Zhao, J. Zhang, W. Zhang, S. Yuan, H. Chen, and A. Wu, “Effect of bamboo unit morphology on the preparation of bamboo fibers by steam explosion,” *Ind. Crops Prod.*, vol. 202, no. June, p. 117066, 2023.
- [56] D. Montgomery, *Diseño y análisis de experimentos*, 2da ed. John Wiley & Sons,

- Inc, 2004.
- [57] ASTM International, “ASTM D3039/D3039 M-08 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” 2008.
- [58] ASTM International, “ASTM D7264/D7264 M-21 Standard Test Method for Flexural Properties of Polymer Matrix Composite Materials,” 2021.
- [59] R. A. Ilyas *et al.*, “Natural Fiber-Reinforced Polylactic Acid, Polylactic Acid Blends and Their Composites for Advanced Applications,” *Polym. 2022, Vol. 14, Page 202*, vol. 14, no. 1, p. 202, Jan. 2022.
- [60] J. R. Wagner, E. M. Mount, and H. F. Giles, *Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook*. 2013.
- [61] R. Perry and D. Green, *Perry’s Chemical Engineers’ Handbook*, Octava ed. Estados Unidos: Mc-Graw Hill, 2008.

ANEXOS

ANEXO I

CÁLCULOS PARA EL DISEÑO DEL PROCESO A ESCALA DE LABORATORIO

Materia prima

A escala de laboratorio, se propuso como etapa inicial una producción de 60 kg de composite por día.

$$\frac{60 \text{ kg composite}}{\text{día}} \times \frac{1 \text{ día}}{24 \text{ h}} = 2.5 \frac{\text{kg composite}}{\text{h}}$$

PLA

$$\frac{2.5 \text{ kg composite}}{\text{h}} \times \frac{58.5 \text{ kg PLA}}{100 \text{ kg composite}} = 1.4625 \frac{\text{kg PLA}}{\text{h}}$$

BP-1

$$\frac{2.5 \text{ kg composite}}{\text{h}} \times \frac{11.5 \text{ kg BP - 1}}{100 \text{ kg composite}} = 0.2875 \frac{\text{kg BP - 1}}{\text{h}}$$

Fibra de carrizo (FC)

$$\frac{2.5 \text{ kg composite}}{\text{h}} \times \frac{30 \text{ kg FC}}{100 \text{ kg composite}} = 0.75 \frac{\text{kg FC}}{\text{h}}$$

Puesto que se va a trabajar como refuerzo con fibra de carrizo corta (malla N° 60 y 100) es importante considerar el rendimiento en el proceso de extracción de fibra.

$$\frac{0.75 \text{ kg FC (60 - 100)}}{\text{h}} \times \frac{100 \text{ kg carrizo}}{44.01 \text{ kg FC (60 - 100)}} = 1.7041 \frac{\text{kg carrizo}}{\text{h}}$$

Además, para el flujo de alimentación al reactor de explosión de vapor es necesario considerar la cantidad de humedad del carrizo y calcular la alimentación fresca de carrizo que debe ingresar al proceso.

$$\text{Alimentación fresca} = \frac{\text{Masa seca}}{1 - MC}$$

$$\text{Alimentación fresca} = \frac{1.7041 \text{ kg carrizo}}{1 - 0.118}$$

$$\text{Alimentación fresca} = 1.932 \text{ kg carrizo}$$

Por lo tanto, al reactor se debe alimentar un flujo de 1.932 kg de carrizo por hora.

Equipo de explosión de vapor

La relación de alimentación al reactor carrizo-agua es de 1/1.

$$1932 \frac{\text{g carrizo}}{\text{h}} \times \frac{1 \text{ L H}_2\text{O}}{100 \text{ g carrizo}} = 19.32 \frac{\text{L H}_2\text{O}}{\text{h}}$$

Secador rotativo

$$\frac{1.932 \text{ kg FC}}{h} \times \frac{0.118 \text{ kg H}_2\text{O}}{1 \text{ kg FC}} \times \frac{1000 \text{ g H}_2\text{O}}{1 \text{ kg H}_2\text{O}} \times \frac{1 \text{ mL H}_2\text{O}}{1 \text{ g H}_2\text{O}} = 227.976 \frac{\text{mL H}_2\text{O}}{h}$$

$$= 0.2279 \frac{\text{L H}_2\text{O}}{h}$$

Para la selección del secador rotativo es necesario calcular el volumen a secar de carrizo en un día de producción. La densidad aparente para el tallo del carrizo es de 160 kg/m³.

$$1.932 \frac{\text{kg carrizo}}{h} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} \times \frac{\text{m}^3 \text{ carrizo}}{160 \text{ kg carrizo}} = 0.2898 \frac{\text{m}^3 \text{ carrizo}}{\text{día}}$$

Molino

Para la selección del equipo es importante calcular la carga que se alimenta para reducir de tamaño.

$$1.932 \frac{\text{kg carrizo}}{h} \times \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ día}} = 46.368 \frac{\text{kg carrizo}}{\text{día}}$$

Extrusora

En la Tabla 15 se especifican los requerimientos técnicos de la extrusora para la obtención del material compuesto biodegradable a escala de laboratorio. Además, se debe considerar que el tipo de alimentación para la dosificación de los polímeros a la extrusora debe ser de tipo gravimétrica y volumétrica o por tornillo para la fibra de carrizo.

Tabla 16. Especificaciones técnicas para la extrusora de laboratorio [60]

Parámetro	Recomendación
Tipo de extrusora	Doble husillo corrotante
Caudal de producción	2.5 kg/h
Diámetro de husillo (D)	16 – 20 mm
Relación L/D	32:1 – 40:1
Velocidad del husillo	300 – 600 rpm
Torque específico	≥ 10 Nm/cm ³
Perfil de temperatura	140 – 180°C
Sistema de desgasificación	Ventilación atmosférica o vacío

Ciclón

En la Tabla 16 se detallan los requerimientos técnicos del ciclón para la separación de las partículas sólidas del vapor/gases.

Tabla 17. Especificaciones técnicas para el ciclón [61]

Parámetro	Recomendación
Tipo de ciclón	Separador ciclónico de gas-sólido
Caudal de alimentación	~2 kg/h (flujo bifásico vapor + partículas)
Temperatura de operación	100 – 180 °C
Diámetro del ciclón (Dc)	50 – 150 mm (escala laboratorio/piloto)
Altura del ciclón (H)	5–6 veces el diámetro
Material de construcción	Acero inoxidable (AISI 304 o 316) resistente a vapor y corrosión
Descarga de sólidos	Tolva inferior con válvula o válvula de retención

DETERMINACIÓN DE LA INVERSIÓN REQUERIDA PARA EL LABORATORIO

Costos de materia prima

Tabla 18. Precios referenciales de la materia prima

Materia prima	Precio (\$/kg)
PLA	5.5
BP-1	6.55
Carrizo	-

El carrizo es considerado como una especie invasora en nuestro ecosistema y dada su abundancia no se considera como un costo de materia prima.

$$1051.2 \frac{kg \text{ PLA}}{mes} * \frac{5.5 \$}{kg \text{ PLA}} = 5781.6 \frac{\$}{mes}$$

$$208.8 \frac{kg \text{ BP} - 1}{mes} * \frac{6.55 \$}{kg \text{ BP} - 1} = 1367.64 \frac{\$}{mes}$$

Costos de equipos

Tabla 19 Costos de equipos

Equipos	Cantidad	Costo unitario (\$)	Costo total (\$)
Línea de extrusión	2	25,000	50,000
Secador rotatorio	2	3,500	7,000
Ciclón	1	620	620
Equipo de explosión de vapor	1	8,000	8,000
Tamizadora vibratoria	1	200	200
Molino de corte	1	800	800
Banda transportadora	1	180	180

El costo total de los equipos requeridos para la producción a escala de laboratorio del composite biodegradable es de 66,800 \$.

En la Tabla 20, se detalla la potencia demandada de los equipos requeridos para el proceso de producción.

Tabla 20. Consumo energético de los equipos

Equipos	Cantidad	Horas de funcionamiento (h/día)	Potencia demandada (kW)
Línea de extrusión	8	24	37.3
Secador rotatorio	2	24	1.5
Ciclón	1	24	0.25
Equipo de explosión de vapor	1	24	4
Tamizadora vibratoria	1	24	0.75
Molino de corte	1	24	0.75
Banda transportadora	1	24	2.2

El consumo energético del proceso es de aproximadamente 46.75 kW/día (1402.5 kWh/mes).

Gastos servicios básicos

$$1402.5 \frac{KWh}{mes} * \frac{0.10 \$}{KWh} = 149.25 \frac{\$}{mes}$$

Se requiere un volumen diario de agua de 0.46 m³ para el reactor de explosión de vapor y 0.5 m³ para el sistema de enfriamiento.

$$28.8 \frac{m^3}{mes} * \frac{0.72 \$}{m^3} = 20.73 \frac{\$}{mes}$$

Costo mano de obra

EL salario bruto mensual para los 3 operadores que se requeriría mensualmente es de 1861 \$ con todos los beneficios de ley.

Costo de producción

$$Costo_{producción} = Costo_{materia\ prima} + Costo_{agua} + Costo_{luz} + Costo_{mano\ de\ obra}$$

$$Costo_{producción} = 7149.24 + 20.73\$ + 149.25\$ + 1861\$$$

$$Costo_{producción} = 9180.22\$$$

La producción es de 60 kg/día (360 sacos mensuales) y el costo aproximado sería de 25.50 \$. El kilogramo de material costará alrededor de 5.1 \$/kg.