

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**OBTENCIÓN DE MATERIALES
COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS A
PARTIR DE LA MEZCLA DE RESIDUOS
LIGNOCELULÓSICOS Y PLÁSTICOS POS
CONSUMO**

Diego Fernando Lopez Rodriguez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Química
Manizales, Colombia
2021

**OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS A PARTIR
DE LA MEZCLA DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS Y PLÁSTICOS POS
CONSUMO**

OBTAINING WOOD PLASTIC COMPOSITE MATERIALS FROM THE MIXTURE OF
LIGNOCELLULOSIC AND POST-CONSUMER PLASTICS WASTE

Proyecto de Tesis
MAESTRÍA EN INGENIERÍA –INGENIERÍA QUÍMICA

Estudiante
DIEGO FERNANDO LÓPEZ RODRÍGUEZ
Ingeniero Ambiental

Tutor
ANDRÉS FELIPE ROJAS GONZÁLEZ
Profesor Asociado de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales
Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.

Codirector
MIGUEL ANGEL HIDALGO SALAZAR
Profesor Asociado de la Universidad Autónoma de Occidente
Ingeniero Mecánico, M. Sc., Ph. D.

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2021

El presente trabajo es dedicado a mis padres, mi hermana, mi novia, mis amigos y profesores que me acompañaron en el proceso, por su apoyo incondicional y ser parte fundamental para alcanzar este gran logro.

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	13
RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
INTRODUCCIÓN.....	16
OBJETIVOS.....	17
Objetivo General.....	17
Objetivos Específicos.....	17
HIPÓTESIS.....	18
Referencias.....	18
CAPÍTULO 1. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS Y PLÁSTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS.....	20
1.1. Resumen.....	20
1.2. Marco Teórico.....	20
1.2.1. Producción nacional de residuos lignocelulósicos y plásticos.....	20
1.2.2. Materiales compuestos.....	22
1.2.3. Usos y aplicaciones de los materiales compuestos.....	25
1.2.4. Estudios realizados en aprovechamiento de residuos.....	26
1.2.5. Procesos de fabricación de materiales compuestos.....	28
1.3. Métodos experimentales.....	29
1.3.1. Obtención y preparación de los residuos.....	29
1.3.2. Caracterización de los residuos.....	32
1.3.3. Diseño experimental para la formulación de muestras.....	37
1.4. Resultados y discusión.....	41
1.4.1. Caracterización de los residuos lignocelulósicos.....	41
1.4.2. Caracterización de los residuos plásticos.....	47
1.4.3. Obtención de biocompuestos.....	48
1.5. Conclusiones.....	49
1.6. Referencias.....	49
CAPÍTULO 2. VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS: PROPIEDADES MECÁNICAS.....	58
2.1. Resumen.....	58
2.2. Marco teórico.....	58

2.3 Métodos experimentales.....	63
2.3.1. Ensayo de tracción.....	64
2.3.2. Ensayo de flexión	67
2.3.3. Ensayo de impacto.....	69
2.3.4. Uso de agente acoplante (MAPP).....	70
2.4. Resultados y discusión	71
2.4.1 Ensayos de tracción y flexión.....	71
2.4.2 Ensayo de impacto.....	76
2.4.3 Uso de agente acoplante	78
2.5. Aplicaciones de los materiales compuestos	80
2.6. Conclusiones	81
2.7. Referencias	81
CAPÍTULO 3. VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS: PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y TÉRMICAS	86
3.1 Resumen	86
3.2 Marco teórico	86
3.3. Métodos experimentales.....	89
3.3.1. Densidad.....	90
3.3.2. Absorción de agua.....	90
3.3.3. Envejecimiento acelerado.....	90
3.3.4 Análisis próximo, análisis último y poder calorífico.....	91
3.3.5. Análisis termogravimétrico (TGA)	92
3.3.6. Calorimetría diferencial de barrido (DSC).....	92
3.4. Resultados y discusión	92
3.4.1. Densidad.....	92
3.4.2. Absorción de agua.....	93
3.4.3. Análisis próximo y último	96
3.4.4. Envejecimiento acelerado.....	98
3.4.5. Termogravimetría y DSC de los materiales compuestos.....	100
3.5. Aplicaciones de los materiales compuestos	106
3.6. Conclusiones	107
3.7 Referencias	107
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO – AMBIENTAL DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS	112
4.1. Resumen	112

4.2. Marco teórico	112
4.3. Métodos experimentales.....	113
4.3.1. Simulación en AspenPlus del proceso de extrusión de biocompuestos	113
4.3.2. Análisis económico del proceso de extrusión de biocompuestos.....	114
4.3.3. Análisis ambiental del proceso de extrusión de biocompuestos.....	116
4.4. Resultados y discusión	117
4.4.1. Análisis técnico	117
4.4.2. Análisis económico	119
4.4.3. Análisis ambiental	123
4.5. Conclusiones	124
4.6. Referencias	124
CONCLUSIONES	127
RECOMENDACIONES	128

Lista de tablas

Tabla 1. 1. Generación de residuos plásticos en Colombia	21
Tabla 1. 2. Generación de residuos lignocelulósicos en Colombia	22
Tabla 1. 3. Materiales compuestos de fibra continua.	25
Tabla 1. 4. Condiciones de proceso de extrusión de polímeros pos industriales.....	31
Tabla 1. 5. Ecuaciones empleadas en la determinación del análisis próximo de los residuos lignocelulósicos.	32
Tabla 1. 6. Ecuaciones empleadas en la determinación de la composición química de los residuos lignocelulósicos.	33
Tabla 1. 7. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la densidad de la biomasa.	35
Tabla 1. 8. Parámetros establecidos para pruebas mecánicas de tracción y flexión.....	36
Tabla 1. 9. Configuraciones del diseño de experimentos propuesto para la obtención de biocompuestos.	37
Tabla 1. 10. Biocompuestos obtenidos.....	38
Tabla 1. 11. Características del extrusor de doble husillo.	39
Tabla 1. 12. Condiciones de operación de la máquina extrusora para la obtención de materiales compuestos.	40
Tabla 1. 13. Análisis próximo en base seca de las fibras y matrices poliméricas empleadas.	41
Tabla 1. 14. Análisis próximo en base seca de las fibras y matrices poliméricas según datos reportados en la literatura.....	42
Tabla 1. 15. Análisis elemental en base seca y libre de cenizas de las fibras y matrices poliméricas empleadas.	42
Tabla 1. 16. Valores reportados en la literatura para el análisis último en base seca y libre de cenizas de residuos lignocelulósicos.....	43
Tabla 1. 17. Composición estructural de los residuos lignocelulósicos.	44
Tabla 1. 18. Valores reportados en la literatura para la composición estructural de los residuos lignocelulósicos.	44
Tabla 1. 19. Análisis termogravimétrico de las fibras.....	45
Tabla 1. 20. Características físicas de las fibras vegetales.	46
Tabla 1. 21. Características del material polimérico.	47
Tabla 2. 1. Resistencia a la tracción en materiales compuestos	60
Tabla 2. 2. Resistencia a la flexión en materiales compuestos.....	61

Tabla 2. 3. Resistencia al impacto en materiales compuestos.....	63
Tabla 2. 4. Biocompuestos obtenidos.....	63
Tabla 2. 5. Dimensiones de la probeta empleada en los ensayos de tracción de materiales compuestos...	64
Tabla 2. 6. Condiciones de operación del equipo de inyección empleado en la obtención de probetas para ensayo de tracción.	65
Tabla 2. 7. Parámetros establecidos para pruebas mecánicas de tracción.....	66
Tabla 2. 8. Condiciones de operación del equipo de inyección empleado en la obtención de probetas para ensayo de flexión.....	67
Tabla 2. 9. Velocidades del ensayo de flexión para materiales compuestos.....	68
Tabla 2. 10. Velocidades del ensayo de flexión para matrices poliméricas.....	69
Tabla 2. 11. Propiedades mecánicas de los biocompuestos obtenidos.....	73
Tabla 2. 12. Resultados obtenidos del test de ANOVA.....	78
Tabla 2. 13. Resultados del test de DUNCAN aplicado a los materiales compuestos obtenidos.....	79
Tabla 2. 14. Propiedades de tracción y flexión en BC4 modificado con MAPP.....	80
Tabla 3. 1. Densidad y absorción de agua reportados en la literatura para materiales compuestos.....	88
Tabla 3. 2. Propiedades térmicas reportadas en la literatura para materiales compuestos.....	89
Tabla 3. 3. Materiales compuestos obtenidos.....	89
Tabla 3. 4. Correlaciones empleados para estimar la composición elemental de los biocompuestos obtenidos en base seca.....	91
Tabla 3. 5. Análisis próximo en base seca y poder calorífico de los biocompuestos.....	97
Tabla 3. 6. Análisis elemental de los biocompuestos en base seca y libre de cenizas.....	98
Tabla 3. 7. Resultados del análisis termogravimétrico de los materiales compuestos obtenidos.....	102
Tabla 3. 8. Resultados análisis DSC para los materiales compuestos obtenidos.....	105
Tabla 4. 1. Rango de porcentajes asociados al costo de inversión por capital fijo.....	115
Tabla 4. 2. Costo de equipos necesarios para el procesamiento de biocompuestos.....	115
Tabla 4. 3. Costos directos de producción y venta de materiales compuestos.....	116
Tabla 4. 4. Indicadores para evaluación de impacto ambiental.....	116
Tabla 4. 5. Factores de emisión asociados al proceso de obtención de materiales compuestos.....	117
Tabla 4. 6. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto CCa – PPR.....	118
Tabla 4. 7. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto SC – PPR.....	118
Tabla 4. 8. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto CCa – PEADR.....	119

Tabla 4. 9. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto SC – PEADR.	119
Tabla 4. 10. Costos de inversión por capital fijo para los biocompuestos.	120
Tabla 4. 11. Costos del producto final o biocompuesto CCa – PPR.	121
Tabla 4. 12. Costos del producto final o biocompuesto SC – PPR.	121
Tabla 4. 13. Costos del producto final o biocompuesto CCa – PEADR.	122
Tabla 4. 14. Costos del producto final o biocompuesto SC – PEADR.	122
Tabla 4. 15. Emisión de gases como subproducto del procesamiento de los polímeros.	123
Tabla 4. 16. Indicadores ambientales asociados al proceso de obtención de materiales compuestos.	123
Tabla 4. 17. Factores de emisión asociados al proceso de obtención de los biocompuestos.	124

Lista de figuras

Figura 1. 1. Orientación de los refuerzos empleados en la obtención de materiales compuestos (Kutz, 2015).	23
Figura 1. 2. Clasificación de las fibras (Kutz, 2015; Ramesh et al., 2017).	24
Figura 1. 3. Tipos de biotecnología (Almeida et al., 2011; Heux et al., 2015; Van de Wiel, 2016).	27
Figura 1. 4. Molino empleado para el triturado de las fibras vegetales.....	30
Figura 1. 5. Equipo de extrusión empleado en el procesamiento de polímeros.	30
Figura 1. 6. Equipo de molienda empleado en el procesamiento de polímeros.	31
Figura 1. 7. Equipo extrusor empleado en el tratamiento de polímeros vírgenes.	31
Figura 1. 8. Diámetros de Feret. Imagen tomada de Lu et al. (2017).....	35
Figura 1. 9. Equipo empleado para prueba de impacto.	36
Figura 1. 10. Análisis termogravimétrico de las fibras vegetales.....	45
Figura 1. 11. Curva de termogravimetría diferencial de las fibras.	46
Figura 1. 12. Obtención de materiales compuestos.....	48
Figura 1. 13. Evidencias de la salida del alimentador de fibra obstruido.....	48
Figura 2. 1. Mordazas y probetas para ensayo de tracción (Beltrán y Marcilla, 2012).....	59
Figura 2. 2. Fuerzas implicadas en un ensayo de flexión. Fuente: Beltrán y Marcilla (2012).	61
Figura 2. 3. Diagrama del ensayo de impacto. Fuente: Patterson et al. (2019).	62
Figura 2. 4. Tipo de probeta empleada en los ensayos de tracción de materiales compuestos, según norma ASTM D638.....	64
Figura 2. 5. Equipo de inyección empleado para la obtención de probetas en ensayos mecánicos.	65
Figura 2. 6. Probetas empleadas en los ensayos de tensión.....	66
Figura 2. 7. Montaje de probeta para ensayo de tracción.	66
Figura 2. 8. Probetas empleadas en los ensayos de flexión.....	69
Figura 2. 9. Probetas empleadas en el ensayo de impacto.....	69
Figura 2. 10. Proceso de entalle de probetas empleadas en la prueba de impacto.	70
Figura 2. 11. Equipo empleado en el ensayo de impacto.	70
Figura 2. 12. Módulo de elasticidad en materiales compuestos empleando PPR como matriz polimérica.	71

Figura 2. 13. Módulo de elasticidad en materiales compuestos empleando PEADR como matriz polimérica.....	72
Figura 2. 14. Resistencia a la tracción y flexión en materiales compuestos empleando PPR como matriz polimérica.....	72
Figura 2. 15. Resistencia a la tracción y flexión en materiales compuestos empleando PEADR como matriz polimérica.....	73
Figura 2. 16. Curva Deformación vs Esfuerzo para los biocompuestos obtenidos a partir de PPR.	76
Figura 2. 17. Curva Deformación vs Esfuerzo para los biocompuestos obtenidos a partir de PEADR.	76
Figura 2. 18. Resistencia al impacto en materiales compuestos.....	78
Figura 3. 1. Etapas para la producción de plástico granulado. Tomado y modificado de Ecoplas, 2011. ..	87
Figura 3. 2. Montaje utilizado para el ensayo de envejecimiento acelerado.	91
Figura 3. 3. Densidad de los materiales compuestos obtenidos.	93
Figura 3. 4. Absorción de agua en biocompuestos empleando PPR como matriz polimérica.	95
Figura 3. 5. Absorción de agua en biocompuestos empleando PEADR como matriz polimérica.	96
Figura 3. 6. Flexión en biocompuestos bajo condiciones de envejecimiento acelerado.	99
Figura 3. 7. Tracción en biocompuestos bajo condiciones de envejecimiento acelerado.	100
Figura 3. 8. Termogravimetría de los biocompuestos.	103
Figura 3. 9. DTG de los biocompuestos.	103
Figura 3. 10. Etapa de enfriamiento durante análisis DSC de los biocompuestos.	105
Figura 3. 11. Etapa de calentamiento durante análisis DSC de los biocompuestos.	106
Figura 4. 1. Proceso de extrusión de materiales compuestos simulado en Aspen Plus.....	114

Lista de abreviaturas

BC: biocompuesto	MV: materia volátil
C: carbono	N: nitrógeno
CCa: cisco de café	O: oxígeno
CEL: celulosa	PCOP: potencial de oxidación fotoquímica
CF: carbono fijo	PCS: poder calorífico
CMC: matriz cerámica	PEADR: polietileno de alta densidad pos industrial
CMCa: matriz de carbono	PPR: polipropileno pos industrial
CMM: matriz metálica	RA: relación de aspecto
CMP: matriz polimérica	SC: estopa de coco
Cz: cenizas	T. temperatura
D: densidad	T _c : temperatura de cristalización
DSC: calorimetría diferencial de barrido	TGA: análisis termogravimétrico
DTG: termogravimetría diferencial	T _m : temperatura de fusión
EXT: extractivos	T _{max} : temperatura de velocidad máxima de degradación
GITEM: grupo de investigación en tecnología para la manufactura	Ton: Toneladas
GWP: potencial de calentamiento global	T _{on} : temperatura inicial de degradación
H: hidrógeno	TP: tamaño de partícula
HCL: holocelulosa	Tp: temperatura de máxima pérdida de peso
HMC: hemicelulosa	TR: liberación tóxica específica
Hw: humedad	TRI: cantidad total de tóxicos liberados
LGN: lignina	Trr: temperatura inicial y final de región
MAPP: anhídrido maleíco injertado en polipropileno	WP: ecotoxicidad potencial sobre la vida acuática
ML: pérdida de peso total	X _c : cristalización
MTE: masa total de etileno equivalente	ΔH_c : entalpía de cristalización
MTF: masa total de formaldehído equivalente	ΔH_m : entalpía de fusión.
MTL: masa total de tóxicos	

AGRADECIMIENTOS

Antes de cualquier cosa agradecer a Dios por esta linda oportunidad para seguir creciendo personal y profesionalmente. Así mismo a todas y cada una de las personas que me acompañaron en este camino, familiares, amigos y profesores. Agradecer a mis padres por su apoyo incondicional y continuo día a día, especialmente en esos momentos difíciles donde sentimos desviarnos del camino. A los profesores que acompañaron mi proceso formativo, especialmente Andrés Felipe Rojas y Miguel Ángel Hidalgo, por la confianza puesta en mí, por compartir su conocimiento y abrirme las puertas de sus grupos de investigación. A mi amigo, Juan Martín García por recibirme al llegar a la ciudad de Manizales, acogerme en su casa en los últimos semestres y enseñarme lo acogedora e inigualable que es esta ciudad. Una mención especial para Daniel Alejandro Ríos que cargó conmigo en los momentos que necesité de ese amigo incondicional que no te abandona, en las buenas y en las malas. A Juan Pablo Correa y Juan Manuel Montalvo solo palabras de agradecimiento por sus consejos, frases de ánimo y acompañamiento técnico durante el desarrollo experimental de mi trabajo. Gracias por el apoyo de todos mis amigos en la ciudad de Palmira, los cuales a pesar de la distancia nunca dejaron de estar pendientes de mí y cargarme de buena energía. Finalmente, agradecer a María Camila Forero por brindarme su apoyo incondicional, su preocupación y constante insistencia en que todo funcionara y saliera de la mejor manera. ¡Gracias señores!

RESUMEN

Actualmente, la ecología industrial y la ecoeficiencia son dos conceptos que guían el desarrollo de la industria colombiana mediante el aprovechamiento de materiales residuales como la biomasa y los plásticos pos consumo o pos industriales. En Colombia se produce una gran cantidad de residuos lignocelulósicos, al mismo tiempo que la generación de residuos plásticos aumenta como consecuencia de la alta demanda de polímeros. Con base en esto, la fabricación de materiales compuestos o biocompuestos se propone como solución sostenible a la producción de residuos. Este trabajo se realiza con el objetivo de obtener materiales compuestos a partir de la mezcla de residuos lignocelulósicos, tales como la estopa de coco (SC) y el cisco de café (CCa), con plásticos pos industriales, constituidos principalmente por polipropileno (PPR) y polietileno de alta densidad (PEADR). Los biocompuestos obtenidos fueron caracterizados por medio de ensayos mecánicos (tracción, flexión e impacto), por termogravimetría y calorimetría diferencial de barrido (DSC), así como por pruebas físicas y químicas como densidad, absorción de agua, envejecimiento acelerado, análisis próximo, análisis último y poder calorífico. Entre los principales resultados se encuentran: i) el aumento en la resistencia a la tracción y la flexión del PPR reforzado con 30% de CCa (BC4), ii) el aumento en la densidad del PPR y el PEADR mezclados con CCa al 30%, iii) el alto porcentaje de absorción de agua del PPR y el PEADR reforzados con CCa al 30%, iv) la estabilidad en las propiedades de flexión proporcionada por el contenido de lignina presente en la SC, v) el aumento en la temperatura de degradación del PPR y del PEADR reforzados con SC al 10% y CCa al 30%, respectivamente, vi) el incremento en la temperatura y el porcentaje de cristalización del PPR mezclado con SC al 10%, vii) el margen de utilidad por venta de materiales compuestos (11%), viii) la estimación del punto de equilibrio del proceso (409 Ton/año), ix) el cálculo del periodo de recuperación de la inversión inicial (2.3 años), y x) la determinación del potencial por calentamiento global como el parámetro de mayor impacto ambiental generado por el proceso de extrusión de PPR. Finalmente, se puede concluir principalmente que los biocompuestos reforzados con CCa presentaron un mejor comportamiento mecánico si se comparan con las matrices poliméricas reforzadas con SC. Por otro lado, los resultados asociados a las pruebas térmicas se encuentran directamente relacionados con la incorporación de fibra vegetal y su composición estructural (contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina). Adicionalmente se menciona que la obtención de materiales compuestos se ve influenciada en gran medida por los costos de la materia prima así como de la disponibilidad de la misma en áreas aledañas y cercanas al sitio de su procesamiento.

Palabras clave: biocompuesto, residuo, material lignocelulósico, plástico pos industrial, fibra.

ABSTRACT

Currently, industrial ecology and eco-efficiency are two concepts that guide the development of Colombian industry through the use of materials such as biomass and plastics. A large amount of lignocellulosic waste is produced in Colombia, at the same time as the plastic waste generation increases as a consequence of the high demand for polymers. Based on this, the manufacture of composite materials or biocomposites is proposed as a sustainable solution to the production of waste. This work is carried out with the objective of obtaining composite materials from the mixture of lignocellulosic waste, such as coconut tow (SC) and coffee cisco (CCa), with post industrial plastics, consisting mainly of polypropylene (PPR) and high density polyethylene (PEADR). The biocomposites were characterized by mechanical tests (tensile, bending and impact), thermogravimetry and differential scanning calorimetry (DSC), as well as the physical tests as density, water absorption, accelerated aging, proximal analysis, ultimate analysis and calorific power. Among the main results are: i) the increase in tensile and flexural strength of reinforced PPR with 30% CCa (BC4), ii) the increase in density of mixed PPR and PEADR with CCa at 30% , iii) the high percentage of water absorption of PPR and PEADR reinforced with 30% CCa, iv) stability in the properties of flexion and the content of lignin present in the SC, v) the increase of degradation temperature in reinforced PPR and PEADR with 10% SC and 30% CCa, respectively, and vi) the increase in temperature and the crystallization percentage of PPR mixed with 10% SC. Finally, it can be concluded that the reinforced biocompounds with CCa have a better mechanical behavior and are compared with the polymer reinforced matrices with SC. On the other hand, the results associated with the thermal tests are directly related to the incorporation of vegetable fiber and its structural composition (content of hemicellulose, cellulose and lignin). Additionally, it is mentioned that the obtaining of composite materials is extremely influenced by the costs of the raw material as well as the availability of the same in nearby areas and close to the site of its processing.

Keywords: biocomposite, waste, lignocellulosic material, post-industrial plastic, fiber.

INTRODUCCIÓN

Uno de los temas de mayor interés a nivel mundial es el desarrollo de nuevos productos que disminuyan la presión ambiental ejercida por el uso de materiales tradicionales. Con relación a esto, los biocompuestos (BC) emergen como una alternativa sostenible para aprovechar diversos tipos de biomasa residual y polímeros sintéticos (Correa *et al.*, 2019). Los BC se investigan con la necesidad de generar materiales biodegradables que: i) ayuden a la conservación de materias primas de origen fósil, ii) reduzcan el volumen de dióxido de carbono asociado al ciclo de vida de materiales poliméricos, y iii) que permitan utilizar residuos agrícolas (Nagalakshmaiah *et al.*, 2019). Las fibras vegetales presentan características como alta biodegradabilidad, bajo costo, baja densidad y altas propiedades mecánicas. Estas últimas, en conjunto con: i) la interacción físicoquímica fibra/matriz, ii) la polaridad y topografía de la superficie de la fibra, iii) la disponibilidad de grupos funcionales reactivos en el refuerzo, iv) la humedad, y v) la porosidad, afectan directamente las propiedades mecánicas y térmicas de un BC (Chaitanya *et al.*, 2019).

En el procesamiento de BC se emplean las mismas técnicas diseñadas para procesar plásticos, entre las cuales se encuentran principalmente el moldeo abierto, la extrusión, el moldeo por inyección, moldeo por compresión y la composición de moldes de lámina (Nagalakshmaiah *et al.*, 2019). Como resultado, se obtiene un material con mejoras interesantes en el rendimiento de sus propiedades mecánicas de tracción, flexión e impacto, del mismo modo que en sus propiedades térmicas de degradación y cristalinidad. De acuerdo a sus propiedades, los BC pueden usarse en diferentes áreas destacándose la fabricación de dispositivos biomédicos, materiales de relleno (perfiles y estibas), revestimientos arquitectónicos no estructurados y productos para el hogar (interior o exterior) (Ramesh *et al.*, 2017; Ramakrishnan *et al.*, 2019; Le Duigou *et al.*, 2019; Dahy, 2017).

La generación de residuos en Colombia se basa en la producción de material lignocelulósico, plásticos, textiles, llantas, vidrio, papel y metales. Según el último inventario de energías renovables realizado, anualmente en Colombia se producen aproximadamente 72 millones de toneladas de residuos lignocelulósicos (Marrugo *et al.*, 2019), de los cuales se generan 193,000 toneladas de estopa de coco (Trujillo *et al.*, 2013) y 30,300 toneladas de cisco de café. Por su parte, la generación de residuos plásticos se puede obtener a partir de la producción anual de este tipo de industria, generándose 3.7 millones de toneladas/año (Gómez, 2010; Superintendencia de Sociedades, 2013).

En la actualidad, los residuos lignocelulósicos y plásticos son dispuestos en rellenos sanitarios, teniendo en cuenta que en Colombia no existe normatividad alguna que promueva la separación en la fuente y el aprovechamiento de este tipo de material. Los rellenos sanitarios son espacios utilizados para la disposición final de residuos, confinándolos en un área determinada mediante su compactación (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2018). La principal problemática relacionada a este tipo de sistema se presenta en la sobrecarga del relleno, debido a la velocidad de crecimiento poblacional así como del aumento proporcional en la demanda de alimentos, plásticos y textiles.

Con el fin de disminuir la cantidad de residuos dispuestos en rellenos sanitarios, se investigan diferentes alternativas para su aprovechamiento. Se ha estudiado su uso como materia prima en la industria biotecnológica, en la generación de nuevos materiales útiles para el sector de la construcción, y en la obtención de energía (Das *et al.*, 2019). Una de las alternativas estudiada a nivel mundial, es el aprovechamiento de plásticos pos consumo y residuos lignocelulósicos a partir de la obtención de materiales compuestos (Zuccarello *et al.*, 2018). Este tipo de materiales son comúnmente llamados biocompuestos y se pueden producir mediante el mezclado de diferentes matrices poliméricas y refuerzos fibrosos. En Colombia, a pesar que existen diferentes estudios relacionados con la obtención de materiales compuestos, no se ha logrado encontrar alguno que vincule la obtención de dicho producto con la mezcla de matrices y refuerzos como: el polipropileno, polietileno de alta densidad, estopa de coco y cisco de café.

Por todo lo anterior se plantea la siguiente pregunta de investigación: ¿Qué condiciones permiten definir la obtención de biocompuestos mediante un proceso de extrusión, como una alternativa viable para el aprovechamiento y valorización de la estopa de coco, el cisco de café, el polipropileno y el polietileno de alta densidad pos industrial generados en el territorio colombiano?

Este trabajo presenta diferentes justificaciones entre las cuales se encuentra: i) un punto de vista científico – técnico por medio del desarrollo de conocimiento y generación de información que sirva como base para trabajos de investigación o profundización futuros en la producción de materiales compuestos a partir de residuos lignocelulósicos y poliméricos, así como condiciones de operación en el proceso utilizado para su elaboración, ii) una perspectiva académica, al generar nuevo conocimiento en alternativas de aprovechamiento de residuos lignocelulósicos y plásticos, que contribuya a la formación de estudiantes de pregrado, posgrado, y comunidad académica en general, iii) un sustento económico, ya que se da valor agregado a este tipo de residuos, así como la producción de nuevos materiales que contribuyan al desarrollo del sector comercial y productivo colombiano, iv) sentido social, mediante la promoción e impulso de una industria que a futuro pueda generar nuevos empleos para la población colombiana, generar conciencia social de separación en la fuente y fomentar iniciativas en la creación de microempresas dedicadas a la producción de materiales compuestos, y v) compromiso ambiental, al promover la reducción en el volumen y carga de residuos que llegan a los diferentes rellenos sanitarios del país.

OBJETIVOS

Para este trabajo se ha propuesto un objetivo general y cuatro objetivos específicos, los cuales se mencionan a continuación.

Objetivo General

Obtener y caracterizar materiales compuestos madero plásticos a partir de la mezcla de residuos lignocelulósicos (estopa de coco y cisco de café) y plásticos pos industriales (polipropileno y polietileno de alta densidad) generados en el territorio colombiano, con el fin de estimar su factibilidad técnico-económico-ambiental.

Objetivos Específicos

- Estimar las propiedades mecánicas, físicas y termoquímicas de los residuos utilizados en la obtención de materiales compuestos.
- Evaluar el efecto del tamaño de partícula, relación de mezcla matriz:refuerzo y uso de agente ligante, en las propiedades mecánicas, físicas y termoquímicas de los materiales compuestos producidos.
- Establecer un proceso de obtención de materiales compuestos madero plásticos y las condiciones óptimas de operación por simulación.
- Determinar la factibilidad técnico-económico-ambiental del proceso de obtención de compuestos madero plásticos por simulación.

HIPÓTESIS

Analizando el planteamiento del problema y dando respuesta a la pregunta de investigación, se propone la siguiente hipótesis:

El mejoramiento de las propiedades fisicoquímicas, mecánicas y térmicas de los biocompuestos obtenidos a partir de residuos provenientes del procesamiento del coco (estopa de coco), café (cisco), y polímeros pos industriales como lo son el polipropileno y polietileno de alta densidad, permiten sustentar la viabilidad de esta alternativa de aprovechamiento y valorización de residuos.

Referencias

- Chaitanya S., Singh I. and Song J. I. (2019). Recyclability analysis of PLA/Sisal fiber biocomposites. *Composites Part B*. 173, Artículo 106895. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.106>.
- Correa J. P., Montavo J. M. and Hidalgo M. A. (2019). Carbon footprint considerations for biocomposite materials for sustainable products: A review. *Journal of Cleaner Production*. 208, 785 – 794. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.099>.
- Dahy H. (2017). Biocomposite materials based on annual natural fibres and biopolymers – Design, fabrication and customized applications in architecture. *Construction and Building Materials*. 147, 212 – 220. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.079>.
- Das S., Lee S. H., Kumar P., Kim K., Lee S. S. and Bhattacharya S. S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 228, 658 – 678. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323>.
- Gómez, D. (2010). Análisis estructural del sector estratégico de los plásticos. Universidad del Rosario. Bogotá. Colombia.
- Le Duigou A., Barbé A., Guillou E. and Castro M. (2019). 3D printing of continuous flax fibre reinforced biocomposites for structural applications. *Materials and Design*. 180, Artículo 107884. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107884>.
- Marrugo G., Valdés C. F., Gómez C. and Chejne F. (2019). Pelletizing of Colombian agro-industrial with crude glycerol. *Renewable Energy*. 134, 558 – 568. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.004>.
- Nagalakshmaiah M., Afrin S., Malladi R. P., Elkoun S., Robert M., Ansari M. A., Svedberg A. and Karim Z. (2019). Chapter 9 – Biocomposites: Present trends and challenges for the future. G. Koronis and A. Silva. *Green Composites for Automotive Applications* (pp. 197 – 215). Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering. Doi: 10.1016/B978-0-08-102177-4.00009-4.
- Ramakrishnan K. R., Le Moigne N., De Almeida O., Regazzi A. and Corn S. (2019). Optimized manufacturing of thermoplastic biocomposites by fast inductionheated compression moulding: influence of processing parameters on microstructure development and mechanical behavior. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, In pres, accepted manuscript. Artículo 105493. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105493>.
- Ramesh M., Palanikumar K., and Hemachandra R. K. (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79, 558 – 584. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>.

Superintendencia de Sociedades. (2013). Desempeño del sector textil, confección 2008-2012: Informe. Delegatura de Asuntos Económicos y Contables, Grupo de Estudios Económicos y Financieros, Bogotá. Colombia.

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2018). Informe de disposición final de residuos sólidos – 2017, Bogotá. Colombia.

Trujillo A. F. and Arias L. S. (2013). The coconut, a renewable resource for the design of Green materials. *Entre Ciencias e Ingeniería*. 14, 93 - 100. Disponible en <https://revistas.ucp.edu.co/index.php/entrecienciaeingenieria/article/view/637>.

Zuccarello B., Marannano G. and Mancino A. (2018). Optimal manufacturing and mechanical characterization of high performance biocomposites reinforced by sisal fibers. *Composites Structures*. 194, 575 – 583. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.007>.

CAPÍTULO 1. APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS LIGNOCELULÓSICOS Y PLÁSTICOS EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS

1.1. Resumen

El aumento de la población mundial ha generado consigo incrementos en el consumo de alimentos y elementos básicos para el bienestar de las personas. Esta tendencia se encuentra directamente relacionada con una mayor generación de residuos sólidos, principalmente de origen biomásico (residuos lignocelulósicos) y plásticos residuales (pos industrial o pos consumo). Debido al aumento constante en la generación de residuos, se han desarrollado diferentes alternativas de manejo, con el fin de darles un uso adecuado. Entre estas se destacan los procesos de transformación termoquímica y bioquímica, así como la obtención de materiales compuestos. En Colombia, se producen grandes cantidades de residuos, destacándose los subproductos de la industria del coco (estopa de coco) y la industria cafetera (cisco de café), así como los materiales residuales generados por la industria de los plásticos (plástico pos industrial). El objetivo de este capítulo es caracterizar cuatro tipos de residuos asociados a las industrias mencionadas anteriormente, dos de origen vegetal (cisco de café – CCa - y estopa de coco - SC) y dos de origen petroquímico (Polipropileno – PPR - y polietileno de alta densidad – PEADR - pos industrial), con el fin de estimar su potencial para la obtención de materiales compuestos. Todos los residuos fueron caracterizados por análisis próximo, último, poder calorífico y termogravimetría. Adicionalmente, el PPR y PEADR fueron caracterizados por ensayos mecánicos de tracción, flexión, impacto y por calorimetría diferencial de barrido (DSC). Por su parte, el CCa y la SC, fueron analizados estructuralmente. Entre los resultados obtenidos, se destaca la alta proporción de celulosa y de material volátil presente en el CCa (33.4 y 83.1%, respectivamente), su bajo contenido de humedad (11.6%), así como una mayor relación O/C y de aspecto (RA) (0.61 y 2.22, respectivamente) en comparación con la SC (Celulosa: 22.2%, Materia volátil: 73.1%, O/C: 0.54, RA: 1.98). Así mismo, el CCa presentó una mayor temperatura de degradación para la hemicelulosa (354°C) en contraste con la SC (308.5°C). Para el caso del material polimérico, se determinó una mayor resistencia a la tracción y flexión para el PPR (38.68 y 37.81 MPa, respectivamente) al compararlo con el PEADR (25.93 y 17.19 MPa, respectivamente), caso contrario de la temperatura y porcentaje de cristalización donde el PEADR arrojó valores más altos (117.2°C y 74.5%). Estas características inciden en una mejor dispersión del material vegetal, un mayor rendimiento en la adhesión del refuerzo a la matriz polimérica y bajos impactos asociados a la corrosión de equipos. De igual forma, disminuyen el grado de dificultad en el procesamiento de las fibras y la transformación de la energía.

1.2. Marco Teórico

La población mundial genera 4493 millones de ton/año de residuos sólidos municipales, de los cuales 160 millones de ton/año son aportadas por Latinoamérica. En Colombia, se estima una producción aproximada de 25,000 ton/día, siendo la fracción orgánica y los residuos plásticos dos de los componentes que se generan en mayor proporción (54 y 12%, respectivamente) (Martínez, 2016). Adicionalmente, se debe tener en cuenta el aporte de la actividad industrial, principalmente del sector agropecuario y manufacturero.

1.2.1. Producción nacional de residuos lignocelulósicos y plásticos

La biomasa residual se define como un compuesto, el cual contiene principalmente material vegetal no comestible denominado lignocelulosa. La lignocelulosa es el componente de mayor importancia encontrado en tejidos vegetales y se compone de tres diferentes polímeros: celulosa, hemicelulosa y lignina. Cada uno de estos componentes se presenta de forma distinta en la estructura, siendo la hemicelulosa la matriz que

cubre el esqueleto de celulosa y la lignina el material incrustante o capa protectora (Amin et al., 2017). Por su parte, un residuo plástico se define como el material recuperado por los usuarios finales tras haber cumplido con el uso para el cuál se produjo (Letcher, 2020). Este tipo de residuo se clasifica en dos categorías: plástico post consumo y post industrial. La primera hace referencia a los plásticos residuales que han sido utilizados previamente por las personas. En cambio, los plásticos post industriales o pre consumo, se definen como el material de rechazo industrial (cortes, lotes dañados, entre otros) que no es devuelto a la línea de producción. Estos son reciclados en gran medida, debido a la alta disponibilidad que existe y su relativo grado de pureza (Huysman *et al.*, 2017).

En el mundo se generan aproximadamente 1.6 billones de Toneladas/año de residuos biomásicos como resultado de actividades agrícolas (Freitas *et al.*, 2021) y 230 millones de Toneladas/año de residuos plásticos (Berto *et al.*, 2017), relacionados a la producción de estos materiales. Para el caso de Colombia, se reporta una producción aproximada de 72 millones de Toneladas/año de biomasa residual (Marrugo *et al.*, 2019). Cultivos tales como el plátano, banano, maíz y caña de azúcar, aportan en gran proporción a esta cifra. Por otro lado, la demanda nacional de resinas plásticas se encuentra cercana a 1.2 millones de Ton/año (Acoplásticos, 2017), de las cuales son recuperadas cerca del 26% (Perilla, 2017). El resto del material es dispuesto en rellenos sanitarios o de manera inadecuada en botaderos a cielo abierto. En las Tablas 1.1 y 1.2 se presentan la generación de residuos para las resinas plásticas y los principales cultivos agrícolas en Colombia, respectivamente. Según esta información, los plásticos residuales que se producen en mayor proporción son el polipropileno y el policloruro de vinilo (240 y 220 Ton/año, respectivamente).

Tabla 1. 1. Generación de residuos plásticos en Colombia

Tipo de resina	^a Demanda nacional (Ton/año)	^a Masa del residuo (Ton/año)
Policloruro de vinilo	220000	159500
Poliestirenos	78000	56550
Polietileno de baja densidad	119000	86275
Polietileno de alta densidad	160000	116000
Polímeros de propileno	240000	174000
Tereftalato de polietileno	163000	118175

^a Datos obtenidos de Acoplásticos 2017

Por otro lado, se resalta la biomasa residual asociada al cultivo de caña de azúcar como el material generado en mayor cantidad (25 millones de Ton/año, aproximadamente), seguido del cultivo de plátano y palma de aceite (3.5 y 3 millones de Ton/año aproximadamente).

Tabla 1. 2. Generación de residuos lignocelulósicos en Colombia

Cultivo	^a Producción [Ton/año]	Tipo de Residuo	^b Factor de residuo [Ton _{residuo} /Ton _{producto principal}]	Masa de residuo [Ton/año]
Palma de Aceite	3039637	Cuesco	0.22	401232.1
		Fibra	0.63	1148982.8
		Raquis de Palma	1.06	1933209.1
Caña de Azúcar	24811681	Hojas - Cogollo	3.26	10110760.0
		Bagazo	2.68	8311913.1
Café	850500	Pulpa	2.13	1811565
		Cisco	0.21	178605
		Tallos	3.02	2568510
Maíz	1293975	Rastrojo	0.93	1203396.8
		Tusa	0.27	349373.3
		Capacho	0.21	271734.8
Arroz	2243981	Tamo	2.35	5273355.4
		Cascarilla	0.2	448796.2
Banano	2026828	Raquis de Banano	1	2026828
		Vástago de Banano	5	10134140
		Cáscara	0.3	608048.4
Plátano	3526925	Raquis de Plátano	1	3526925
		Vástago de Plátano	5	17634625
		Cáscara	0.3	1058077.5
Coco	129956	Estopa	* 0.35	45484.6

^a Datos obtenidos del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, ^b Datos obtenidos de Ministerio de Minas y Energía, 2010, *Dato obtenido de Alvarado *et al.*, 2008.

1.2.2. Materiales compuestos

Un material compuesto se define como el resultado de la combinación entre dos o más materiales. Así mismo, la unión de dos o más fases distintas genera un compuesto sin que exista reacción química. Estos materiales presentan mejoras en comparación con los componentes que los conforman y se diferencian de otras mezclas, como las aleaciones, ya que cada material retiene sus propiedades por separado. Algunas de las ventajas de los compuestos sobre los materiales convencionales monolíticos (no reforzados) son la baja densidad, la alta resistencia y rigidez (Campbell, 2010; Kutz, 2015).

Las fases que conforman un material compuesto son denominadas como matriz y refuerzo. El refuerzo es el componente que proporciona la fuerza, resistencia y rigidez, mientras que la matriz es la fase continua que mantiene la orientación y espaciado del material reforzante. Generalmente, las fibras o los elementos particulados son los refuerzos utilizados con mayor frecuencia en la obtención de materiales compuestos. Por su parte, la matriz puede ser un material polimérico, metálico o cerámico, e incide en la clasificación de los compuestos. Las principales categorías de materiales compuestos son: de matriz polimérica (CMP), matriz metálica (CMM), matriz cerámica (CMC) y matriz de carbono (CMCa) (Campbell, 2010). En un material compuesto, las propiedades de la matriz varían según el proceso de fabricación utilizado y los

cambios de temperatura a los cuales se someten. Así mismo, al ser materiales heterogéneos y anisotrópicos, sus propiedades varían entre un punto y otro, y según la orientación del refuerzo (Kutz, 2015).

Habitualmente, los compuestos de matriz polimérica se componen de materiales viscoelásticos de baja rigidez y relativamente débiles, siendo los polímeros termoestables y termoplásticos los más utilizados como elemento litigante. Por su parte, las fibras son los refuerzos de mayor incidencia en el mejoramiento de propiedades mecánicas como la resistencia y rigidez de los CMP. En el caso de los compuestos de matriz metálica, los materiales empleados con mayor frecuencia como fase estructural son las aleaciones tradicionales como las de aluminio, titanio y hierro. Entre las propiedades de este tipo de componentes se encuentra la alta ductilidad, su comportamiento elástico – plástico, y el presentar una resistencia y rigidez intermedia. Por el contrario, las matrices cerámicas son de naturaleza frágil, altamente sensibles a cambios en sus propiedades según los procesos de transformación a los cuales son sometidas. Adicionalmente, la incorporación de fibra en este tipo de matrices, genera una disminución en su resistencia. El carbón es un tipo de material de naturaleza semejante a las cerámicas. Es una matriz frágil y débil, que presenta una conductividad térmica variable dependiendo del tipo de carbón y los procesos precursores a los cuales pueden ser sometido (Kutz, 2015).

Existen tres tipos principales de refuerzos empleados en la obtención de materiales compuestos: las fibras continuas, las fibras discontinuas y las partículas. Las principales diferencias entre las fibras continuas y las discontinuas son su relación de aspecto y orientación. Se entiende por relación de aspecto el cociente entre la longitud y el diámetro de una fibra, y por orientación el sentido en el cual se organiza un refuerzo en la matriz (Ver Figura 1.1). Con base a lo anterior, una fibra continua se puede definir como un elemento de relación de aspecto larga y orientación definida (unidireccional), diferente de una discontinua la cual presenta una relación de aspecto corta con orientación aleatoria. Otro tipo de refuerzo son las partículas, definidas como compuestos con dimensiones aproximadamente iguales en todas las direcciones. Estas pueden ser esferas, en forma de plaquetas o de cualquier otra geometría regular o irregular. Tienden a ser más débiles y menos rígidas que las fibras continuas, aunque generalmente son menos costosas. Las dificultades de su procesamiento y fragilidad, hace que se incorporen en menor proporción (40 – 50% volumen) para la obtención de materiales compuestos (Campbell, 2010).

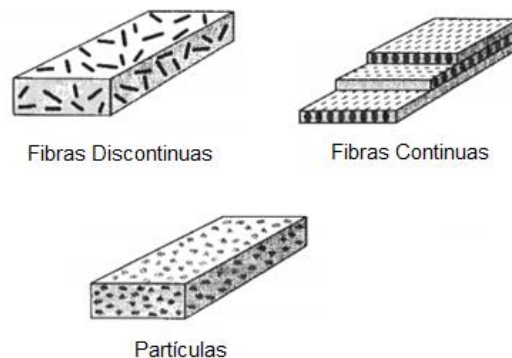


Figura 1. 1. Orientación de los refuerzos empleados en la obtención de materiales compuestos (Kutz, 2015).

A su vez, existen diferentes tipos de fibras utilizadas en la producción de materiales compuestos: fibras artificiales y de origen biológico (Ver Figura 1.2). Entre las fibras artificiales se encuentran i) la fibra de vidrio, usada principalmente para reforzar polímeros, ii) la fibra de carbono o grafito, utilizada como

refuerzo de todo tipo de matriz y con características muy específicas como su alta rigidez, baja densidad, alta resistencia a la fluencia, tensión de ruptura, fatiga y ambientes corrosivos, iii) la fibra de boro, usada en compuestos de matriz polimérica y metálica, iv) la fibra a base de alúmina y carburo de silicio, empleadas como reforzante de metales y cerámicas, v) la fibra de aramida, útil como refuerzo de polímeros y cemento, vi) las fibras de polietileno de alta densidad, las cuales son susceptibles a variaciones en sus propiedades por cambios de temperatura y carga, y vii) la fibra de basalto, de mucha utilidad por su resistencia al fuego y alto punto de fusión (Kutz, 2015). Por su parte, las fibras de origen biológico, principalmente las obtenidas de tejidos vegetales, hacen parte de la nueva generación de refuerzos renovables para la fabricación de materiales compuestos de matriz polimérica. Este tipo de elementos son atractivos por su alta disponibilidad, su biodegradabilidad, baja densidad y costo. Estas a su vez se pueden clasificar según su origen en: i) fibras de vástago, hoja, fruto/semilla y tallo de plantas, ii) fibra de hierba/pastos o fibra de madera. Las fibras de vástago son materiales largos con alta resistencia mecánica, extraídas de la parte exterior del pedúnculo de las plantas mediante un proceso de retractilado y degradación química o biológica de este tejido. Como ejemplo de este tipo de fibra se encuentra las fibras de yute, lino, cáñamo, plátano, soja, ramio, lino y kenaf. Las fibras de hoja son extraídas mediante raspado manual o mecánico luego de un pretratado de batido/rebozado. Son tejidos gruesos y duros con una resistencia relativamente alta, entre los que se destacan principalmente la fibra de hoja de piña, sisal, henequén y palma, entre otras. Las fibras de frutos/semillas son livianas y resistentes, siendo la estopa de coco, cascarilla de arroz, seda y algodón algunas de las más utilizadas. Por otro lado, los cultivos que generan un mayor aporte en la obtención de fibras a partir de tallos son el maíz, la caña de azúcar, la berenjena, el girasol, la cebada, el arroz y el trigo (Ramesh *et al.*, 2017).

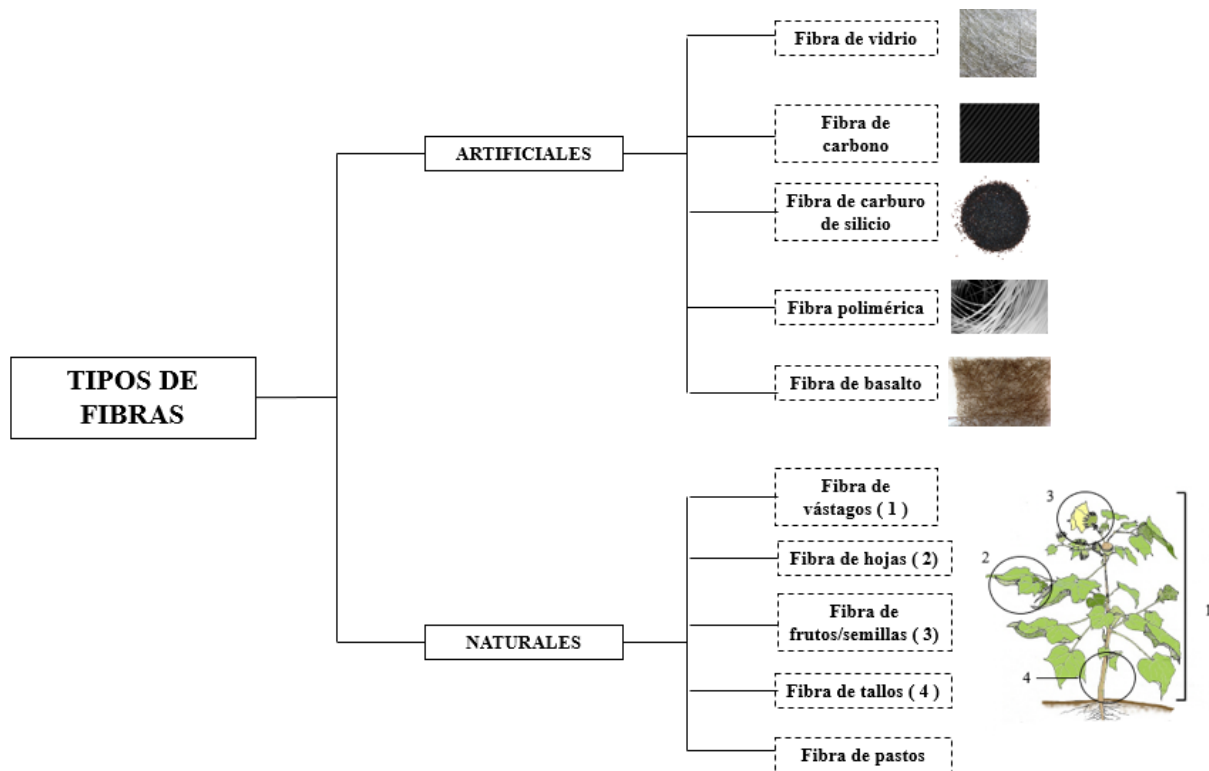


Figura 1. 2. Clasificación de las fibras (Kutz, 2015; Ramesh *et al.*, 2017).

1.2.3. Usos y aplicaciones de los materiales compuestos

Los refuerzos que generan mejores propiedades en materiales compuestos son las fibras continuas unidireccionales debido a su eficiencia estructural. Sin embargo, los refuerzos discontinuos son utilizados ampliamente gracias a la disponibilidad de procesos de transformación de bajo costo. Haciendo énfasis en las fibras continuas, el compuesto de matriz polimérica de mayor uso y fabricación, debido a sus propiedades, desarrollo, recorrido y bajo costo, es el poliéster o la resina de vinilester reforzada con fibra de vidrio. Por su parte, el reforzar este tipo de matriz con carbono hace más costosa su fabricación, por lo cual sus aplicaciones son restringidas y de alto rendimiento. En el caso de los compuestos de matriz metálica, el material más notable se compone de aluminio reforzado con fibra de alúmina (Kutz, 2015). Este tipo de material es muy utilizado en líneas de transmisión debido a su alta rigidez y resistencia específica. Existen diferentes tipos de materiales compuestos con una gran variedad de aplicaciones. En la Tabla 1.3 se presentan algunos materiales compuestos obtenidos de diferentes matrices y refuerzos, así como su aplicación o usos.

Tabla 1. 3. Materiales compuestos de fibra continua.

Matriz	Refuerzo	Uso
Polímero	Fibra de vidrio	<p><i>Aeroespacial:</i> lanzadores de cohetes, armaduras balísticas, lanchas patrulleras, revestimientos de aeronaves, pisos, interiores y contenedores de carga.</p> <p><i>Industrial:</i> elementos de trenes, camiones y remolques, palas de turbina eólica, barcos, tanques y tuberías, componentes de construcción, varillas de hormigón, equipos de cirugía endoscópica, productos de aislamiento eléctrico.</p> <p><i>Consumo:</i> equipos deportivos, cabinas de ducha, bañeras, componentes de automóvil, vehículos recreativos.</p>
	Fibra de carbono	<p><i>Aeroespacial:</i> aviones militares y comerciales, álabes de ventiladores de turbina, antenas satelitales, naves, sistemas optomecánicos.</p> <p><i>Industrial:</i> tanques de gas natural comprimido, equipos de rayos x, antenas, celdas de combustible, prótesis, estructuras e interiores de trenes, reparación y refuerzo de estructural civiles</p> <p><i>Comercial:</i> equipos deportivos, cañas de pescar, auriculares, componentes de automóviles, instrumentos musicales</p>
	Aramida	Blindaje balístico, cascos, frenos y otras partes de fricción, canoas, yates de lujo
Aluminio	Carburo de silicio	<p><i>Aeroespacial:</i> puertas de acceso de combustible de reemplazo, aletas ventrales, aletas de motor de turbina de gas</p> <p><i>Comercial:</i> piezas estructurales y mecánicas para bicicletas, palos de golf, bates de béisbol, piezas para máquinas de alta velocidad, sistemas ópticos, componentes mecánicos automotrices</p>
	Carburo de boro	Contenedores de combustible nuclear
Carbono	Fibra de carbono	<p><i>Aeroespacial:</i> boquillas de cohetes, conos de salida de cohetes, puntas de la nariz de vehículos de entrada a las estaciones espaciales.</p> <p><i>Industrial:</i> equipos de fabricación de vidrio, bastidores de tratamiento térmico, frenos y embragues de automóviles y motocicletas de carrera.</p>

Fuente: Tomado de Kutz, 2015.

A nivel industrial, los materiales compuestos reforzados con fibras vegetales ocupan un espacio importante en distintas áreas. Hoy en día, este tipo de materiales tiene aplicaciones avanzadas al ser usadas en edificaciones y partes internas de vehículos automotores. De igual forma, los biomateriales se han convertido en elementos de gran importancia para la medicina regenerativa, utilizándose en suturas, articulaciones de la cadera, apósitos para heridas, lentes de contacto, entre otros dispositivos biomédicos. Cabe mencionar que las fibras vegetales ocupan un lugar importante como materiales de relleno útiles a nivel industrial (Ramesh *et al.*, 2017). Entre los principales usos como material de relleno, se encuentra la fabricación de perfiles y estibas. Estos productos son requeridos por diferentes industrias, estandarizando su dimensionamiento según los requerimientos o función a realizar (transporte de materias primas, soporte para el almacenamiento de las mismas, entre otras) (Sun, 2018). Por sus características como durabilidad, alta resistencia y bajos requerimientos de mantenimiento, los materiales reforzados con tejido vegetal son usados comúnmente en zonas de clima húmedo. Igualmente, se emplean en el revestimiento arquitectónico no estructurado de paredes y pisos, así como en la fabricación de muebles para exteriores, productos para el hogar y elementos antideslizantes de escaleras y rampas, (Dahy, 2017; Sun, 2018).

1.2.4. Estudios realizados en aprovechamiento de residuos

Existen diferentes estudios relacionados al aprovechamiento de residuos, analizando este problema desde áreas distintas. Se ha planteado un gran número de tratamientos para dar valor agregado a este tipo de material o simplemente cambiar sus características y hacer más sencilla su disposición final (Das *et al.*, 2019). Entre las principales áreas estudiadas para el aprovechamiento de residuos se encuentra la nutrición animal y humana, la generación de energía, la industria biotecnológica y los materiales compuestos. La utilización de residuos como fuente alternativa de alimentación animal, resulta en una buena forma de minimizar la contaminación ambiental y de obtener nuevos productos que aporten nutrientes y mejoren la calidad de vida de las especies (Sousa *et al.*, 2018; Shirahigue y Antonini, 2020). Por otro lado, las corrientes secundarias de las centrales de sacrificio (sangre, pezuñas, huesos, plumas) pueden ser empleadas en alimentación animal. Las plumas, por ejemplo, contienen una cantidad significativa de proteína, por lo cual deben ser vistas como un material valioso y útil como alternativa bioeconómica (Saarela *et al.*, 2017). Así mismo, es importante mencionar el aporte nutricional que hace otro tipo de biomasa como la algal. El aceite extraído de algas puede ser un material adecuado para su uso como suplemento de lípidos y fuente de ácidos grasos esenciales en alimento para animales, en especial los monogástricos (peces, aves de corral y cerdos). El presentar rendimientos significativos en proteínas y lípidos, hace de esta biomasa un material con alto potencial para establecerse en el mercado de alimentos básicos de valor medio (semillas oleaginosas, soja, canola, maíz) (Sousa *et al.*, 2018).

Los residuos biomásicos pueden aportar varios nutrientes necesarios para la salud, como vitaminas, minerales, fibras, carbohidratos y proteínas. La mayoría de los residuos agroindustriales que contienen grasas, colorantes naturales, enzimas, pigmentos, antimicrobianos y antioxidantes son ingredientes alimentarios naturales, aditivos y suplementos de alto valor agregado que pueden ser reutilizados para la producción industrial en el desarrollo de nuevos productos alimenticios, convirtiéndose en una alternativa viable económica y ambientalmente (Freitas *et al.*, 2021).

La obtención de energía a partir de residuos es otro de los tipos de aprovechamiento estudiados. Se plantea la biomasa sólida y la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (RSU) como las principales materias primas en la generación de energía. Para su conversión en calor o electricidad, se utilizan diferentes procesos termoquímicos (combustión, pirólisis y gasificación) y bioquímicos (digestión anaerobia, transesterificación por biocatálisis) (Freitas *et al.*, 2021). La combustión es el proceso mayormente empujado para convertir biomasa en calor y energía, debido a su simplicidad. Es considerado un método poco amigable con el ambiente debido a su baja eficiencia, las emisiones generadas y la dificultad que presenta el manejo de las cenizas. Por su parte, la gasificación es el proceso más eficiente en la obtención de combustibles a partir de biomasa. Este tipo de tratamiento presenta dificultades por el alto costo de inversión, principalmente en el almacenamiento y transporte del gas producido. A diferencia de estos tratamientos, la pirólisis tiene un

mayor grado de aceptación debido al bajo costo de inversión, las altas eficiencias y el ser ambientalmente más amigable. Según las condiciones de operación, este tipo de proceso puede favorecer la producción de bio-char (pirólisis lenta) o bio-aceites (pirólisis rápida) (Guedes *et al.*, 2018). Los procesos termoquímicos también son utilizados para aprovechar los RSU sin clasificación alguna mediante incineración masiva, o por clasificación según sus características combustibles (sistema de quema de combustibles derivado de desperdicios) (Sahu y Prabu, 2021). La fracción no orgánica, en especial los plásticos residuales, pueden ser transformados termoquímicamente mediante pirólisis. Generalmente, este proceso se lleva a cabo a un ritmo de calentamiento rápido con temperaturas finales cercanas a los 700°C. Estas condiciones de proceso permiten obtener productos finales de mayor calidad y rendimiento, esto para el caso del gas y el líquido combustible generado (Das y Tiwari, 2018). Así mismo, este tipo de residuos puede tratarse mediante gasificación para la producción de energía y gas de síntesis. La corriente obtenida en este proceso se compone principalmente de H₂, CO, CO₂, CH₄ y N₂, dependiendo del tipo de agente gasificante empleado (aire o vapor). A diferencia de la pirólisis, la gasificación permite una mayor flexibilidad para valorar mezclas de plástico o conjuntos de plásticos de diferente composición. Así mismo, presenta dificultades por el alto contenido de alquitrán reportado en el producto gaseoso, haciendo necesario un tratamiento de este antes de ser empleado en procesos de producción química (Lopez *et al.*, 2018).

La biotecnológica es otra vía para aprovechar residuos, principalmente lignocelulósicos. Se plantean tres tendencias mundiales en lo que respecta a este tipo de procesos (Ver Figura 1.3): biotecnología blanca, relacionada al sector industrial (biomoléculas, biocombustibles, biocompósitos, entre otros), biotecnología verde o ingeniería de plantas, para la producción de macromoléculas o metabolitos utilizados en mejoramiento nutricional (ingredientes alimenticios) y en producción industrial (biorremediación, biofertilizantes, bioplaguicidas, fármacos, materiales), biotecnología roja o biotecnología médica, empleada en la investigación y desarrollo de productos medicinales y para el cuidado de la salud (biofármacos, mejoramiento genético, alimentos funcionales, entre otros) (Almeida *et al.*, 2011; Heux *et al.*, 2015; Van de Wiel, 2016).

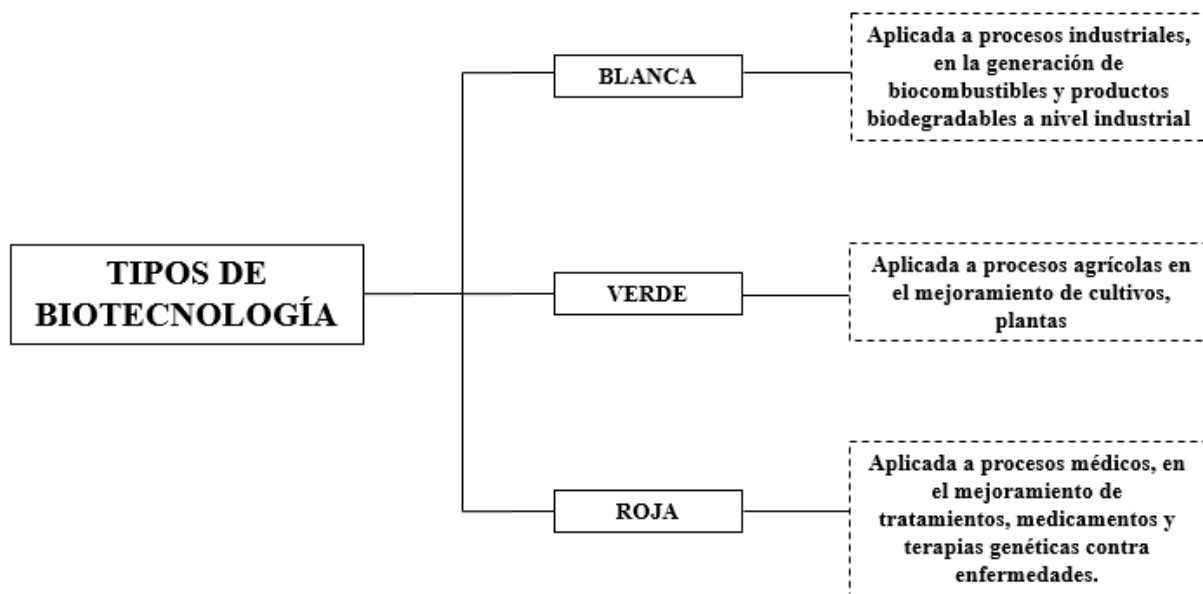


Figura 1. 3. Tipos de biotecnología (Almeida *et al.*, 2011; Heux *et al.*, 2015; Van de Wiel, 2016).

En la biotecnología industrial, o biotecnología blanca, se presentan dos procesos de gran importancia: la fermentación y la biocatálisis. La fermentación industrial se entiende como las operaciones de proceso aerobios o anaerobios que generan cambios químicos en un sustrato orgánico mediante la acción de organismos vivos o enzimas microbianas, obteniendo productos como los ácidos orgánicos, alcohol etílico y dióxido de carbono (Lokko *et al.*, 2018). Por su parte la biocatálisis o catálisis enzimática, hace referencia a la utilización de enzimas como catalizadores de reacciones o transformaciones que permiten obtener productos de interés. Este proceso es empleado en diferentes sectores de la industria como la alimentaria, química, textil, papelería y farmacéutica, principalmente (Costa *et al.*, 2021). En lo que respecta a la biotecnología verde, se abarcan temas como la modificación de genomas, la tecnología de transformación clásica (transgénicos), la aplicación de ARN interferencia y la biología sintética (Van de Wiel, 2016). Por otro lado, la biotecnología roja ha generado avances en el diagnóstico y prevención de enfermedades, así como nuevos métodos y procesos para la fabricación de productos de uso medicinal (Elsayed *et al.*, 2019). De esta manera el material orgánico residual se abre campo en áreas de investigación y desarrollo médico, como la ingeniería de tejido óseo, con el fin de encontrar nuevas estrategias y compuestos que permitan mejorar las desventajas que poseen los métodos tradicionales (Arslan *et al.*, 2017). Finalmente, se reporta un gran número de productos obtenidos a partir de procesos biotecnológicos, de los cuales se destacan principalmente alimentos balanceados para la nutrición animal, cultivos mejorados, animales, enzimas y microorganismos genéticamente modificados, productos microbiológicos, biosensores, biocombustibles y biomateriales (Freitas *et al.*, 2021).

Otro de los tratamientos utilizados para el aprovechamiento de residuos es la obtención de materiales compuestos, los cuales se pueden definir como aquellos materiales formados mediante la combinación de dos o más elementos constituyentes. Los materiales compuestos se pueden clasificar según el tipo de refuerzo empleado: partículas, fibras o material estructurante (Vaisanen, 2016). Entre las tecnologías utilizadas para su manufactura se encuentran el proceso de extrusión, moldeo por inyección y por compresión (Chaitanya *et al.*, 2019). Las propiedades de este producto varían teniendo en cuenta diferentes parámetros en el proceso productivo. Entre estos están el tamaño de partícula, la proporción y tipo de material reforzante utilizado, y la adición de agentes ligantes. Los materiales compuestos son usados en diferentes sectores productivos, entre los que se destacan el agrícola, industrial, construcción y decoración (Sun, 2018).

1.2.5. Procesos de fabricación de materiales compuestos

Para la producción de materiales compuestos se utilizan principalmente tres tipos de proceso: extrusión, inyección y compresión. El rendimiento y eficiencia de estas tecnologías está relacionado con diferentes parámetros de proceso y las características fisicoquímicas de las materias primas. En el caso particular de los biocompuestos, para su obtención se emplea, principalmente, un equipo de triturado y reducción de tamaño de partícula para las materias primas, y un equipo de extrusión útil en el mezclado y prensado de las mismas (Mahmud *et al.*, 2021).

Por otro lado, la producción de biocompuestos se puede dividir en tres diferentes componentes. El primero consta de las materias primas y la logística asociada a su obtención. El segundo componente hace referencia al procesamiento de materias primas, para lo cual se emplean sistemas de reducción de tamaño de partícula y tamizado de las mismas. Seguido a esto se encuentra un equipo de mezclado en seco y fusión de los materiales para permitir la dispersión del refuerzo en la matriz, siendo el moldeo por inyección, compresión y la extrusión las técnicas más empleadas. Finalmente, el tercer componente está relacionado con el almacenamiento y acondicionamiento del material compuesto (Piri *et al.*, 2018). Con relación al segundo componente, la extrusión es uno de los sistemas más empleados en la producción de biocompuestos. Se compone, principalmente, de tres zonas de proceso: 1. Zona de alimentación, donde se introduce la matriz polimérica y el refuerzo en estado sólido; 2. Zona de transición, sección en la cual se presenta la plastificación, el transporte y mezclado de los materiales; 3. Zona de dosificado, en donde ocurren los procesos de homogenización y presurizado del fundido para finalmente ser transportado y conformado a

través de la boquilla de salida. Así mismo, un extrusor se compone de una tolva alimentadora ubicada en la zona 1, un cilindro de calefacción en las zonas 2 y 3, un tornillo o husillo sin fin en estas mismas secciones, un cabezal y boquilla en la zona 3. Cada uno de estos elementos permite el funcionamiento adecuado de las secciones de proceso y del equipo en general (Beltrán y Marcilla, 2012a). Otro proceso empleado en la generación de biocompuestos es el moldeo por inyección. A diferencia de la extrusión, este tipo de tecnología permite moldear piezas empleando altas presiones. Es un sistema compuesto por dos etapas, una de fusión del material y la inyección del fundido en un molde específico. Estas etapas hacen parte del ciclo de inyección, el cual inicia con el cierre del molde, seguido del avance de la unidad inyectora así como los tiempos de llenado, compactación, retroceso de la unidad de inyección, enfriamiento, finalizando con la apertura del molde y la expulsión de la pieza. Las máquinas de inyección se diferencian entre sí por características específicas como la capacidad de inyección, plastificación, la presión de inyección y la fuerza de cierre (Beltrán y Marcilla, 2012b). Similar a la inyección, el moldeo por compresión emplea altas presiones y temperaturas para la obtención de artículos con bajos niveles de orientación. Es un sistema que consta principalmente de un molde y una prensa, los cuales calientan, comprimen y dan forma al material procesado. El ser considerado un proceso relativamente sencillo, le confiere ciertas ventajas frente a la inyección, de las cuales se destacan la baja generación de mermas producto de los recortes, la producción de piezas con buenas propiedades mecánicas y los bajos costos de implementación y operación (Beltrán y Marcilla, 2012c).

1.3. Métodos experimentales

1.3.1. Obtención y preparación de los residuos

Los residuos se obtuvieron de diferentes fuentes de generación. La estopa de coco se recolectó de dos empresas: la productora de confites Súper ubicada en la ciudad de Manizales, Caldas, la otra una empresa dedicada a la fabricación de helados, golosinas y bebidas de coco, identificada con el nombre de Kiero Coco, la cual se encuentra ubicada en la ciudad de Cali, Valle del Cauca. El cisco de café fue facilitado por una trilladora ubicada en la ciudad de Tuluá, Valle del Cauca. Por su parte, el polipropileno (PP) y el polietileno de alta densidad (PEAD) pos industrial se adquirieron del material residual producto de la extrusión e inyección de plásticos llevados a cabo en el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Occidente de la ciudad de Cali, Valle del Cauca. La cantidad de residuos lignocelulósicos que se reunió fue de 10 kg para la estopa de coco y el cisco de café. Por su parte, la cantidad de plástico pos industrial obtenido fue de 10 kg para el PP y el PEAD.

Como pretratamiento, la estopa de coco y el cisco de café fueron reducidos de tamaño empleando un molino de martillos artesanal elaborado por Penagos y Hermanos & CIA LTDA modelo TDV 24 (juego de seis martillos y un motor de 12 HP) (Figura 1.4), proporcionado por la granja de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Según procedimiento establecido e implementado por el personal operativo de la granja, los materiales fueron secados a la intemperie en bandejas metálicas, aprovechando la energía solar, antes de ser procesados. El tiempo de molienda osciló entre 15 y 30 minutos, dependiendo del tipo de residuo tratado. Para el caso del cisco de café bastó con 15 minutos de molienda, por su parte la estopa de coco, al ser un material más poroso y liviano, requirió de un mayor tiempo de residencia en el equipo de molienda. Una vez molido, el material fue tamizado en un equipo marca Soiltest, modelo CL - 313 – 8 proporcionado por el laboratorio de física de suelos de la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. En este proceso, se emplearon tamices US standard series número 40 – 200 (abertura 0.42 y 0.074 mm respectivamente) y 16 – 20 (abertura 1.19 y 0.84 mm correspondientemente), buscando obtener dos rangos de tamaño de partícula. Estos rangos se establecieron con base a la revisión bibliográfica realizada (0.045 – 1.31 mm, información reportada por López y Rojas (2018)), teniendo en cuenta que las propiedades de un biocompuesto varían de acuerdo al tamaño de partícula, los valores máximos y mínimos encontrados en la revisión y la disponibilidad de tamices para realizar la clasificación.



Figura 1. 4. Molino empleado para el triturado de las fibras vegetales.

En el caso de los residuos plásticos, se buscó obtener un material que simulara las características de un polímero pos industrial, para lo cual se planteó reprocessar una vez el material recuperado de la extrusión de polímeros vírgenes. Para esto se empleó un extrusor de doble husillo marca Simens (Figura 1.5) con las siguientes características: i) diámetro de tornillo: 22mm, ii) relación L/D del tornillo: 40:1, iii) zonas de calentamiento: 10, iv) volumen de la tolva alimentadora: 5 L, y v) carga máxima de salida: 20 kg/h. Las condiciones de proceso para el PP y PEAD se presentan en la Tabla 1.4 y fueron establecidas después de realizar análisis preliminares y manejo previo del equipo. Posterior a esto, los polímeros extruidos fueron triturados en un molino marca Shini modelo SG – 1621 (Figura 1.6) con el fin de reducir el tamaño de partícula del material, hasta alcanzar dimensiones cercanas a un pellet (1.6 – 6 mm). El extrusor y el equipo de moliendo fueron proporcionados por el Grupo de Investigación en Tecnología para la Manufactura (GITEM) de la Universidad Autónoma de Occidente. Las matrices poliméricas obtenidas, producto de la primera extrusión y molienda, fueron reprocessadas bajo las mismas condiciones operativas de los sistemas antes mencionados.



Figura 1. 5. Equipo de extrusión empleado en el procesamiento de polímeros.



Figura 1. 6. Equipo de molienda empleado en el procesamiento de polímeros.

Tabla 1. 4. Condiciones de proceso de extrusión de polímeros pos industriales

Parámetro	Condición	
	PP	PEAD
Perfil de temperatura	180 °C (zonas 1 – 2), 170 °C (zonas 3 – 7), 180 °C (zonas 8 – 10)	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)
Velocidad de tornillo	100 rpm	100 rpm
Velocidad de tornillo alimentador de polímero	10 rpm	10 rpm
Temperatura promedio de fundido	175°C	160°C
Corriente del tornillo	8 - 10 A	8 - 10 A
Presión de fundido	1.7 MPa	1.7 MPa

En la Figura 1.7 se presenta el diagrama del equipo extrusor empleado, ilustrando las zonas de calentamiento y la ubicación de los sistemas de alimentación de materia prima.

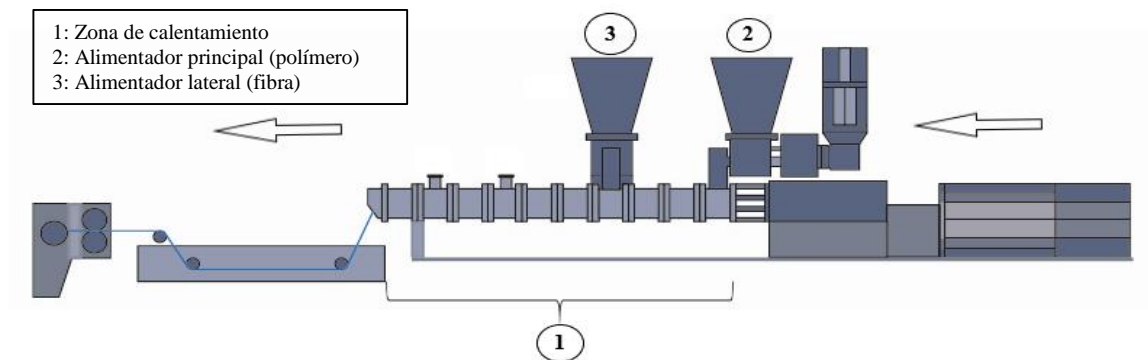


Figura 1. 7. Equipo extrusor empleado en el tratamiento de polímeros vírgenes.

1.3.2. Caracterización de los residuos

1.3.2.1. Residuos lignocelulósicos

Los residuos lignocelulósicos (estopa de coco y cisco de café) se caracterizaron por medio de análisis próximo, elemental, termogravimétrico (TGA), poder calorífico y composición química (lignina, celulosa, hemicelulosa y extractivos). De igual forma se cuantificó su densidad y relación de aspecto. Cada uno de estos análisis se realizó por triplicado utilizando un gramo de muestra. En el análisis próximo se calculó el contenido de material volátil (MV), humedad (H) y cenizas (Cz) presentes en los residuos, empleando una mufla proporcionada por el Laboratorio de Aprovechamiento de Residuos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. La humedad se estimó sometiendo el material a 105°C durante 24 horas, siguiendo el procedimiento ASTM E871. Las muestras fueron pesadas antes y después de ser expuestas a esta temperatura, con el fin de lograr calcular la cantidad de agua perdida por diferencia de peso empleando la ecuación 1.1. En el caso de las cenizas, las muestras fueron sometidas a la siguiente rampa de temperaturas, establecida en la norma NREL/TP – 510-42622: 105, 250 y 575°C durante 12, 30 y 180 minutos, respectivamente, empleando una velocidad de calentamiento de 10°C/min. Una vez finalizado el periodo de calentamiento, las muestras fueron enfriadas durante 4 horas hasta alcanzar una temperatura de 105°C. Posterior a esto, las muestras fueron pesadas y aplicando la ecuación 1.2 se logró calcular el porcentaje de cenizas. Para determinar el contenido de material volátil, los residuos fueron introducidos en un horno a 950°C durante 7 minutos, según el procedimiento ASTM E872. Culminado este tiempo, las muestras fueron sacadas del horno y llevadas a un desecador durante 20 minutos. Se tomó el peso de cada muestra y usando la ecuación 1.3 se midió el contenido de material volátil. El carbono fijo se obtuvo por diferencia entre la totalidad de la composición del residuo y las proporciones de humedad, cenizas y materia volátil. Para ello se utilizó la ecuación 1.4, reportada en la Tabla 1.5 al igual que el resto de ecuaciones antes mencionadas.

Tabla 1. 5. Ecuaciones empleadas en la determinación del análisis próximo de los residuos lignocelulósicos.

Parámetro	Ecuación
Humedad a 105°C	$\%H_{105} = \frac{PMF - PMS}{PMF} \times 100$ <i>Ec. 1.1</i>
Cenizas	$\%Cz = \frac{PCz - PC}{PMS} \times 100$ <i>Ec. 1.2</i>
Materia Volátil	$\%MV = \frac{PMS - PMD}{PMS} \times 100$ <i>Ec. 1.3</i>
Carbono Fijo	$\%CF = 100 - \%H_{105} - \%Cz - \%MV$ <i>Ec.1.4</i>
Poder Calorífico Superior	$PCS = 20.7999 - 0.3214 \frac{MV}{CF} + 0.0051 \left(\frac{MV}{CF}\right)^2 - 11.2277 \frac{Cz}{MV} + 4.4953 \left(\frac{Cz}{MV}\right)^2 - 0.7223 \left(\frac{Cz}{MV}\right)^3 + 0.0383 \left(\frac{Cz}{MV}\right)^4 + 0.0076 \frac{CF}{Cz}$ <i>Ec. 1.5</i>

Donde PMF es el peso de la muestra fresca (gr), PMS es el peso de la muestra seca (gr), PCz es el peso del crisol + cenizas (gr), PC es el peso del crisol y PMD es el peso de la muestra desvolatilizada (gr), PCS es el poder calorífico superior, MV es la materia volátil, CF es el carbono fijo y Cz es el contenido de cenizas

Por su parte, el análisis elemental establece el contenido de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), azufre (S) y nitrógeno (N). El contenido de C, H y N se obtuvo siguiendo la norma ASTM D5373-08 en un analizador elemental marca Leco CHN – 628. El contenido de azufre fue medido por medio de un sulfurómetro marca Leco S - 632 de acuerdo a lo establecido en la norma ASTM D4239, mientras que el oxígeno se obtuvo por diferencia. El poder calorífico superior (PCS) establece la cantidad de energía por unidad de masa que el residuo pueda entregar al oxidarse por completo. Dicha propiedad se halló haciendo uso de la ecuación 1.5 (ver Tabla 1.5), expuesta por Nhuchhen y Salam (2012).

El análisis estructural permite conocer la proporción de lignina (LGN), celulosa (CEL), hemicelulosa (HMC) y extractivos (EXT) presentes en los residuos. Para determinar el contenido de LGN, CEL y HMC, inicialmente se debe obtener muestras libres de extractivos. Estos elementos se encuentran conformados por una mezcla de compuestos orgánicos de características hidrofílicas y lipofílicas que se pueden extraer empleando solventes polares (agua, etanol, acetona) y no polares (éter de petróleo, benceno) (Theander, 1982). Los residuos biomásicos (estopa de coco y cisco de café) fueron sometidos a dos extracciones soxhlet, empleando agua y etanol como solventes según la metodología reportada por Ruales, 2015. Esta prueba se realizó por triplicado utilizando diez (10) gr de muestra. Inicialmente, el material es llevado a un equipo soxhlet con el fin de efectuar la extracción durante 24 horas, usando agua destilada como solvente. Posterior a esto, las muestras fueron secadas a 50°C durante 48 horas y se sometieron a una segunda extracción durante 24 horas utilizando como solvente etanol industrial. Los extractos obtenidos se llevaron a un roto evaporador bajo las siguientes condiciones operativas: 145 mbar de vacío, 60°C y 80 rpm para la mezcla en agua, 385 mbar de vacío, 60°C y 80 rpm para la mezcla en alcohol. En la Tabla 1.6 se presentan las ecuaciones 1.6, 1.7 y 1.8 empleadas para determinar la proporción de extractivos en agua, alcohol y totales, respectivamente.

Tabla 1. 6. Ecuaciones empleadas en la determinación de la composición química de los residuos lignocelulósicos.

Ecuación	No. Ecuación	Referencia
$\%EXT_{agua} = \frac{PEXT_{agua}}{PR \times \%MS} \times 100$	<i>Ec. 1.6</i>	Sluiter <i>et al.</i> , 2005
$\%EXT_{etanol} = \frac{PEXT_{etanol}}{PR \times \%MS} \times 100$	<i>Ec. 1.7</i>	Sluiter <i>et al.</i> , 2005
$\%EXT = \%EXT_{agua} + \%EXT_{etanol}$	<i>Ec. 1.8</i>	Sluiter <i>et al.</i> , 2005
$\%LGN = \frac{PLGN}{PR_{IEXT} \times \%MS} \times (100 - \%EXT)$	<i>Ec. 1.9</i>	Sluiter <i>et al.</i> , 2005; Sluiter <i>et al.</i> , 2012
$\%HCL = \frac{PHCL}{PR_{IEXT} \times \%MS} \times (100 - \%EXT)$	<i>Ec. 1.10</i>	Han y Rowell, 1997; Sluiter <i>et al.</i> , 2005
$\%CEL = \frac{PCEL}{PHCL} \times \%HCL$	<i>Ec. 1.11</i>	Han y Rowell, 1997
$\%HMC = \%HCL - \%CEL$	<i>Ec. 1.12</i>	Han y Rowell, 1997

Donde, %EXT es la proporción de extractivos totales, %EXT_{agua} es la proporción de extractivos en agua, %EXT_{etanol} es la proporción de extractivos en etanol, PEXT_{agua} es el peso de extractivos en agua (gr), PEXT_{etanol} es el peso de extractivos en etanol (gr), PR es el peso de la muestra seca (gr), %MS es el porcentaje de la materia seca, %LGN es la proporción de lignina, PLGN es el peso de la lignina (gr), PR_{IEXT} es el peso de la muestra libre de extractivos (gr), %HCL es la proporción de holocelulosa, PHCL es el peso de la holocelulosa (gr), %CEL es el porcentaje de celulosa, PCEL es el peso de la celulosa (gr), %HMC es la proporción de hemicelulosa.

Con las muestras libres de extractivos, se procedió a determinar las proporciones de LGN, CEL y HMC. La lignina es un compuesto orgánico de estructura y de composición poco clara, la cual varía dependiendo de su origen, método de extracción o aislamiento (Chávez – Sifontes y Domine, 2013). Para obtener la proporción de este compuesto en los residuos, se empleó el método referenciado por Han y Rowell (1997). Inicialmente, se pesó 200 mg de muestra libre de extractivos para cada tipo de biomasa, por triplicado. Se agregó 1 ml de H₂SO₄ al 72% (w/w) por cada 100 mg de muestra para ser llevadas, posteriormente, a un baño maría (30°C) durante 1 hora. Finalizado dicho procedimiento, cada muestra fue lavada con 56 ml de

agua destilada y llevada a un equipo de autoclavado bajo las siguientes condiciones: 121°C y 15 psi durante 1 hora. Al terminar este periodo de tiempo, las muestras fueron lavadas nuevamente con agua destilada y secadas a 30°C durante 24 horas en un horno. La ecuación 1.9 empleada para determinar la proporción de lignina en los residuos se presentan en la Tabla 1.6.

La HCL, se determinó empleando la norma ASTM D1104. Inicialmente, se pesaron 2.5 gr de muestra libre de extractivos en un Erlenmeyer, para luego adicionar 80 ml de agua destilada caliente (70°C), 0.5 ml de ácido acético (grado reactivo) y 1 gr de clorito de sodio (78% grado técnico). Seguido a esto, las muestras fueron llevadas a un baño maría (70°C) durante 6 horas, agregando ácido acético y clorito de sodio cada hora, en las cantidades antes mencionadas. Al finalizar este tiempo, las muestras fueron dejadas reaccionando en el mismo baño maría durante 24 horas. Posteriormente, el material resultante fue filtrado al vacío y secado a 30°C hasta alcanzar peso constante. El cálculo del contenido de HCL se realizó empleando la ecuación 1.10 presentada en la Tabla 1.6.

La celulosa es un polímero de elevado peso molecular, con un alto grado de polimerización, de estructura cristalina y formado por un gran número de moléculas de glucosa (Demirbas, 2010). Se determinó empleando la metodología de Han y Rowell (1997), teniendo presente la baja resistencia de la hemicelulosa a las bases y ácidos diluidos, en comparación con la celulosa. Esta metodología plantea inicialmente, pesar 1.5 gr de holocelulosa, por triplicado. Posteriormente, las muestras fueron llevadas a beakers de 250 ml, al mismo tiempo que se les adicionó 10 ml de NaOH al 17.5%. Dichos recipientes fueron sometidos a un baño maría (20°C) agregándoles, paralelamente, 5 ml de NaOH cada 5 min hasta completar un volumen de 45 ml por muestra. Una vez alcanzado este volumen, se procedió a dejar las muestras en reposo por 30 minutos en el baño maría. Seguido a esto, se adicionó 33 ml de agua destilada a 20°C por muestra, agitándolas y dejándolas reposar durante 1 hora. El producto obtenido se filtró y lavó con 50 ml de NaOH al 8.3%. El lavado continuó con agua destilada caliente, para luego verter 15 ml de ácido acético al 10% y ser dejadas reaccionando durante 3 minutos. Terminado el periodo de reacción, las muestras fueron lavadas nuevamente con agua destilada caliente, con el fin de eliminar el ácido presente y neutralizar el pH. Finalmente, el producto obtenido fue filtrado al vacío y se secó en un horno a 30°C hasta alcanzar peso constante. El contenido de celulosa y hemicelulosa se determinó empleando las ecuaciones 1.11 y 1.12 presentadas en Tabla 1.6.

El análisis termogravimétrico (TGA) permite evaluar la pérdida de peso de las fibras, sometidas a una velocidad de calentamiento constante (10 °C/min) en un atmósfera inerte (Gas nitrógeno). Este análisis se llevó a cabo en un analizador termogravimétrico marca TA Q 500, proporcionado por la Universidad Autónoma de Occidente. Las condiciones operativas del equipo establecidas para el ensayo fueron: calentamiento entre 40 y 600°C, una cantidad de muestra entre 3 y 4 mg así como un flujo de gas nitrógeno de 90 ml/min. La prueba permitió construir la curva de termogravimetría diferencial (DTG), al derivar la pérdida de masa en función de la temperatura. Con este tipo de gráfica se pudo determinar la temperatura de degradación térmica y la temperatura de velocidad de degradación máxima de las fibras, empleando el software TA Universal Analyses.

La densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de un elemento. Para el caso de la biomasa residual, se logró determinar empleando un picnómetro. Inicialmente se calculó el peso y volumen ocupado por el agua en este recipiente, teniendo en cuenta la densidad de este líquido a 23°C. El peso de la biomasa se determinó utilizando una balanza analítica y su volumen mediante las ecuaciones 1.13 y 1.14 consignadas en la Tabla 1.7. Finalmente la densidad de los residuos se cuantificó empleando la ecuación 1.15.

Tabla 1. 7. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la densidad de la biomasa.

Ecuación	No. Ecuación
$V_{biomasa} = VP_{agua+muestra} - V_{agua}$	Ec. 1.13
$V_{agua} = \frac{(PP_{agua+muestra} - PM) - PM}{\rho_{agua}}$	Ec.1.14
$\rho_{biomasa} = \frac{PM}{V_{biomasa}}$	Ec.1.15

Donde, $V_{biomasa}$ es el volumen de la biomasa (ml), $VP_{agua + muestra}$ es el volumen del picnómetro con agua + muestra (ml), V_{agua} es el volumen ocupado por el agua (ml), $PP_{agua + muestra}$ es el peso del picnómetro con agua + muestra (gr), PP es el peso del picnómetro (gr), PM es el peso de la muestra (gr), ρ_{agua} es la densidad del agua (gr/ml), $\rho_{biomasa}$ es la densidad de la biomasa (gr/ml).

La relación de aspecto es el parámetro que permite describir cuantitativamente la forma de una partícula regular o irregular. Para determinar esta relación, se utilizó la metodología planteada por Lu *et al.* (2017) en la cual se emplean los diámetros de Feret. El ancho se mide como la distancia mínima entre dos líneas tangenciales al contorno de la partícula y la longitud como la distancia entre dos tangentes al contorno proyectado perpendicularmente a la tangente que define el ancho. Las imágenes se lograron tomar mediante el uso de un microscopio electrónico suministrado por el Laboratorio de Materiales de la Universidad Autónoma de Occidente. Las medidas de las partículas se lograron estimar por medio del software de imagen Image Processing Software Plus 6 siguiendo la metodología reportada por Lu *et al.* (2017) (Ver Figura 1.8).

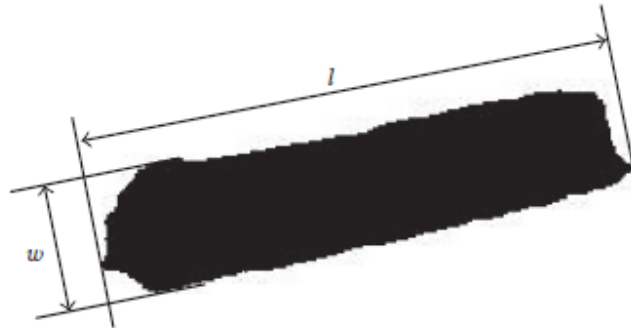


Figura 1. 8. Diámetros de Feret. Imagen tomada de Lu et al. (2017).

Donde w: ancho y l: longitud.

1.3.2.2. Residuos plásticos

Los residuos de PP y PEAD pos industrial (PPR y PEADR, respectivamente) se caracterizaron mecánica y térmicamente. Dentro de las propiedades mecánicas a determinar están la resistencia y módulo de tracción y flexión, deformación y resistencia al impacto. Los ensayos de tracción y flexión se llevaron a cabo empleando probetas normalizadas tipo V y un equipo universal de ensayos marca Instron 3366 proporcionado por el Grupo de Investigación en Tecnología para la Manufactura (GITEM) de la Universidad Autónoma de Occidente, según lo establecido por las normas ASTM D638 y ASTM D790, respectivamente. Los parámetros empleados para los ensayos de tracción y flexión se presentan en la Tabla 1.8.

Tabla 1. 8. Parámetros establecidos para pruebas mecánicas de tracción y flexión.

Parámetro	Valor
Ensayo de tracción	
Distancia inicial de extensómetro	10 mm
Distancia entre mordazas	26.4 mm
Velocidad de ensayo (PPI)	50 mm/minuto
Velocidad de ensayo (PEADI)	75 mm/minuto
Ensayo de flexión	
Separación del soporte	50 mm
Deformación máxima	5%
Velocidad del ensayo	$V = \frac{ZL^2}{6d}$ Ec.1.16

V: velocidad del ensayo de flexión (mm/minuto), Z: tasa de esfuerzo de la fibra exterior $Z = 0.01$, L: separación del soporte (mm), d: profundidad o espesor de la probeta (mm).

Las velocidades empleadas en el ensayo de tracción difieren entre el PPR y el PEADR debido a la capacidad de fluencia de las matrices, siendo el PEADR mucho más fluido que el PPR.

Por su parte, la resistencia al impacto se determinó según lo establecido por la norma ASTM D256. Para esto se empleó una máquina pendular tipo Izod digital marca Tinius Olsen, modelo IT 504 (Figura 1.9) proporcionada por la Universidad del Valle. Los parámetros requeridos por el equipo fueron el ancho y el espesor de cada una de las probetas, así como la masa de las pesas instaladas en el péndulo para llevar a cabo el ensayo.

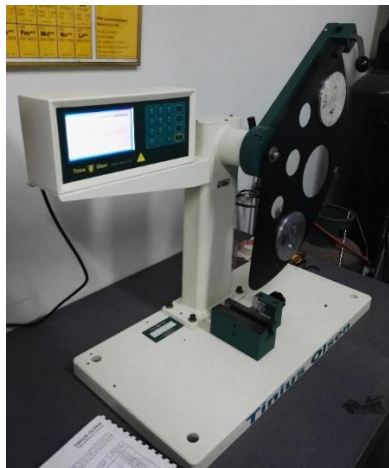


Figura 1. 9. Equipo empleado para prueba de impacto.

Estos residuos también se caracterizaron por análisis próximo, elemental y poder calorífico. El análisis próximo se realizó de forma similar que en el caso de la biomasa residual. Por su parte, la composición elemental y poder calorífico fueron obtenidos por revisión bibliográfica y empleando el modelo de energía de reacción propuesto por Han *et al.* (2017), respectivamente. En el caso de la caracterización térmica se

tuvo en cuenta propiedades como el punto de fusión, la temperatura de cristalización y la degradación del material. El punto de fusión se puede definir como la temperatura en la cual un material se encuentra en equilibrio de fases sólido – líquido. Este parámetro se halló empleando un equipo para calorimetría diferencial de barrido (DSC) marca TA Q 2000, suministrado por el GITEM de la Universidad Autónoma de Occidente. De igual forma, el DSC permitió determinar la temperatura y porcentaje de cristalización de los materiales evaluados, teniendo en cuenta que las condiciones de trabajo para llevar a cabo el ensayo fueron: i) la ausencia de oxígeno, ii) una velocidad de calentamiento de 10°C/min y iii) tres rampas de temperatura siendo estas de 0 a 200 °C, 200 a -20°C y -20 a 200°C. Para determinar la temperatura de degradación térmica se empleó un analizador termogravimétrico marca TA Q 500, bajo las siguientes condiciones operativas: i) un ambiente inerte empleando gas nitrógeno con un flujo de 90 ml/min, ii) una velocidad de calentamiento de 10°C/min, y iii) un rango de temperatura entre 20 y 600°C.

1.3.3. Diseño experimental para la formulación de muestras

Los residuos analizados anteriormente se mezclaron con el fin de obtener biocompuestos, bajo la propuesta de un diseño de experimentos tipo factorial 2² (Moreno, 1993), en donde interactuaron dos factores: la relación en peso matriz:refuerzo y el tamaño de partícula (TP) de los residuos lignocelulósicos. Así mismo, se propusieron dos niveles por factor: 90:10 y 70:30 para la relación en peso y dos rangos de TP, siendo estos 74 – 417 y 833 – 1168 micras. Las relaciones en peso fueron establecidas de acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, teniendo en cuenta los porcentajes de fibra incorporada que generaron mayores cambios en las propiedades de diferentes matrices poliméricas. Adicionalmente, se evaluó el efecto de incorporar un Agente Ligante (AL: MAPP, maleico anhídrido injertado en polipropileno) en la interfaz matriz:refuerzo, con el fin de estimar el impacto sobre las propiedades mecánicas de tracción y flexión del material compuesto que presentó mayor variación de estas. El porcentaje de agente acoplante a adicionar (3%) se definió promediando valores reportados en la literatura (entre 1 y 5%). En la Tabla 1.9 se presentan las posibles configuraciones experimentales al relacionar cada uno de los factores, sus niveles y el agente ligante.

Tabla 1. 9. Configuraciones del diseño de experimentos propuesto para la obtención de biocompuestos.

Tipo de refuerzo	Tipo de matriz	Relación M:R (%w)	TP (micras)	No. Tamiz	AL
SC	PPR	90:10:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
		70:30:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
	PEADR	90:10:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
		70:30:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
CCa	PPR	90:10:00	75 – 425	40 - 200	0 – 1
			850 - 1180	16 - 20	0 – 1
		70:30:00	75 – 425	40 - 200	0 – 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
	PEADR	90:10:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1
		70:30:00	75 – 425	40 - 200	0 - 1
			850 - 1180	16 - 20	0 - 1

SC: estopa de coco, CCa: cisco de café, PPR: polipropileno pos industrial, PEADR. Polietileno de alta densidad pos industrial, M:R: relación matriz:refuerzo, TP: tamaño de partícula del material lignocelulósico, %w: porcentaje en peso de los residuos, AL: agente ligante (MAPP), 1 hace referencia a la presencia del mismo y 0 la ausencia.

En la anterior Tabla se puede apreciar cada uno de las mezclas esperadas, combinando el tipo de matriz, el refuerzo, la cantidad de fibra y el tamaño de partícula a adicionar. Con base a esto se esperaría un total de 16 biocompuestos, sin tener en cuenta la incorporación de agente ligante, ya que este dependerá del tipo de matriz y los resultados del análisis estadístico a realizar.

En la Tabla 1.10 se presentan cada una de las configuraciones obtenidas y su respectiva nomenclatura, sin tener en cuenta la adición de agente ligante. Las letras BC hacen referencia al material compuesto, los números del 1 al 4 y del 7 al 10, se relacionan con matrices poliméricas reforzadas con CCa. Los números 5, 6 y 11 y la numeración 12 – 16, refieren a los polímeros reforzados con SC. Por otro lado, los números pares (2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 y 16) manifiestan la incorporación de 30% de fibra, mientras que los impares (1, 3, 5, 7, 9, 11, 13 y 15) del 10%.

Tabla 1. 10. Biocompuestos obtenidos.

Biocompuesto	Matriz	Refuerzo	Proporción de fibra (%)	No. Tamiz
BC1	PPR	CCa	10	16 – 20
BC2	PPR	CCa	30	16 – 20
BC3	PPR	CCa	10	40 - 200
BC4	PPR	CCa	30	40 – 200
BC5	PPR	SC	10	40 – 200
BC6	PPR	SC	30	40 – 200
BC7	PEADR	CCa	10	16 – 20
BC8	PEADR	CCa	30	16 – 20
BC9	PEADR	CCa	10	40 - 200
BC10	PEADR	CCa	30	40 – 200
BC11	PEADR	SC	10	40 – 200
BC12	PEADR	SC	30	40 - 200
BC13	PPR	SC	10	16 - 20
BC14	PPR	SC	30	16 – 20
BC15	PEADR	SC	10	16 – 20
BC16	PEADR	SC	30	16 - 20

1.3.4. Obtención de biocompuestos

Para el procesamiento de los materiales compuestos se utilizaron los equipos de extrusión y molienda descritos en el numeral 1.3.1. Las características y condiciones de operación del extrusor se presentan en las Tabla 1.11 y 1.12, respectivamente. Cabe mencionar que para cada material compuesto, se emplearon

condiciones de operación distintas debido a factores como el tipo de matriz polimérica, la fibra vegetal empleada y las proporciones de refuerzo a incorporar.

Tabla 1. 11. Características del extrusor de doble husillo.

Item	Parámetro
Diámetro	22 mm
Radio L/D	40:1
Velocidad máxima del tornillos	600 rpm
Zonas de calentamiento	10
Temperatura máxima	350°C
Volumen de la tolva	5 L
Poder del motor del extrusor	5.5 KW
Temperatura ambiente de operación	45 ± 5°C
Voltaje	380 V/50 Hz
Humedad de operación	5 – 95%
Max. Caudal másico de salida	20 kg/h

L/D: relación longitud – diámetro del equipo de extrusión

La velocidad de los tornillos alimentadores fue determinada con base en análisis preliminares de caudales para el polímero, la fibra y el biocompuesto. El caudal y el porcentaje de fibra del material compuesto se relacionan con el flujo másico y la fracción de cada componente. Así mismo cada uno de estos parámetros se ve afectado por variaciones en la velocidad de los tornillos alimentadores. Con base a esto, se estableció que a mayor velocidad del tornillo asociado al suministro de polímero y, manteniendo la velocidad de adición del refuerzo, el porcentaje de fibra disminuye. Por lo tanto el parámetro a variar durante la experimentación fue las revoluciones establecidas para la alimentación del material estructurante o polimérico. Por su parte, la temperatura en las zonas de calentamiento fue fijada de acuerdo al manejo y experimentación previa en el procesamiento de las matrices analizadas. De forma complementaria, se emplearon las fichas técnicas de los polímeros vírgenes para establecer con mayor precisión las temperaturas de proceso.

Una vez obtenido el material compuesto, se procedió a disminuir el tamaño de partícula empleando el equipo de molienda descrito en el numeral 1.3.1. Posterior a esto, el material fue secado en un horno proporcionado por el laboratorio de materiales de la Universidad Autónoma de Occidente, llevándolo a una temperatura de 80°C durante 12 horas.

Tabla 1. 12. Condiciones de operación de la máquina extrusora para la obtención de materiales compuestos.

Parámetro	Condición	
	BC1	BC2
Perfil de T°	170 °C(zonas 1), 180 °C (zonas 2 - 3), 170 (zonas 4 -7), 165 (zonas 8 - 10)	160 °C(zonas 1 – 5), 165 °C (zonas 6 – 10)
V. de tornillo	250 rpm	180 rpm
V. de tornillo AP	6.4 rpm	6.4 rpm
T° promedio interna	172°C	160°C
Parámetro	Condición	
	BC3	BC4
Perfil de T°	170 °C(zonas 1), 180 °C (zonas 2 - 3), 170 (zonas 4 -7), 165 (zonas 8 - 10)	160 °C(zonas 1 – 5), 165 °C (zonas 6 – 10)
V. de tornillo	250 rpm	180 rpm
V. de tornillo AP	6 rpm	6 rpm
T° promedio interna	172°C	160°C
Parámetro	Condición	
	BC5	BC6
Perfil de T°	160 °C(zonas 1 – 5), 165 °C (zonas 6 – 10)	170 °C(zonas 1), 180 °C (zonas 2 - 3), 170 (zonas 4 - 7), 165 (zonas 8 - 10)
V. de tornillo	185 rpm	85 rpm
V. de tornillo AP	11 rpm	11 rpm
T° promedio interna	186°C	172°C
Parámetro	Condición	
	BC7	BC8
Perfil de T°	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)
V. de tornillo	250 rpm	40 rpm
V. de tornillo AP	3 rpm	3 rpm
T° promedio interna	160°C	160°C
Parámetro	Condición	
	BC9	BC10
Perfil de T°	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)
V. de tornillo	250 rpm	50 rpm
V. de tornillo AP	3 rpm	3 rpm
T° promedio interna	160°C	160°C
Parámetro	Condición	
	BC11	BC12
Perfil de T°	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)	170°C (zona 1), 150°C (zonas 2 – 5), 145°C (zonas 6 – 10)
V. de tornillo	195 rpm	15 rpm
V. de tornillo AP	7 rpm	7 rpm
T° promedio interna	160°C	160°C

V: velocidad, T°: temperatura, AP: alimentador de fibra.

1.4. Resultados y discusión

1.4.1. Caracterización de los residuos lignocelulósicos.

El análisis próximo o inmediato en base seca de los residuos evaluados y reportados en la literatura se presentan en las Tablas 1.13 y 1.14, respectivamente. Comparando los valores obtenidos, se observa que la biomasa residual con mayor contenido de humedad es la estopa de coco (12.15%). Este parámetro está directamente relacionado con la dispersión de las fibras en la matriz polimérica, durante el proceso de extrusión. A mayor contenido de humedad se presenta una menor dispersión del material lignocelulósico en la matriz polimérica, problema que se refleja en las propiedades de resistencia mecánica del biocompuesto, según datos reportados por Hietala y Oksman (2018) y como se verá al analizar las propiedades mecánicas de los biocompuestos.

Tabla 1. 13. Análisis próximo en base seca de las fibras y matrices poliméricas empleadas.

Material	Hw (%)	Cz (%)	MV (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)
PPR	0.12 ± 0.01	0.09 ± 0.01	99.89 ± 0.01	0.01 ± 0.01	43.53
PEADR	0.55 ± 0.03	0.45 ± 0.03	99.55 ± 0.01	0.00 ± 0.00	43.41
CCa	11.61 ± 0.08	1.83 ± 0.05	93.99 ± 0.08	4.14 ± 0.11	15.93
SC	12.15 ± 0.11	4.06 ± 0.08	83.18 ± 0.04	12.76 ± 0.08	18.41

Hw (%): porcentaje de humedad, Cz (%): porcentaje de cenizas, MV (%): porcentaje de materia volátil, CF (%): contenido de carbono fijo, PCS: poder calorífico superior.

En la biomasa residual, el mayor valor de materia volátil se presentó para el cisco de café (83.08%). Este parámetro se relaciona con el porcentaje de celulosa y hemicelulosa (holocelulosa) presente en la biomasa. El contenido de hemicelulosa influye en la distancia de la celulosa interfibrilar, impactando la rigidez de la fibra y permitiendo clasificarla como un material poco frágil o de difícil rotura (Castellani *et al.*, 2016). Así mismo, se puede decir que un alto contenido de materia volátil representa una proporción significativa de holocelulosa, influyendo en el comportamiento de la fibra y las propiedades mecánicas de un biocompuesto obtenido a partir de este material, como se analizará más adelante. Adicionalmente, el contenido de carbono fijo se encuentra directamente relacionado con la cantidad de lignina presente en la biomasa (Jeguirim *et al.*, 2014), por lo cual se esperaría que la SC presente un mayor contenido de este parámetro. Por otro lado, los residuos plásticos y vegetativos que presentaron menor cantidad de cenizas fueron el PPR (0.09%) y el CCa (1.65%) respectivamente. Teniendo en cuenta estos resultados se puede decir que dichos materiales afectarían en menor grado el manejo y administración de costos del proceso reduciendo los impactos por corrosión de equipos, la dificultad en su procesamiento y la transformación de la energía (García *et al.*, 2013). Por último, el poder calorífico de los residuos influye en la producción de energía de un material compuesto. Con base a esto, se puede argumentar que el PPR y la SC afectarían en mayor medida la generación de energía y potencia de un material compuesto (Anshar *et al.*, 2018).

Al comparar los resultados obtenidos con datos reportados en la literatura (Tabla 1.14) se observó que el análisis próximo del PPR se encuentra en el rango establecido según valores reportados por Li *et al.* (2017), Jung *et al.* (2010) y Azizi *et al.* (2018). Al analizar los parámetros que componen el análisis próximo, se encontró que el contenido de humedad en la estopa de coco y el PEADR, difiere de los datos presentados por Mythili *et al.* (2013), Jung *et al.* (2010), Kunwar *et al.* (2016) y Li *et al.* (2017). Así mismo, se encontró que para el cisco de café y la SC, el contenido de materia volátil varía en comparación con los valores determinados reportados en la Tabla 1.14. La composición del CCa y la SC cambia según la variedad de la especie, su ubicación geográfica, condiciones de cultivo y procesamiento del mismo (Carvalho *et al.*, 2018). Exceptuando la estopa de coco, los residuos evaluados presentan un poder calorífico inferior a los valores reportados por Vassilev *et al.* (2010), Oliveira *et al.* (2013), Ismail *et al.* (2016) y Galhano *et al.* (2018)

para el cisco de café, Li *et al.* (2017), Jung *et al.* (2010), Azizi *et al.* (2018) y Uzun y Yaman (2017) para el PP y Jung *et al.* (2010), Kunwar *et al.* (2016), Li *et al.* (2017) y Ng *et al.* (2018) para el PEAD.

Tabla 1. 14. Análisis próximo en base seca de las fibras y matrices poliméricas según datos reportados en la literatura.

Análisis Próximo						
Material	Hw (%)	Cz (%)	MV (%)	CF (%)	PCS (MJ/kg)	Referencia
PPR	0 - 0.4	0 - 3.55	95.08 - 100	0 - 1.22	45.2 - 47.46	Li <i>et al.</i> (2017), Jung <i>et al.</i> (2010), Azizi <i>et al.</i> (2018), Uzun y Yaman (2017)
PEADR	0 - 0.1	0 - 0.99	98.87 - 100	0 - 0.04	46.5 - 49.3	Jung <i>et al.</i> (2010), Kunwar <i>et al.</i> (2016), Li <i>et al.</i> (2017), Ng <i>et al.</i> (2018), Yuan <i>et al.</i> (2018)
CCa	9.22 - 25.3	0.73 - 2.5	68.2 - 81.87	16.42 - 18.5	19.8 - 21.41	Vassilev <i>et al.</i> (2010), Oliveira <i>et al.</i> (2013), Ismail <i>et al.</i> (2016), Galhano <i>et al.</i> (2018), Harsono <i>et al.</i> (2019)
SC	9.65 - 10.1	3.2 - 5.56	69.35 - 79.15	11.2 - 15.44	14.67 - 18.74	Mythili <i>et al.</i> (2013), Dhyani y Bhaskar (2018), Galhano <i>et al.</i> (2018)

El análisis elemental o último en base seca y libre de cenizas de los residuos evaluados y reportados en la literatura se presenta en las Tablas 1.15 y 1.16, respectivamente. En la Tabla 1.15 se puede observar que el contenido de carbono es mayor para la SC (53.88%), mientras que el CCa presentó un alto contenido de oxígeno elemental, nitrógeno e hidrógeno (41.27, 1.07 y 6.88 %, respectivamente). El carbono y el hidrógeno son importantes fuentes de calor y se asocian de forma directa con el poder calorífico de un material. Así mismo, este parámetro se reduce con la presencia de un alto contenido de oxígeno y un valor bajo de carbono (Setter *et al.*, 2020). Teniendo en cuenta lo anterior, la SC puede considerarse como un residuo deseable para usos energéticos.

Tabla 1. 15. Análisis elemental en base seca y libre de cenizas de las fibras y matrices poliméricas empleadas.

Análisis elemental							
Material	H (%)	C (%)	N (%)	O (%)	S (%)	O/C	H/C
PPR	13.17	84.65	0.12	1.33	0.73	0.01	1.87
PEADR	13.30	84.19	0.08	2.02	0.42	0.02	1.90
CCa	6.88	50.72	1.07	41.27	0.06	0.61	1.63
SC	6.51	53.88	0.68	38.84	0.08	0.54	1.45

H (%): porcentaje de hidrógeno elemental, C (%): porcentaje de carbono elemental, N (%): porcentaje de nitrógeno elemental, O (%): contenido de oxígeno elemental, S (%): porcentaje de azufre elemental.

Las relaciones atómicas O/C y H/C obtenidas para los residuos lignocelulósicos (CCa: 0.61, SC: 0.54; y CCa: 1.63, SC: 1.45, respectivamente), se encuentran dentro del rango establecido para la biomasa en el diagrama tipo Van Krevelen (Ruales, 2015; Mayson y Williams, 2021). Los valores de la relación O/C pueden atribuirse a un alto contenido de celulosa y hemicelulosa en la biomasa (Sarasini *et al.*, 2018; Jeguirim *et al.*, 2016). Migneault *et al.* (2015) exponen que este parámetro es directa e inversamente proporcional con la cantidad de carbohidratos (celulosa y hemicelulosa) y el contenido de lignina y extractivos presentes en la fibra, respectivamente. Siendo así, esta relación puede usarse como parámetro evaluador de la polaridad de un refuerzo en la producción de materiales compuestos, variando directa y

proporcionalmente con el contenido de grupos hidroxilo (O – H). Dichos grupos son centros reactivos de alta polaridad, los cuales influyen en la formación de puentes de hidrógeno y la compatibilidad entre la fibra y el polímero (Bajwa *et al.*, 2016). Es decir, que la relación O/C permite estimar el grado de interacción entre el refuerzo lignocelulósico y la matriz polar polimérica empleada (Sarasini *et al.*, 2018), siendo esta mucho mayor para el cisco de café en comparación con la estopa de coco. Por otro lado, el contenido de oxígeno en los polímeros se encuentra relacionado con grupos funcionales como los C - O. Estos grupos polares a su vez, contribuyen al aumento de la hidrofilia superficial de los sustratos poliméricos, siendo mucho mayor en el caso del PEADR (Mandolfino, 2019).

La Tabla 1.16 muestra los valores del análisis último reportado en la literatura para los residuos evaluados. Comparándolos con los valores obtenidos se puede observar que el análisis elemental determinado para el cisco de café y la estopa de coco, se encuentran dentro de los rangos planteados.

Tabla 1. 16. Valores reportados en la literatura para el análisis último en base seca y libre de cenizas de residuos lignocelulósicos.

Material	Análisis Elemental							Referencia
	C (%)	H (%)	N (%)	O (%)	S (%)	O/C	H/C	
PPR	80.3 - 90.8	7.1 - 15.3	0 - 0.31	0 - 2.96	0.08 - 2.1	0 - 0.02	1.06 - 2.02	Jung <i>et al.</i> (2010), Azizi <i>et al.</i> (2018), Uzun y Yaman (2017), Barbarias <i>et al.</i> (2018), Chattopadhyay <i>et al.</i> (2016), Jin <i>et al.</i> (2018) y Suriapparao <i>et al.</i> (2018)
PEADR	81.45 - 86.5	11.65 - 15.1	0 - 0.34	0 - 5.36	0 - 0.79	0 - 0.05	1.72 - 2.09	Jung <i>et al.</i> (2010), Kunwar <i>et al.</i> (2016), Barbarias <i>et al.</i> (2018), Ng <i>et al.</i> (2018), Ahmad <i>et al.</i> (2017), Chattopadhyay <i>et al.</i> (2016)
CCa	40.1 - 52.56	4.9 - 7.08	0 - 5.2	39.54 - 49.1	0 - 0.35	0.7 - 0.74	1.47 - 1.62	Vassilev <i>et al.</i> (2010), Oliveira <i>et al.</i> (2013), Ismail <i>et al.</i> (2016), Galhano <i>et al.</i> (2018) y Yuan <i>et al.</i> (2018)
SC	47.25 - 66.87	5.7 - 7.63	0 - 10.92	14.41 - 45.6	0	0.23 - 0.51	1.37 - 1.45	Mythili <i>et al.</i> (2013), Dhyani y Bhaskar (2018) y Galhano <i>et al.</i> (2018), Luis – Zarate <i>et al.</i> (2018)

La composición estructural de los residuos lignocelulósicos, se presenta en la Tabla 1.17. El cisco de café presentó una mayor proporción de celulosa (33.38%) en comparación con la estopa de coco (22.24%). La celulosa se considera como un biopolímero semicristalino de estructura fibrosa – rígida, el cual afecta de forma positiva la rigidez en los materiales compuestos, reflejándose en aumentos del módulo de elasticidad (Agustin – Salazar *et al.*, 2018). Así mismo, este compuesto se encuentra relacionado con la compatibilidad entre el refuerzo vegetal y matriz polimérica, reflejándose en mayores interacciones (enlaces de hidrógeno) en la interfaz para fibras con un alto contenido de celulosa. Este tipo de uniones químicas pueden generar como resultado una mayor resistencia a la tracción en un material compuesto (Tran *et al.*, 2018).

Respecto a la proporción de hemicelulosa, el CCa demostró tener un contenido bajo (13.06%) en comparación con la SC (15.62%). Un menor porcentaje de este componente no celulósico induce a una mayor proporción de celulosa contenida en la fibra, característica que se relaciona con la cantidad de enlaces intermoleculares de hidrógeno. Cabe resaltar que este tipo de enlaces (grupos hidroxilos – OH) se encuentran contenidos en la celulosa presente en la biomasa (Mazian *et al.*, 2020).

En cuanto al contenido de lignina, la estopa de coco presentó una mayor cantidad (25.42%) en comparación con el cisco de café (17.31%). Este tipo de compuesto es considerado como un polímero amorfo y químicamente heterogéneo. Bajwa *et al.* (2016) mencionan que aumentos en la carga de lignina genera impactos negativos en la resistencia de un material compuesto por lo cual se propone eliminar este tipo de compuestos por medio de métodos de modificación de superficie químicos, siendo la mercerización y la aplicación de plasma frío, metano, argón o helio los más utilizados, respectivamente (Sanchez *et al.*, 2020).

Por su parte, el cisco de café presentó una menor proporción de cenizas (1.84%) en comparación con la estopa de coco (3.71%). En cuanto al contenido de extractivos, ambos residuos presentaron valores similares. Este tipo de compuestos son considerados indeseables en la obtención de materiales compuestos, ya que reducen el rendimiento de adhesión del refuerzo o potencial de reforzamiento por una fibra (Migneault *et al.*, 2015).

Tabla 1. 17. Composición estructural de los residuos lignocelulósicos.

Composición	Porcentaje en peso (%wt)	
	CCa	SC
Celulosa	33.38 ± 0.89	22.24 ± 1.46
Hemicelulosa	13.06 ± 0.60	15.62 ± 1.25
Lignina	17.31 ± 0.68	25.42 ± 0.81
Extractivos	34.42 ± 0.94	33.00 ± 0.28
Cenizas	1.84 ± 0.06	3.71 ± 0.08
Hem/Lig	0.75	0.61
Cel/Lig	1.93	0.87

CCa: Cisco de café, SC: Estopa de coco.

Al comparar los resultados obtenidos con la información reportada en la literatura (Tabla 1.18), se encontró que el contenido de celulosa y cenizas en el cisco de café se encuentra dentro del rango establecido según Collazo-Bigliardi *et al.* (2018) y Baeta *et al.* (2017). En el caso de la estopa de coco, la proporción de lignina y cenizas es acorde según datos reportados por Dhyani y Bhaskar (2018), Mythili *et al.* (2013), Lertwattanakruk y Suntijitto (2015) y Basu *et al.* (2015), mientras que los extractivos superan los valores reportados. Soares *et al.* (2016) mencionan que el mesocarpio (fibra externa) del coco, en la etapa verde presenta una cantidad sustancial de extractos, por lo cual se podría asociar el material analizado con la fruta en edad temprana de maduración. Adicionalmente, se puede decir que la composición estructural de los residuos biomásicos varía según la especie, las condiciones y la ubicación geográfica del cultivo y el procesamiento del mismo (Carvalho *et al.*, 2018).

Tabla 1. 18. Valores reportados en la literatura para la composición estructural de los residuos lignocelulósicos.

Composición porcentual en peso (%wt)						
Material	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Cenizas	Extractivos	Ref.
CCa	29.17 - 35.4	18.2 - 28.96	22.35 - 23.2	1.4 - 4.6	17.67 - 21.8	Collazo-Bigliardi <i>et al.</i> (2018), Baeta <i>et al.</i> (2017) Dhyani y Bhaskar (2018), Mythili <i>et al.</i> (2013),
SC	26.80 - 47.7	17.20 - 25.9	17.8 - 39.66	0.8 - 5.56	6.8 - 22.01	Lertwattanakruk y Suntijitto (2015), Radoor <i>et al.</i> (2020), Hasan <i>et al.</i> (2021)

CCa: Cisco de café, SC: Estopa de coco.

En la Tabla 1.19 y las Figuras 1.10 y 1.11, se presentan los resultados obtenidos del análisis termogravimétrico de las fibras vegetales (CCa y SC). Comparando las fibras se observa que la temperatura de degradación del CCa (268.82 °C) es más alta, lo cual indica que este tipo de biomasa presenta mayor estabilidad térmica que la SC (Huang *et al.*, 2018). Por otro lado, la Figura 1.11 muestra dos procesos térmicos de 100 – 600 °C los cuales se pueden asociar con la degradación de la hemicelulosa (Región 1) y la celulosa (Región 2) en el material vegetal. Las regiones 1 y 2 coinciden con los rangos de descomposición

reportados por Nunes *et al.* (2017), Huang *et al.* (2018), Hu y Gholizadhe (2019) siendo estos 210 – 350 y 300 – 390 °C para la hemicelulosa y la celulosa, respectivamente. Adicionalmente mencionan que la lignina, al ser un compuesto de estructura compleja, se degrada en un rango de temperatura de 200 – 450 °C. De forma similar, Sher *et al.* (2019) relacionan el contenido de hemicelulosa y celulosa con el porcentaje de pérdida de peso correspondiente al área bajo las curvas DTG de las regiones 1 y 2. Lo anterior se evidencia, aproximadamente, con los resultados obtenidos de hemicelulosa y celulosa en la SC y el CCa, correspondientemente.

Tabla 1. 19. Análisis termogravimétrico de las fibras.

Material	Td (°C)	Región 1				Región 2			
		Trr (°C)	Tp (°C)	DTG (%/°C)	ML (%)	Trr (°C)	Tp (°C)	DTG (%/°C)	ML (%)
CCa	268.82	257.4 – 321.5	293.6	0.39	19	321.5 – 388.9	358.2	0.95	35.2
SC	242.84	216.1 – 292.7	278.3	0.34	15.8	292.7 – 353.7	329	0.97	34.3

Td: temperatura de degradación, Trr: temperatura inicial y final de la región, Tp: temperatura de la máxima pérdida de peso, DTG: máxima velocidad de pérdida de peso, ML: pérdida de peso total.

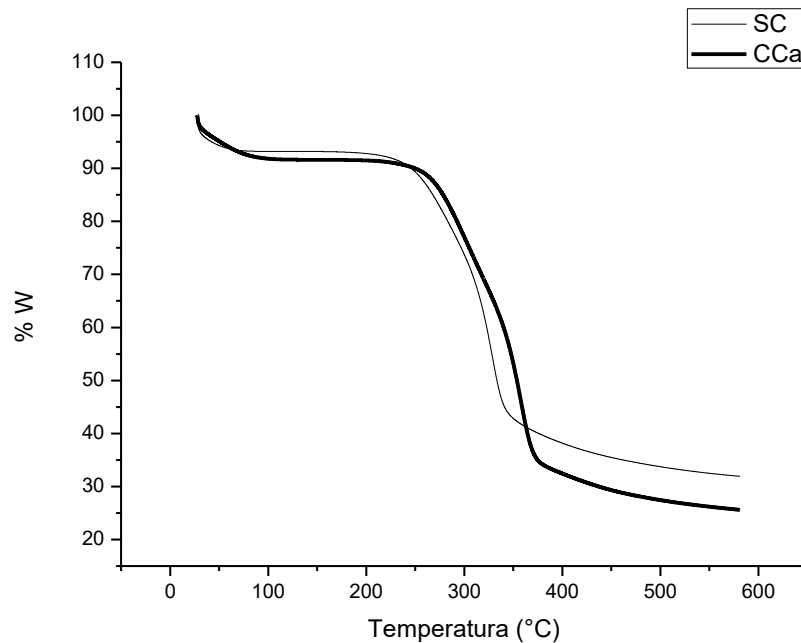


Figura 1. 10. Análisis termogravimétrico de las fibras vegetales.

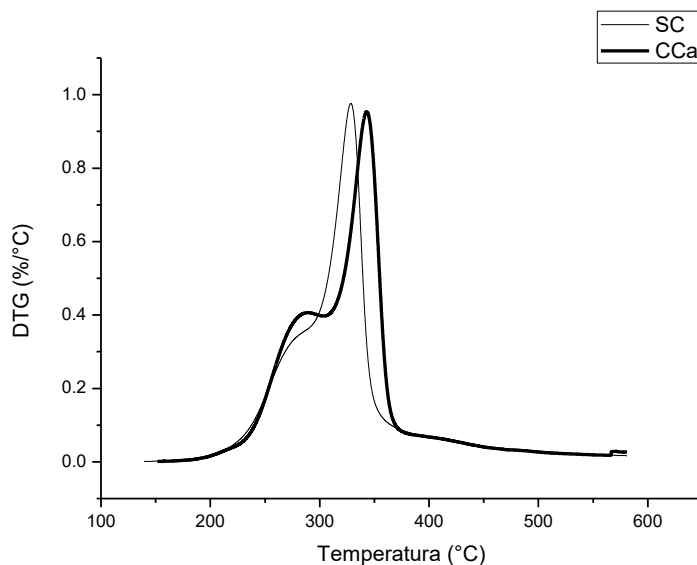


Figura 1. 11. Curva de termogravimetría diferencial de las fibras.

Entre las propiedades físicas determinadas a las fibras vegetales, se encuentra la densidad real y la relación de aspecto (RA). Los resultados obtenidos para estos parámetros se presentan en la Tabla 1.19, donde el cisco de café presentó una menor densidad (0.53 gr/cm^3) en comparación con la estopa de coco (1.19 gr/cm^3). Dicha propiedad se encuentra relacionada con los espacios internos vacíos del material lignocelulósico. Por lo cual, una mayor cantidad de espacios vacíos genera una menor densidad de la fibra así como un aumento en la porosidad de la misma (Trejos, 2014). Siendo así, las diferencias entre densidades reales se atribuyen a una mayor cantidad de espacios interiores en la estructura del cisco de café en contraste con la estopa de coco. Al comparar los resultados obtenidos con los datos reportados en la literatura, se evidenció que tanto el cisco de café como la estopa de coco presentaron densidades dentro de los rangos establecidos por Ismail *et al.* (2016), Pinzón *et al.* (2015), Cuoto *et al.* (2013), Trejos (2014), Ali (2010) y Bujang *et al.* (2007). Por otro lado, la RA se encuentra relacionada con los cambios en las propiedades mecánicas de un material compuesto, principalmente en el módulo tensil o de flexión. A menor RA se pueden percibir valores más altos de módulo (Kwon *et al.*, 2014), como se verá al analizar las propiedades mecánicas de los biocompuestos. Las diferencias entre los datos obtenidos de RA con los reportados en la literatura se debe al tratamiento dado a la biomasa, así como el tipo de método utilizado para la obtención de la fibra (Shah, 2013).

Tabla 1. 20. Características físicas de las fibras vegetales.

Características de la fibra					
Fibra	Densidad (gr/cm^3)	RA	D. Rep. (gr/cm^3)	RA. Rep	Ref.
CCa	0.53	2.22	0.5 - 0.53	> 35 ^a	Ismail <i>et al.</i> , 2016; Pinzón <i>et al.</i> , 2015; Cuoto <i>et al.</i> , 2013
SC	1.19	1.98	0.67 - 1.37		Trejos, 2014; Ali, 2010; Bujang <i>et al.</i> , 2007

^a : Shah (2013), D. Rep: Densidad reportada en la literatura, RA. Rep: Relación de aspecto reportada en la literatura para diferentes fibras naturales.

1.4.2. Caracterización de los residuos plásticos

La caracterización del material polimérico se presenta en la Tabla 1.21, para lo cual se determinaron parámetros físicos, mecánicos y térmicos. En el caso de la densidad no se observó variaciones significativas con relación a los polímeros vírgenes, coincidiendo con datos reportados por Li *et al.* (2018) (0.92 gr/cm³) y Das y Tiwari (2018) (0.95 gr/cm³) para el PP y el PEAD, respectivamente. El módulo ténsil se mantuvo para el PPR, indicando control en la degradación termomecánica por aumentos en la cristalinidad e inserción de fallas en las cadenas amorfas (Oliveira *et al.*, 2017), coincidiendo con los resultados reportados por Inácio *et al.* (2017) (1.6 GPa). Adicionalmente, Oliveira *et al.*, 2017 reportan que la degradación térmica de los polímeros genera moléculas cortas, incidiendo de forma directa en bajas interconexiones entre la fase cristalina y la fase amorfa del material. Este comportamiento se ve reflejado en la reducción del módulo de tracción y de flexión, como es el caso del PEADR (0.85 y 0.6 GPa, respectivamente). Por el contrario, la resistencia al impacto y la deformación disminuyeron en el PPR y el PEADR, verificando que el reprocesamiento vuelve frágil el polímero debido a la caída en el peso molecular y reduce la energía necesaria para romperlo (Touati *et al.*, 2011).

El reproceso del material incide en la escisión de la cadena polimérica, debilitando la estructura macromolecular y aumentando su cristalinidad (temperatura, entalpía y porcentaje) (Oliveira *et al.*, 2017, Kraiem *et al.*, 2013). Así mismo, Oliveira *et al.* (2017) mencionan que la entalpía de fusión se comporta como indicador de las variaciones en la cristalinidad de un polímero. Es decir, que el aumento en el valor de la entalpía puede ser indicativo de incrementos de la cristalinidad. A su vez, reprocesar polímeros influye en la estabilidad térmica de los mismos, disminuyendo su temperatura de degradación (Crespo y Caicedo, 2019; Caicedo *et al.*, 2018). Lo anterior se refleja en los resultados obtenidos para el PPR y el PEADR (Temperatura de degradación: 402.4 y 465.4, respectivamente), los cuales están por debajo de los valores reportados por Das y Tiwari (2018) (Temperatura de degradación: PP virgen 440°C, PEAD virgen 475°C). Por otro lado, las temperaturas de cristalización y de fusión son menores en materiales poliméricos reprocesados, mientras su grado cristalización aumenta. Este comportamiento se puede explicar teniendo en cuenta la degradación termo-oxidativa o mecánica provocada por el reprocesamiento de los polímeros (Martín – Alfonso y Franco, 2015). En adición, Martín – Alfonso y Franco (2015) mencionan que la degradación termomecánica influye en la liberación de secciones macromoleculares entrelazadas, las cuales al dejarse reorganizar propician el aumento del grado de cristalinidad del polímero.

Tabla 1. 21. Características del material polimérico.

Caracterización del material polimérico				
Parámetro	PP	PPR	PEAD	PEADR
Densidad (g/cm ³)	0.91 ^c	0.91 ± 0.009	0.96 ^d	0.96 ± 0.01
Módulo elástico en tracción (GPa)	1.24 ^b – 1.60 ^f	1.61 ± 41.5	0.9 ⁱ	0.85 ± 25.86
Resistencia a la tracción (MPa)	35 ^e	38.68 ± 0.47	24 ^d	25.93 ± 0.8
Deformación (%)	> 10 ^f	18.75 ± 3.16	> 200 ^d	217.47 ± 41.39
Módulo elástico en flexión (GPa)	1.52 ^f - 1.60 ^c	1.22 ± 15.95	0.82 ^d	0.60 ± 7.08
Resistencia a la flexión (MPa)	46 ^b	37.81 ± 0.71	23 ^d	17.19 ± 0.19
Resistencia al Impacto (J/m)	22 ^e	10.66 ± 0.7	30 ^d	15.19 ± 0.75
Temperatura de degradación (°C)	440 ^e	402.4	475 ^e	465.4
Temperatura de fusión (°C)	165.64 ^a	165.5	131 ^d	130.9
Entalpía de fusión (J/gr)	87.22 ^a	95.74	208.7 ^g	211.9
Temperatura de cristalización (°C)	130.02 ^a	114.2	116.9 ^j	117.2
Entalpía de cristalización (J/gr)	83.7 ^a	98.94	200 ^j	215
Porcentaje de cristalización (%)	37.9 ^h	47.4	71.3 ^g	74.5

^a: Lin *et al.* (2019), ^b: McCaffrey *et al.* (2018), ^c: Sabic (2019a), ^d: Sabic (2019b), ^e: Das y Tiwari (2018), ^f: Inácio *et al.* (2017), ^g: Awad *et al.* (2019), ^h: Dikobe y Luyt (2017), ⁱ: Pešić *et al.* (2016), ^j: Kraiem *et al.* (2013), PP: Polipropileno virgen, PEAD: Polietileno de alta densidad virgen.

1.4.3 Obtención de biocompuestos

Teniendo las configuraciones planteadas en la Tabla 1.9 del numeral 1.3.4 (Métodos experimentales: obtención de biocompuestos), se elaboraron 12 biocompuestos los cuales se presentan en la Tabla 1.10. Adicionalmente, en la Figura 1.12 se ilustra la fase final de la extrusión de biocompuestos así como las materias primas utilizadas en la obtención del mismo (matriz polimérica y fibras vegetales).



Figura 1. 12. Obtención de materiales compuestos.

Las formulaciones correspondientes a i) PPR reforzado con SC al 10%, asociado al tamiz 16 – 20 (BC13), ii) PPR reforzado con SC al 30%, asociado al tamiz 16 – 20 (BC14), iii) PEADR reforzado con SC al 10%, asociado al tamiz 16 – 20 (BC15), y iv) PEADR reforzado con SC al 30%, asociado al tamiz 16 – 20 (Bc16), no se lograron obtener debido al taponamiento del alimentador de fibra equipado al sistema de extrusión. La SC presentó una fuerte aglomeración en la salida del sistema de alimentación, causada por la fricción de las fibras y la temperatura del proceso (185°C). Adicionalmente, el tamaño de partícula facilitó el enrollamiento y acumulación de material en el tornillo alimentador, impidiendo el transporte por completo y la obtención de las configuraciones en cuestión. En la Figura 1.11 se presenta las evidencias de la aglomeración de fibra.



Figura 1. 13. Evidencias de la salida del alimentador de fibra obstruido.

1.5. Conclusiones

Al comparar las propiedades fisicoquímicas y térmicas de los residuos lignocelulósicos, se logró concluir que el CCa presentó un mayor potencial para ser aprovechado como material de refuerzo en la obtención de biocompuestos. Este residuo presentó características destacadas frente a la SC, como la presencia de una mayor proporción de materia volátil, celulosa y oxígeno. Dichos parámetros se encuentran relacionados con la compatibilidad e interacción de la fibra vegetal con la matriz termoplástica. Así mismo, el CCa reflejó una baja proporción de humedad, cenizas, carbono y lignina. Estas características inciden en una mejor dispersión del material vegetal, un mayor rendimiento en la adhesión del refuerzo al polímero y bajos impactos asociados a la corrosión de equipos. De igual forma, disminuye el grado de dificultad en el procesamiento de las fibras y la transformación de la energía. Por otro lado, la temperatura de degradación del CCa fue mayor en contraste con la SC. Esto permite establecer al CCa como el refuerzo más estable y con mayor rango de procesamiento térmico. Por último y con base a la RA, se podría percibir un mayor aumento en las propiedades mecánicas de los biocompuestos obtenidos a partir de CCa, las cuales se analizarán más adelante.

1.6. Referencias

Acoplásticos. (2017). Plásticos en Colombia. Disponible en: <http://www.acoplásticos.org/>.

Agustin – Salazar S., Cerruti P., Medina – Juaréz L. A., Scarinzi G., Malinconico M., Soto – Valdez H. and Gamez – Meza N. (2018). Lignin and holocellulose from pecan nutshell as reinforcing fillers in poly lactic acid) biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 115, 727 – 735. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.120>.

Ahmad I., Khan M. I., Khan H., Ishaq M., Khan R., Gul K. and Ahmad W. (2017). Pyrolysis of HDPE into fuel like products: Evaluating catalytic performance of plain and metal oxides impregnated waste brick kilndust. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 124, 195 – 203. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.005>.

Ali M. (2010). Coconut Fibre – A Versatile Material and its Applications in Engineering. Second International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies, Università Politecnica delle Marche, Ancona, Italy. Doi: <https://doi.org/10.5897/JCECT.9000009>.

Almeida H., Amaral M. H. and Lobao P. (2011). Drugs obtained by biotechnology processing. *Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences*. 47 (2), 199-207. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/S1984-82502011000200002>.

Alvarado K., Blanco A. and Taquechel A. (2008). Fibra de coco: Una alternativa ecológica como sustrato agrícola, Cuba, Centro de Desarrollo de la Montaña, Cuba. 2 pages.

Amin F., Khalid H., Zhang H., Rahman S., Zhang R., Liu G. and Chen C. (2017). Pretreatment methods of lignocellulosic biomass for anaerobic digestion. *AMB Express*. 7 (72), 1 – 12. Doi: <https://doi.org/10.1186/s13568-017-0375-4>.

Anshar M., Tahir D., Makhрани, Ani F. N. and Kader A. S. (2018). New composites based on low-density polyethylene and rice husk: Elemental and thermal characteristics. *Environmental Engineering Research*. 23 (3), 250-257. Doi: <https://doi.org/10.4491/eer.2017.096>.

Arslan Y. E., Arslan T. S., Derkus B., Emregul E. and Emregul K. C. (2017). Fabrication of human hair keratin/jellyfish collagen/eggshell-derived hydroxyapatite osteoinductive biocomposite scaffolds for bone tissue engineering: From waste to regenerative medicine products. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 154, 160 – 170. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2017.03.034>.

- Awad A. H., Wahab A. A., Gamsy R. and Latif M. H. (2019). A study of some thermal and mechanical properties of HDPE blend with marble and granite dust. *Ain Shans Engineering Journal*. 10, 353 – 358. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2018.08.005>.
- Azizi K., Moraveji M. K. and Najafabadi H. A. (2018). Simultaneous pyrolysis of microalgae *C. vulgaris*, wood and polymer: The effect of third component addition. *Bioresource Technology*. 247, 66 – 72. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.059>.
- Baêta B. E. L., Miranda Cordeiro P. H., Passos F., Alves L. V., Aquino S. F. and Fdz-Polanco F. (2017). Steam explosion pretreatment improved the biomethanization of coffee Husks. *Bioresources Technology*. 245, 66 - 72. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.110>.
- Bajwa D., Wang X., Sitz E., Loll T. and Bhattacharjee, S. (2016). Application of bioethanol derived lignin for improving physico-mechanical properties of thermoset biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 89, 265 – 272. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.077>.
- Barbarias I., Lopez G., Artetxe M., Arregi A., Bilbao J. and Olazar M. (2018). Valorisation of different waste plastics by pyrolysis and in-line catalytic steam reforming for hydrogen production. *Energy Conversion and Management*. 156, 575 – 584. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.11.048>.
- Beltran M. and Marcilla, A. (2012a). Tecnología de polímeros: Procesado y Propiedades. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema4.pdf>.
- Beltran M. and Marcilla, A. (2012b). Tecnología de polímeros: Procesado y Propiedades. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema5.pdf>.
- Beltran M. and Marcilla, A. (2012c). Tecnología de polímeros: Procesado y Propiedades. Recuperado de <http://iq.ua.es/TPO/Tema6.pdf>.
- Berto D., Rampazzo F., Gion C., Noventa S., Ronchi F., Traldi U., Giorgi G., Cicero A. M. and Giovanardi O. (2017). Preliminary study to characterize plastic polymers using elemental analyser/isotope ratio mass spectrometry (EA/IRMS). *Chemosphere*. 176, 47-56. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.090>.
- Bujang I. Z., Awang M. K. and Ismail A. E. (2007). Study on the dynamic characteristic of coconut fibre reinforced composites. *Regional Conference on Engineering Mathematics, Mechanics, Manufacturing and Architecture*. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/12005683.pdf>.
- Caicedo C., Vázquez A., Ossa O. H., De La Cruz H. and Maciel A. (2018). Physicomechanical behavior of composites of polypropylene, and mineral fillers with different process cycles. *Revista DYNA*. 85 (207), 260 – 268. Doi: <http://doi.org/10.15446/dyna.v85n207.71894>.
- Campbell F. C. (2010). *Structural Composite Materials*. pp 1- 29. Ohio, Estados Unidos: ASM International. ISBN: 1615031405, 9781615031405.
- Carvalho F., Srinivas K., Helms G. L., Isern N. G., Cort J. R., Gonçalves A. R. and Ahring B. K. (2018). Characterization of coffee (*Coffea arabica*) husk lignin and degradation products obtained after oxygen and alkali addition. *Bioresource Technology*. 257, 172 – 180. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.041>.
- Castellani R., Di Giuseppe E., Beaugrand J., Dobosz S., Berzin F., Vergnes B. and Budtova T. (2016). Lignocellulosic fiber breakage in a molten polymer. Part 1. Qualitative analysis using rheo-optical observations. *Composites: Part A*. 91, 229 – 237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2016.10.015>.
- Chaitanya S., Singh I. and Song J. I. (2019). Recyclability analysis of PLA/Sisal fiber biocomposites. *Composites Part B*. 173, Artículo 106895. Doi : <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.05.106>.

- Chattopadhyay J., Pathak T. S., Srivastava R. and Singh A. C. (2016). Catalytic co-pyrolysis of paper biomass and plastic mixtures (HDPE (high density polyethylene), PP (polypropylene) and PET (polyethylene terephthalate)) and product analysis. *Energy*. 103, 513 – 521. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.015>.
- Chavez – Sifontes M. and Domine M. E. (2013). Lignina, estructura y aplicaciones: Métodos de despolimerización para la obtención de derivados aromáticos de interés industrial. *Avances en Ciencia y Tecnología*, 4 (4), 994 – 998. Disponible en <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=323629266003>.
- Collazo-Bigliardi S., Ortega – Toro R. and Boix A. C. (2018). Isolation and characterisation of microcrystalline cellulose and cellulose nanocrystals from coffee husk and comparative study with rice husk. *Carbohydrate Polymers*. 191, 205 – 215. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.022>.
- Costa P. F. A., de Abreu R., Fontana A. B., Fiedler H. D., Kirby A. J., Quina F. H., Nome F. and Gerola A. P. (2021). The role of hydrophobicity in supramolecular polymer/surfactant catalysts: An understandable model for enzymatic catalysis. *Journal of Colloid and Interface Science*. 588, 456 – 468. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2020.12.081>.
- Crespo L. M. and Caicedo C. (2019). Application of ashes as filling in reprocessed polypropylene: thermomechanical properties of composites. *Polímeros*. 29 (1), e2019003. Doi: <https://doi.org/10.1590/0104-1428.02018>.
- Cuoto N., Silva V., Monteiro E., Brito P. S. D. and Ruboa A. (2013). Experimental and Numerical Analysis of Coffee Husks biomass Gasification in a Fluidized bed Reactor. *Energy Procedia*. 36, 591 – 595. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.067>.
- Dahy H. (2017). Biocomposite materials based on annual natural fibres and biopolymers – Design, fabrication and customized applications in architecture. *Construction and Building Materials*. 147, 212 – 220. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.079>.
- Das P. and Tiwari P. (2018). Valorization of packaging plastic waste by slow pyrolysis. *Resources, Conservation & Recycling*. 128, 69 – 77. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.025>.
- Das S., Lee S. H., Kumar P., Kim K., Lee S. S. and Bhattacharya S. S. (2019). Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 228, 658 – 678. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.323>.
- Demirbas A. (2010). Fuels from biomass. *Biorefineries for biomass upgrading facilities*. pp. 33 – 74. Londres: Springer. ISBN: 978-1-84882-721-9.
- Dhyani V. and Bhaskar T. (2018). A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Renewable Energy*. 129, 695 – 716. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.04.035>.
- Dikobe D. G. and Luyt A. S. (2017). Thermal and mechanical properties of PP/HDPE/wood powder and MAPP/ HDPE/wood powder polymer blend composites. *Thermochimica Acta*. 654, 40 -50. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.05.002>.
- Elsayed I. G., Kanwugu O. N. and Ivantsova M. N. (2019). *Red Biotechnology: A Healthy World*. AIP Conference Proceedings. 2174 (1), 020211. Doi: 10.1063 / 1.5134362.
- Freitas L. C., Barbosa J. R., da Costa A. L., Bezerra F. W. F., Pinto R. H. H. and Carvalho R. N. (2021). From waste to sustainable industry: How can agro-industrial wastes help in the development of new products? *Resources, Conservation & Recycling*. 169, 105466. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105466>.

- Galhano R., Bordado J. C. and Mateus M. M. (2018). Estimation of HHV of lignocellulosic biomass towards hierarchical cluster analysis by Euclidean's distance method. *Fuel*. 221, 72 – 77. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.02.092>.
- García R., Pizarro C., Lavín A. G. and Bueno J. L. (2013). Biomass proximate analysis using thermogravimetry. *Bioresource Technology*. 139, 1-4. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.197>.
- Guedes R. E., Luna A. S. and Rodriguez A. (2018). Operating parameters for bio-oil production in biomass pyrolysis: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 129, 134 – 149. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.11.019>.
- Han J. S. and Rowell J. S. (1997). Chemical composition of fibers. En R. M. Rowell, R. A. Young, J. K. Rowell. *Paper and composites from agro-based resources*. pp. 83 – 134. Boca Ratón: CRC press. ISBN: 9781566702355.
- Han J., Yao X., Zhan Y., Oh S.; Kim L. and Kim H. (2017). A method for estimating higher heating value of biomass-plastic fuel. *Journal of the Energy Institute*. 90, 331 – 335. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.01.001>.
- Harsono S. S., Dila R. and Mel M. (2019). Coffee husk biopellet characteristics as solid fuel for combustion stove. *HSOA Journal of environmental science: Current research*. 2 (1). ISSN: HESCR, Open Access Journal.
- Hasan K. M. F., Horváth P. G., Kóczán Z. and Alpár T. (2021). Thermo-mechanical properties of pretreated coir fiber and fibrous chips reinforced multilayered composites. *Scientific Reports*. 11 (1), 3618. Doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-83140-0>.
- Heux S., Meynial-Salles I., O'Donohue M. J. and Dumon C. (2015). White biotechnology: State of the art strategies for the development of biocatalysts for biorefining. *Biotechnology Advances*. 33 (8), 1653-1670. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2015.08.004>.
- Hietala M. and Oksman K. (2018). Pelletized cellulose fibres used in twin-screw extrusion for biocomposite manufacturing: Fibre breakage and dispersion. *Composites: Part A*. 109, 538 – 545. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.04.006>.
- Hu X. and Gholizadeh M. (2019). Biomass pyrolysis: A review of the process development and challenges from initial researches up to the commercialisation. *Journal of Energy Chemistry*. 39, 109 – 143. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2019.01.024>.
- Huang L., Mu B., Yi X., Li S. and Wang Q. (2018). Sustainable Use of Coffee Husks For Reinforcing Polyethylene Composites. *Journal Polymer Environment*. 26 (1), 48 – 58. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0917-x>.
- Huysman S., Schaepmeester J., Ragaert K., Dewulf j. and Meester S. (2017). Performance indicators for a circular economy: A case study on post-industrial plastic waste. *Resources, Conservation and Recycling*. 120, 46 – 54. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.013>.
- Inácio, A. L. N., Nonato, R. C. y Bonse, B. C. (2017). Recycled PP/EPDM/talc reinforced with bamboo fiber: Assessment of fiber and compatibilizer content on properties using factorial design. *Polymer Testing*. 61, 214 -222. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.05.022>.
- Ismail T. M., El-Salam M. A., Monteiro E. and Rouboa A. (2016). Eulerian – Eulerian CFD model on fluidized bed gasifier using coffee husks as fuel. *Applied Thermal Engineering*. 106, 1391 – 1402. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.06.102>.

- Jeguirim M., Bikai J., Elmay Y., Limousy L. and Njeugna. E. (2014). Thermal characterization and pyrolysis kinetics of tropical biomass feedstocks for energy recovery. *Energy for Sustainable Development*. 23, 188-193. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2014.09.009>.
- Jeguirim M., Limousy L. and Fossard E. (2016). Characterization of coffee residues pellets and their performance in a residential combustor. *International Journal of Green Energy*, 13(6), 608-615. Doi: <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.888664>.
- Jin Z., Yin L., Chen D., Jia Y., Yuan J. and Hu Y. (2018). Co-pyrolysis characteristics of typical components of waste plastics in a falling film pyrolysis reactor. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2018.07.005>.
- Jung S., Cho M., Kang B. and Kim J. (2010). Pyrolysis of a fraction of waste polypropylene and polyethylene for the recovery of BTX aromatics using a fluidized bed reactor. *Fuel Processing Technology*. 91, 277 – 284. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2009.10.009>.
- Kraiem D., Pimbert S., Ayadi A. and Bradai. (2013). Effect of low content reed (*Phragmites australis*) fibers on the mechanical properties of recycled HDPE composites. *Composites: Part B*. 44, 368 – 374. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.04.062>.
- Kunwar B., Moser B. R., Chandrasekaran S. R., Rajagopalan N. and Sharma B. K. (2016). Catalytic and thermal depolymerization of low value post-consumer high density polyethylene plastic. 111, 884 – 892. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.06.024>.
- Kutz M. (2015). *Mechanical Engineers Handbook*. Capítulo 10, pp 1 – 35. Nueva York, Estados Unidos: Wiley & Sons. ISBN: 978-1118112823.
- Kwon H., Sunthornvarabhas J., Park J., Lee J., kim H., Piyachomkwan K., Sriroth K. and Cho D. (2014). Tensile properties of kenaf fiber and corn husk flour reinforced poly (lactic acid) hybrid bio-composites: Role of aspect ratio of natural fibers. *Composites: Part B*. 56, 232 – 237. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.003>.
- Lertwattanak P. and Suntijitto A. (2015). Properties of natural fiber cement materials containing coconut coir and oil palm fibers for residential building applications. *Construction and Building Materials*. 94, 664 – 669. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.154>.
- Letcher T. M. (2020). Introduction to plastic waste and recycling. Letcher T. M., *Plastic Waste and Recycling*. 3 – 12. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817880-5.00001-3>.
- Li Q., Long Y., Zhou H., Meng A., Tan Z. and Zhang Y. (2017). Prediction of higher heating values of combustible solid wastes by pseudocomponents and thermal mass coefficients. *Thermochimica Acta*. 658, 93 – 100. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.10.013>.
- Li Y., Jia S., Du S., Wang Y., Lv L. and Zhang J. (2018). Improved properties of recycled polypropylene by introducing the long chain branched structure through reactive extrusión. *Waste Management*. 76, 172 – 179. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.03.040>.
- Lin T., Limin B., Lin M. C., Lin J. Y., Lou C. W. and Lin J. H. (2019). Impact-resistant polypropylene/thermoplastic polyurethane blends: compatible effects of maleic anhydride on thermal degradation properties and crystallization behaviors. *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (4), 3389 – 3398. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.03.015>.
- Lokko Y., Heijde M., Schebesta K., Scholtès P., Van Montagu M. and Giacca M. (2018). Biotechnology and the bioeconomy—Towards inclusive and sustainable industrial development. *New Biotechnology*. 40, 5 -10. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.nbt.2017.06.005>.

- Lopez G., Artetxe M., Amutio M., Alvarez J., Bilbao J. and Olazar M. (2018). Recent advances in the gasification of waste plastics. A critical overview. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 82, 576 – 596. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.032>.
- López D. and Rojas A. (2018). Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 12 (23), 93 – 102. Doi: <https://doi.org/10.31908/19098367.3708>.
- Lu Z., Hu X. and Lu Y. (2017). Particle morphology analysis of biomass material based on improved image processing method. *International Journal of Analytical Chemistry*. 2017, 9 pages. Doi: <https://doi.org/10.1155/2017/5840690>.
- Luis V. H., Rodriguez M. C., Alatríste F., Charazo L. F. and Rangel J. R. (2018). Coconut endocarp and mesocarp as both biosorbents of dissolved hydrocarbons in fuel spills and as a power source when exhausted. *Journal of Environmental Management*. 211, 103 – 111. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.01.041>.
- Mahmud S., Hasan K. M. F., Jahid M. A., Mohiuddin K., Zhang R. and Zhu J. (2021). Comprehensive review on plant fiber-reinforced polymeric biocomposites. *Journal Materials Science*. 56, 7231–7264. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>.
- Mandolfino C. (2019). Polypropylene surface modification by low pressure plasma to increase adhesive bonding: Effect of process parameters. *Surface and Coatings Technology*. 366, 331 – 337. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.03.047>.
- Marrugo G., Valdés C. F., Gómez C. and Chejne F. (2019). Pelletizing of Colombian agro-industrial with crude glycerol. *Renewable Energy*. 134, 558 – 568. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.11.004>.
- Martín – Alfonso J. E and Franco J. M. (2015). Influence of polymer reprocessing cycles on the microstructure and rheological behavior of polypropylene/mineral oil oleogels. *Polymer Testing*. 45, 12 – 19. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2015.04.016>.
- Martínez J. A. (2016). Outlook of municipal solid waste in Bogotá (Colombia). *American Journal of Engineering and Applied Sciences*. 9 (3), 477 – 483. Doi: <http://10.3844/ajeassp.2016>.
- Mayson S. and Williams I. D. (2021). Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. *Resources, Conservation & Recycling*. 172, 105659. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105659>.
- Mazian B., Bergeret A., Benezet J. and Malhautier L. (2020). Impact of field retting and accelerated retting performed in a lab-scale pilot unit on the properties of hemp fibres/polypropylene biocomposites. *Industrial Crops and Products*. 143, 111912. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111912>.
- McCaffrey Z., Torres L., Flynn S., Cao T., Chiou B. S., Klamczynski A., Glenn G. and Orts W. (2018). Recycled polypropylene-polyethylene torrefied almond shell biocomposites. *Industrial Crops and Products*. 125, 425 – 432. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.09.012>.
- Migneault S., Koubaa A., Perré P. and Riedl B. (2015). Effects of wood fiber surface chemistry on strength of wood-plastic composites. *Applied Surface Science*. 343, 11 – 18. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.010>.
- Mythili R., Venkatachalam P., Subramanian P. and Uma, D. (2013). Characterization of bioresidues for biooil production through pyrolysis. *Bioresource Technology*. 138, 71 – 78. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.03.161>.

Moreno W. (1993). Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos. Ediciones Universidad Industrial de Santander.

Ng Q. H., Fui B. L., Yusup S., Minh A. C. and Ying K. Y. (2018). Modeling of the co-pyrolysis of rubber residual and HDPE waste using the distributed activation energy model (DAEM). *Applied Thermal Engineering*. 138, 336 – 345. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.069>.

Nunes S. G., Da Silva L. V., Amico S. C., Viana J. D. and Rico F. D. (2017). Study of Composites Produced with Recovered Polypropylene and Piassava Fiber. *Materials Research*. 20 (1), 144 – 150. Doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0659>.

Nhuchhen D. R. and Salam P. A. (2012). Estimation of higher heating value of biomass from proximate analysis: A new approach. *Fuel*. 99, 55-63. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.04.015>.

Oliveira J. L., Da Silva J. N., Pereira E. G., Filho D. O. and Carvalho D. R. (2013). Characterization and mapping of waste from coffee and eucalyptus production in Brazil for thermochemical conversion of energy via gasification. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 21, 52 – 58. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.025>.

Oliveira T. A., Oliveira R. R., Barbosa R., Azevedo J. B. and Alves T. S. (2017). Effect of reprocessing cycles on the degradation of PP/PBAT-thermoplastic starch blends. *Carbohydrate Polymers*. 168, 52 – 60. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.03.054>.

Perilla C. J. (2017). Estudio de alternativa al proceso de reciclaje de plástico PET en la Universidad Católica de Colombia. (Tesis de Pregrado). Universidad Católica de Colombia. Bogotá.

Pešić N., Živanović S., García R. and Papastergiou P. (2016). Mechanical properties of concrete reinforced with recycled HDPE plastic fibres. *Construction and Building Materials*. 115, 362 – 370. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.050>.

Pinzón J., Porras O., Medina J. and Acuña J. (2015). Coffee husk drying for wood plastic composites manufacture. Universidad de Los Andes, Bogotá. Colombia.

Piri I. S., Das O., Hedenqvist M. S., Väisänen T., Ikram S. and Bhattacharyya D. (2018). Imparting resiliency in biocomposite production systems: A system dynamics approach. *Journal of Cleaner Production*. 179, 450 – 459. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.065>.

Radoor S., Karayil J., Rangappa S. M., Siengchin S. and Parameswaranpillai J. (2020). A review on the extraction of pineapple, sisal and abaca fibers and their use as reinforcement in polymer matrix. *eXPRESS Polymer Letters*. 14 (4), 309 – 335. Doi: <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2020.27>.

Ramesh M., Palanikumar K., and Hemachandra R. K. (2017). Plant fibre based bio-composites: Sustainable and renewable green materials. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 79, 558 – 584. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.094>.

Ruales A. V. (2015). Evaluación del Potencial Energético y Bioactivo de los Residuos Generados por la Producción y Transformación de la Uva. Tesis de Maestría, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia.

Saarela M., Berlin M., Nygren H., Lahtinen P., Honkapää K. and Lantto R. (2017). Characterization of feather-degrading bacterial populations from birds' nests e Potential strains for biomass production for animal feed. *International Biodeterioration & Biodegradation*. 123, 262 – 268. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.006>.

Sabic. (2019a). Ficha Técnica: SABIC PP 575 P polypropylene homopolymer for injection molding. Recuperado de: <https://www.sabic.com>.

Sabic. (2019a). Ficha Técnica: SABIC HDPE M200056 high density polyethylene for injection moulding. Recuperado de: <https://www.sabic.com>.

Sahu P. and Prabu V. (2021). Techno-economic analysis of co-combustion of Indian coals with municipal solid waste in subcritical and supercritical based steam turbine power generating carbon-negative systems. *Energy*. 233, 121053. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121053>.

Sanchez M. L., Patiño W. and Cardenas J. (2020). Physical-mechanical properties of bamboo fibers-reinforced biocomposites: Influence of surface treatment of fibers. *Journal of Building Engineering*. 28, 101058. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101058>. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.101058>.

Sarasini F., Tirillo J., Zuurro A., Maffei G., Lavecchia R., Puglia D., Dominici F., Luzi F., Valente T. and Torre L. (2018). Recycling coffee silverskin in sustainable composites based on a poly (butylene adipate-co-terephthalate)/poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) matrix. *Industrial Crops & Products*. 118, 311 – 320. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.070>.

Segerholm K. (2012). Characteristics of Wood Plastic Composites based on modified wood (Tesis Doctoral). KTH Royal Institute of Technology. Estocolmo. Suecia. ISBN: 978-91-7501-554-5.

Setter C., Silva F. T. M., Assis M. R., Ataíde C. H., Trugilho P. F. and Oliveira T. J. P. (2020). Slow pyrolysis of coffee husk briquettes: Characterization of the solid and liquid fractions. *Fuel*. 261, 116420. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.116420>.

Shah D. (2013). Developing plant fibre composites for structural applications by optimising composite parameters: a critical review. *Journal of Materials Science*. 48, 6083 – 6107. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7458-7>.

Sher F., Iqbal S. Z., Imran M. and Snape C. E. (2019). Thermal and kinetic analysis of diverse biomass fuels under different reaction environment: A way forward to renewable energy sources. *Energy Conversion and Management*. Impreso, Artículo 112266. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112266>.

Shirahigue L. D. and Antonini S. R. (2020). Agro-industrial wastes as sources of bioactive compounds for food and fermentation industries. *Food Technology Ciência Rural*. 50 (4), 20190857. Doi: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190857>.

Sluiter A., Ruiz A., Scarlata C., Sluiter J. and Templeton D. (2005). Determination of extractives in biomass. National Renewable Energy Laboratory.

Sluiter A., Hames B., Ruiz R., Scarlata C., Sluiter J., Templeton D. and Crocker D. (2012). Determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. National Renewable Energy Laboratory.

Soares J., Demeke M. M., Foulquié M. R., Van de Velde M., Verplaetse A., Ribeiro A. A., Thevelein J. M. and Bueno P. M. (2016). Green coconut mesocarp pretreated by an alkaline process as raw material for bioethanol production. *Bioresource Technology*. 216, 744 – 753. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.05.105>.

Sousa D., Venâncio A., Belo I. and Salgado J. M. (2018). Mediterranean agro-industrial wastes as valuable substrates for lignocellulolytic enzymes and protein production by solid-state fermentation. *Journal of Science, Food and Agriculture*. 98, 5248 – 5256. Doi: [10.1002/jsfa.9063](https://doi.org/10.1002/jsfa.9063).

Sun Z. (2018). Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 25 (5), 835 – 846. Doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0072>.

- Suriapparao D. V., Boruah B., Raja D. and Vinu R. (2018). Microwave assisted co-pyrolysis of biomasses with polypropylene and polystyrene for high quality bio-oil production. *Fuel Processing Technology*. 175, 64 – 75. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2018.02.019>.
- Theander O. (1982). Cellulose, hemicellulose and extractives. En R. P. Overend, T. A. Milne, L. K. Mudge, *Fundamentals of Thermochemical Biomass Conversion*. pp. 40 - 42. Inglaterra: Elsevier. Doi: https://doi.org/10.1007/978-94-009-4932-4_2.
- Touati N., Kaci M., Bruzard S. and Grohens Y. (2011). The effects of reprocessing cycles on the structure and properties of isotactic polypropylene/cloisite 15A nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*. 96, 1064 – 1073. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2011.03.015>.
- Tran D., Lee H. R., Jung S., Park M. S. and Yang J. (2018). Lipid-extracted algal biomass based biocomposites fabrication with poly (vinyl alcohol). *Algal Research*. 31, 525 – 533. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.016>.
- Trejos J. D. (2014). Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda.
- Uzun B. B. and Yaman E. (2017). Pyrolysis kinetics of walnut shell and waste polyolefins using thermogravimetric analysis. *Journal of the Energy Institute*. 90, 825 – 837. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.joei.2016.09.001>.
- Väisänen T. (2016). Effects of thermally extracted Wood distillates on the characteristics of Wood-plastic composites (Tesis Doctoral). Universidad del este de Finlandia. Kuopio, Finlandia. Recuperado de: http://epublications.uef.fi/pub/urn_isbn_978-952-61-2124-6/urn_isbn_978-952-61-2124-6.pdf.
- Van de Wiel C. C. M., Smulders M. J. M., Visser R. G. F. and Schaart J. G. (2016). New developments in green biotechnology – an inventory for RIVM. Wageningen University. Wageningen. Holanda. Doi: <https://doi.org/10.18174/385481>.
- Vassilev S. V., Baxter D., Andersen L. K. and Vassileva C. G. (2010). An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel*. 89, 913 – 933. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.10.022>.
- Yuan H., Fan H., Shan R., He M., Gu J. and Chen Y. (2018). Study of synergistic effects during co-pyrolysis of cellulose and high-density polyethylene at various ratios. *Energy Conversion and Management*. 157, 517 – 526. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.12.038>.

CAPÍTULO 2. VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS: PROPIEDADES MECÁNICAS

2.1. Resumen

La producción de materiales compuestos es una de las alternativas de manejo eficiente para las fibras vegetales residuales y plásticos pos industrial que se generan en Colombia. Este tipo de componentes se mezclan mediante procesos de transformación térmica (extrusión – inyección) con la finalidad de obtener materiales de mejores propiedades fisicoquímicas, térmicas y mecánicas. Estas últimas hacen referencia a la caracterización de los materiales compuestos mediante ensayos de tracción, flexión e impacto, principalmente. Dichas pruebas fueron realizadas a los biocompuestos producidos y reportados en el Capítulo 1, con el fin de conocer la capacidad de estos para resistir fuerzas o cargas externas a las cuales fueron sometidos. Entre los resultados se resalta el aumento en el módulo tensil y de flexión, como consecuencia de la incorporación de cargas (fibra vegetal) en las matrices poliméricas. Este comportamiento se evidenció mayoritariamente en los biocompuestos obtenidos a partir de: i) cisco de café y polipropileno pos industrial (PPR) en una relación de porcentaje en peso 30:70 (refuerzo:matriz) y un tamaño de partícula entre 75 y 425 micras, y ii) cisco de café y polietileno de alta densidad pos industrial (PEADR) en una relación de porcentaje en peso 30:70 (refuerzo:matriz) y un tamaño de partícula entre 75 y 425 micras. Dichos biocompuestos se identificaron como BC4 y BC10, respectivamente, arrojando los siguientes resultados: i) para BC4 se obtuvo aumentos en el Módulo Elástico en Tracción (67.33%) y Flexión (92.95%), con valores de 2690.25 y 2353 MPa, correspondientemente, y ii) para BC10 se presentaron incrementos en el Módulo Elástico en Tracción (98.62%) y Flexión (113.84%), con valores de 1696.25 y 1282.5 MPa, respectivamente. Adicionalmente, se observó que la resistencia a la tracción y al impacto disminuyeron (Resistencia a la tracción: 13.34 – 36.25 %; resistencia al impacto: 0.19 – 34.80%) en todos los materiales compuestos, como resultado de la baja interacción o relación refuerzo – matriz en los materiales compuestos. Este comportamiento varió positivamente al adicionar anhídrido maléico injertado en polipropileno (MAPP) a la formulación BC4. El resultado obtenido fue el aumento en la resistencia a la tracción (4.71%) y la flexión (15.68%) del material modificado (BC4). Finalmente, se concluye que los biocompuestos reforzados con fibras altamente celulósicas (CCa) presentaron un mejor comportamiento mecánico al compararlos con las matrices poliméricas reforzadas con estopa de coco (SC).

2.2. Marco teórico

Para comprender las propiedades de los materiales, es necesario tener presente su estructura a escala atómica y/o microscópica. Para esto se creó la tabla periódica de los elementos, sistema por el cual se determinan las propiedades más relevantes de los materiales. La combinación de estos proporciona un sinnúmero de productos que en estado sólido son denominados o clasificados como materiales y que, en términos generales, se agrupan en tres grandes grupos dependiendo de su constitución elemental así como sus características o propiedades. Estos grupos son los materiales metálicos, los cerámicos y los poliméricos (Balasubramanian, 2017).

Los materiales poliméricos, comúnmente conocidos como “plásticos”, tienen la capacidad de ser moldeados con facilidad en la mayoría de los casos y poseen una amplia y atractiva lista de propiedades útiles en un gran número de aplicaciones ingenieriles, donde la resistencia no es un factor determinante. Estos a su vez, también son usados ampliamente en la obtención de materiales compuestos (Balasubramanian, 2017). Teniendo en cuenta sus propiedades y características, los materiales poliméricos pueden clasificarse en tres grupos (McKeen, 2019):

- Polímeros Termoplásticos (TP): este tipo de polímeros a temperatura ambiente se encuentran en estado sólido, pero cuando son sometidos a altas temperaturas cambian su estado a líquido – viscoso.
- Polímeros Termofijos (TS): estos materiales no toleran ciclos repetidos de calentamiento y enfriamiento, ya que tienden o son susceptibles a degradarse con facilidad.
- Elastómeros (E): son materiales poliméricos con una gran capacidad elástica.

En la naturaleza son pocos los materiales constituidos por un solo elemento. La gran mayoría son mezclas de diferentes elementos, los cuales al combinarse producen materiales compuestos. Estos presentan un desempeño, generalmente, superior al de cada elemento por separado y se generan mediante interacciones sin reacción química, dando lugar a nuevas características o propiedades específicas (Ngo, 2020). En los materiales compuestos se deben considerar dos componentes: la matriz y el elemento reforzante. Estos, varían dependiendo del uso o las cargas a las cuales puedan someterse. La matriz se puede definir como el componente responsable de transmitir esfuerzos, así como de definir las propiedades físicas y químicas del material compuesto. En ciertos casos, este componente presenta propiedades que permiten proteger el material compuesto contra los agentes ambientales a los que pueda estar sometido. Por su parte, el refuerzo corresponde al elemento que proporciona resistencia y rigidez al compuesto. La matriz se encarga de mantener unido este tipo de elemento, por medio de la transmisión de esfuerzos entre fibras generando una estructura sólida (Ngo, 2020; Wondmagegnehu *et al.*, 2021). Entre los materiales compuestos encontramos aquellos que se producen con componentes o elementos naturales. Estos son comúnmente conocidos como biocompuestos, reemplazando las fibras o matrices sintéticas por materiales de origen vegetal (Guna *et al.*, 2017).

Los biocompuestos se encuentran sometidos a diferentes factores como la distribución de las fibras y el tipo de refuerzo o matriz, los cuales influyen en su desempeño y en sus propiedades mecánicas (Uitterhaegen *et al.*, 2018). Las propiedades mecánicas de dichos materiales dependen, principalmente, de su composición y otros factores como la temperatura y el tiempo que se tardan en responder a un esfuerzo. (Beltrán y Marcilla, 2012). Para el caso de los materiales compuestos, se definen como la capacidad de resistir fuerzas o cargas externas a las cuales son sometidos sus componentes constituyentes (Murugan, 2020). Existen diferentes tipos de ensayos que determinan dichas propiedades, entre los que se destacan los de tracción, flexión e impacto. Los resultados de estas pruebas son utilizados como insumo en la selección de materiales eficientes para el diseño de piezas que soporten fuerza (Prasanna *et al.*, 2019). La prueba de tracción es la metodología por la cual se determina la respuesta del material ante una fuerza tendiente a estirarlo. Este tipo de procedimiento se desarrolla en una máquina universal de tracción, la cual deforma las probetas del material a ensayar, al aplicar una carga progresiva en sentido axial (Beltrán y Marcilla, 2012). La probeta se sujeta por sus extremos en la máquina por medio de mordazas que a su vez someten la muestra a tensión progresiva, tal como se muestra en la Figura 2.1. Esta carga provoca que la probeta se alargue y adelgace de un modo progresivo hasta alcanzar la fractura de la pieza.

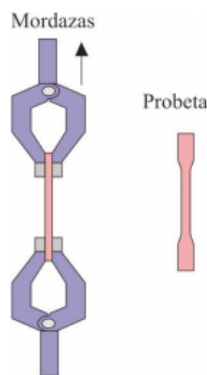


Figura 2. 1. Mordazas y probetas para ensayo de tracción (Beltrán y Marcilla, 2012).

En la Tabla 2.1 se presentan algunos resultados reportados en la literatura para ensayos de tracción efectuados en diferentes biocompuestos. Analizando estos datos se puede mencionar que la mezcla policloruro de vinil (PVC) con cascarilla de arroz arrojó el mayor valor de resistencia a la tracción (44.7 MPa). Adicionalmente, al contrastar los valores obtenidos para materiales compuestos a base de polipropileno (PP) y polietileno de alta densidad (PEAD), se observa que la adición de harina de cedro y pulpa de celulosa genera la mayor variación positiva en este parámetro, para el PP (32.5 MPa) y PEAD (42.9 MPa) respectivamente.

Tabla 2. 1. Resistencia a la tracción en materiales compuestos

Matriz	Refuerzo	R. Tracción MV ^e [MPa]	R. Tracción Bio ^f [MPa]	Contenido de Fibra (%)	Tamaño de Partícula (µm)	AA ^d (%)
PEAD ^a virgen	Aserrín del duramen de cedro blanco		24.5			
	Aserrín de albura de cedro blanco		24			
	Aserrín de Pino de Banks	17	29	35	300 - 425	-
	Aserrín de Picea negra		30			
	Corte de corteza de Pino de Banks		22			
PEAD ^a virgen	Pulpa de celulosa		42.9			
	Madera de álamo		38.9			
	Madera de abedul	21.6	32	40	150 – 710	3
	Madera de abeto		31.8			
	Corteza de álamo		22.5			
	Corteza de abeto		23			
PVC ^c virgen	Cascarilla de arroz	32	44.7	60	45	-
PP ^b reciclado	Harina de madera de pino de California	27.5	22	50	149	1
PP ^b virgen	Harina de cedro	27	32.5	20	-	1.6

^a Polietileno de Alta Densidad, ^b Polipropileno, ^c Policloruro de Vinilo, ^d Agente Acoplante, ^e Resistencia a la Tracción en Matriz Virgen, ^f Resistencia a la Tracción en Materiales Compuestos Madero Plásticos. Tomado de López y Rojas (2018).

Es común realizar también un ensayo de flexión, mediante el cual un material es sometido a esfuerzos inducidos por una carga sobre su eje longitudinal. El resultado de esta prueba se determina mediante la combinación de esfuerzos de tracción, compresión y cizalla, como se muestra en la Figura 2.1.

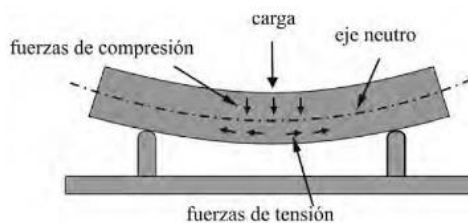


Figura 2. 2. Fuerzas implicadas en un ensayo de flexión. Fuente: Beltrán y Marcilla (2012).

Las probetas empleadas en los ensayos de flexión son paralelepípedos del material a evaluar y presentan una ventaja sobre las de tracción al ser más fáciles de preparar dada su forma. El método mayormente empleado para realizar este tipo de ensayo consiste en un sistema de tres puntos de carga en el cual la probeta o muestra a analizar se apoya en dos soportes mientras la carga se dispone en la parte central del ejemplar (Beltrán y Marcilla, 2012).

En la Tabla 2.2 se exponen algunos resultados reportados en la literatura para ensayos de flexión efectuados en diferentes biocompuestos. Al analizar estos datos se puede mencionar que la mezcla PP reciclado con harina de madera de pino californiano arrojó el mayor valor de resistencia a la flexión (65 MPa). En adición, al contrastar los valores obtenidos para materiales compuestos a base de PEAD, se observa que la adición de pulpa de celulosa genera la mayor variación positiva en este parámetro (55.7 MPa). Los cambios en esta propiedad se relacionan de forma directa con el tipo de fibra empleada, generándose mejores resultados para los tallos de semilla oleaginosa. Por otro lado, si se compara entre polímeros vírgenes o reciclados, los principales resultados corresponden a la adición de hoja de palma de aceite y pulpa celulósica en PP y PEAD vírgenes, respectivamente.

Tabla 2. 2. Resistencia a la flexión en materiales compuestos.

Matriz	Refuerzo	R. Flexión MV ^e [MPa]	R. Flexión Bio ^f [MPa]	Contenido de Fibra (%)	Tamaño de Partícula (µm)	AA ^d (%)
PEAD ^a virgen	Aserrín del duramen de cedro blanco		31			
	Aserrín de albura de cedro blanco		32			
	Aserrín de Pino de Banks	17.5	40	35	300 - 425	-
	Aserrín de Picea negra		40			
	Corte de corteza de Pino de Banks		27			
PP ^b virgen	Tallos de maíz		30		1010	
	Tallos de semilla oleaginosa	-	33	45	1310	2
	Tallo de caña		31		980	
PP ^b reciclado	Harina de madera de pino de California	58	65	50	150	1
PP ^b virgen	Harina de cedro	31	45	20	-	1.6

PEAD ^a virgen	Fibras de madera de maple	-	54.8	50	75 - 150	2
Poliéster virgen	Bagazo de caña	27.3	26.4	5	500 - 1000	-
PEAD ^a virgen	Pulpa de celulosa		55.7			
	Madera de álamo		52			
	Madera de abedul	19.9	49.2	40	150 – 710	3
	Madera de abeto		46.9			
	Corteza de álamo		32.9			

^a Polietileno de Alta Densidad, ^b Polipropileno, ^c Policloruro de Vinilo, ^d Agente Acoplante, ^e Resistencia a la Flexión en Matriz Virgen, ^f Resistencia a la Flexión en Materiales Compuestos Madero Plásticos. Tomado de López y Rojas (2018).

Los ensayos de tracción y de flexión generan información sobre el módulo y la resistencia asociados a un material. Para el caso de los materiales compuestos obtenidos a partir de matrices poliméricas, los cambios en el módulo permiten establecer si dicho material se hace más o menos rígido (Beltrán y Marcilla, 2012). Por otro lado, cambios en la resistencia de un material compuesto reflejan su capacidad para soportar mayor o menormente esfuerzos de tensión y cargas transversales sin llegar a romperse o curvarse (Perez, 2008).

Por su parte, el ensayo de impacto estudia la transición dúctil – frágil de un material y mide la cantidad energía absorbida en la zona plástica antes de alcanzar la fractura súbita. Así mismo, es una propiedad utilizada como indicador de dureza asociada a un material (Patterson *et al.*, 2019). El equipo empleado para determinar esta propiedad consiste de un sistema pendular compuesto por un martillo unido a un eje de giro. En el desarrollo de la prueba, el péndulo se deja caer y, cuando alcanza el punto más bajo de su recorrido, toda la energía potencial se transforma en cinética. Es ahí donde se produce el impacto sobre la probeta, absorbiendo parte de la energía entregada por el péndulo, como se observa en la Figura 2.3. El resultado obtenido es la resistencia al impacto, expresada como la energía empleada por el péndulo (Beltrán y Marcilla, 2012).

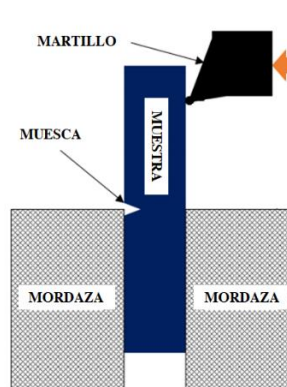


Figura 2. 3. Diagrama del ensayo de impacto. Fuente: Patterson *et al.* (2019).

En la Tabla 2.3 se presentan algunos datos de resistencia al impacto reportados en la literatura para diferentes materiales compuestos. Con base a estos se puede mencionar que la mezcla de PP con tallos de semillas oleaginosas arrojó el mayor valor de resistencia al impacto (24 J/m). Adicionalmente, se evidencia que este parámetro presentó cambios negativos al incorporar una mayor proporción de fibra en la matriz polimérica, requiriendo una baja cantidad de energía para romper el material compuesto. Contrario a esto, la resistencia al impacto aumenta con la adición de un agente ligante (AA) y al mezclar diferentes polímeros. Lo anterior indica que la incorporación de polímeros distintos (PP y PEAD) en la mezcla, reduce la fragilidad del biocompuesto e incrementa la energía de fractura (López y Rojas, 2018).

Tabla 2. 3. Resistencia al impacto en materiales compuestos.

Matriz	Refuerzo	R. Impacto MV ^c [J/m]	R. Impacto Bio ^d [J/m]	Contenido de Fibra (%)	Tamaño de Partícula (µm)	AA ^e (%)
PP ^a virgen	Tallos de maíz		22		1010	
	Tallos de semilla oleaginosa	-	24	45	1310	2
	Tallo de caña		21		980	
PVC ^b virgen	Cascarilla de arroz	72	50	20	250	-
PP ^a reciclado	Harina de madera de pino de California	7.2	6.5	50	150	1

^a Polipropileno, ^b Policloruro de Vinilo, ^c Resistencia al Impacto en Matriz Virgen, ^d Módulo de Flexión en Materiales Compuestos Madero Plásticos, ^e Agente Acoplante. Tomado de López y Rojas (2018).

Para el desarrollo de este capítulo, se evaluarán los tres ensayos mencionados anteriormente empleando los biocompuestos obtenidos en el Capítulo 1, los cuales se muestran en la Tabla 2.4.

2.3 Métodos experimentales

Los materiales compuestos obtenidos experimentalmente, presentados en la Tabla 2.4, se caracterizaron mecánicamente, efectuando tres tipos de ensayos: tracción, flexión e impacto.

Tabla 2. 4. Biocompuestos obtenidos.

Biocompuesto	Matriz	Refuerzo	Proporción de fibra (%)	No. Tamiz
BC1	PPR	CCa	10	16 – 20
BC2	PPR	CCa	30	16 – 20
BC3	PPR	CCa	10	40 - 200
BC4	PPR	CCa	30	40 – 200
BC5	PPR	SC	10	40 – 200
BC6	PPR	SC	30	40 – 200
BC7	PEADR	CCa	10	16 – 20
BC8	PEADR	CCa	30	16 – 20

BC9	PEADR	CCa	10	40 - 200
BC10	PEADR	CCa	30	40 - 200
BC11	PEADR	SC	10	40 - 200
BC12	PEADR	SC	30	40 - 200

PPR: polipropileno pos industrial, PEADR: polietileno de alta densidad pos industrial, CCa: cisco de café, SC: estopa de coco.

2.3.1. Ensayo de tracción

Con el fin de garantizar que el material de ensayo no presente variaciones en su estructura interna, se establecieron como condiciones de trabajo en el laboratorio una temperatura de 24°C y un porcentaje de humedad del 56%. Estas condiciones son establecidas por la norma ASTM D638, en la cual se estipula el tipo de probeta a emplear para el ensayo de tracción, así como sus dimensiones. La Figura 2.4 muestra el tipo de probeta a utilizar en este ensayo, mientras que la Tabla 2.5 presenta las dimensiones de esta. Cabe resaltar que las probetas empleadas en esta prueba son tipo V, según lo estipulado por la norma antes mencionada.

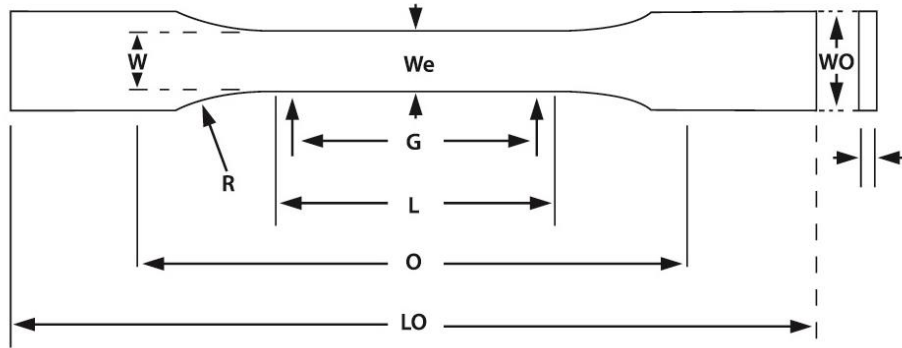


Figura 2. 4. Tipo de probeta empleada en los ensayos de tracción de materiales compuestos, según norma ASTM D638.

Tabla 2. 5. Dimensiones de la probeta empleada en los ensayos de tracción de materiales compuestos.

Dimensiones	Probeta Tipo V
W - Ancho de la sección estrecha (mm)	3.18
L - Largo de la sección estrecha (mm)	9.53
WO - Ancho general (mm)	9.53
LO - Largo general (mm)	63.50
G - Longitud de calibración (mm)	7.62
O - Distancia entre mordazas (mm)	25.40
R - Radio de filete	12.70
1 - Profundidad (mm)	3.20

Las probetas fueron inyectadas utilizando un equipo comercial monohusillo marca BOY XS (Figura 2.5), proporcionado por el grupo GITEM de la Universidad Autónoma de Occidente (Cali). Dicho equipo cuenta con las siguientes especificaciones técnicas: i) diámetro de husillo de 12 mm, ii) relación de longitud/diámetro (L/D) de 19.6, iii) velocidad máxima de inyección de 24 cm³/s, y iv) presión máxima de 3130 bar (41.4 psi).



Figura 2. 5. Equipo de inyección empleado para la obtención de probetas en ensayos mecánicos.

Por otro lado las condiciones operacionales con las cuales se obtuvieron las probetas empleadas en el ensayo de tracción (Figura 2.4) se presentan en la Tabla 2.6. Estas condiciones se establecieron con base a la experiencia adquirida y recomendaciones técnicas del grupo GITEM.

Tabla 2. 6. Condiciones de operación del equipo de inyección empleado en la obtención de probetas para ensayo de tracción.

Parámetro	Valor
Temperatura de barril (°C)	185.0
Temperatura de cabezal (°C)	180.0
Tiempo de inyección (seg)	0.6
Tiempo pos presión (seg)	3.8
Tiempo de llenado del tornillo (seg)	7.2
Tiempo del ciclo (seg)	37.6
Recorrido del tornillo (mm)	18.7
Presión de llenado (bar)	60.0
Presión de inyección (bar)	80.0

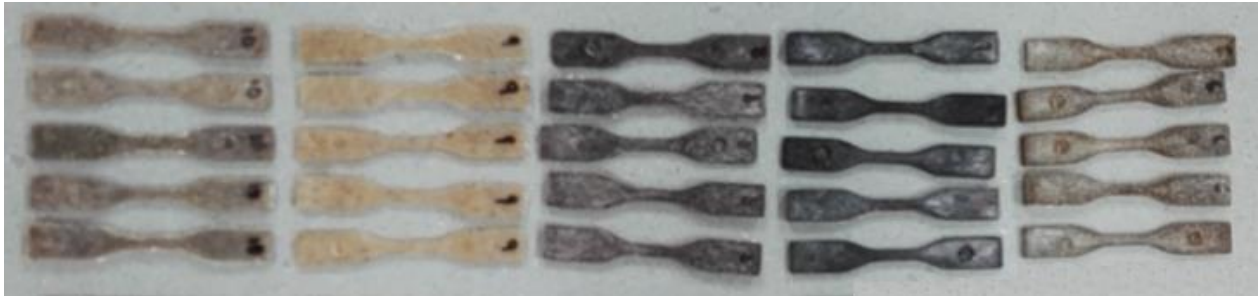


Figura 2. 6. Probetas empleadas en los ensayos de tracción.

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en un equipo universal de ensayos marca Instron 3366 (Figura 2.6) proporcionado por el Grupo de Investigación en Tecnología para la Manufactura (GITEM) de la Universidad Autónoma de Occidente, según lo establecido por la norma ASTM D638. Así mismo, se empleó un extensómetro de 10 mm con la finalidad de obtener resultados confiables del módulo tensil. Los parámetros empleados para el ensayo se presentan en la Tabla 2.7.

Tabla 2. 7. Parámetros establecidos para pruebas mecánicas de tracción.

Parámetro	Valor
Distancia inicial de extensómetro	10 mm
Distancia entre mordazas	26.4 mm
Velocidad de ensayo (PPI)	7.5 mm/minuto



Figura 2. 7. Montaje de probeta para ensayo de tracción.

2.3.2. Ensayo de flexión

Buscando que el material de ensayo no presente variaciones en su estructura, se establecieron como condiciones de trabajo en el laboratorio una temperatura de 24°C y un porcentaje de humedad del 56%, iguales que en el ensayo de tracción. Estas condiciones son establecidas por la norma ASTM D790, en la cual se estipula las dimensiones de la probeta a emplear. Dichas dimensiones fueron: 63.5 x 12.7 x 3.2 mm de largo, ancho y profundidad, respectivamente. Las probetas fueron inyectadas utilizando un equipo comercial monohusillo marca BOY XS (Ver Figura 2.4), empleando los parámetros presentes en la Tabla 2.8. Estas condiciones se establecieron con base a la experiencia adquirida y recomendaciones técnicas del grupo GITEM.

Tabla 2. 8. Condiciones de operación del equipo de inyección empleado en la obtención de probetas para ensayo de flexión.

Parámetro	Valor
Temperatura de barril (°C)	185
Temperatura de cabezal (°C)	180
Tiempo de inyección (seg)	0.62
Tiempo pos presión (seg)	3.8
Tiempo de llenado del tornillo (seg)	7.21
Tiempo del ciclo (seg)	42
Recorrido del tornillo (mm)	23.2
Presión de llenado (bar)	60
Presión de inyección (bar)	80

Las pruebas de flexión fueron llevadas a cabo en un equipo universal de ensayos marca Instron 3366. Este ensayo se efectuó bajo las especificaciones de la norma ASTM D790. Dicha norma recita que para cada probeta se debe calcular una velocidad de ensayo, empleando la ecuación 2.1.

$$V = \frac{ZL^2}{6d} \quad \text{Ec. 2. 1}$$

Donde, V es la velocidad del ensayo de flexión (mm/minuto), Z es la tasa de esfuerzo de la fibra exterior ($Z = 0.01$), L es la separación del soporte ($L = 50$ mm) y d es la profundidad o espesor de la probeta (mm).

A partir de la ecuación 2.1 se obtiene la velocidad del ensayo de flexión, teniendo en cuenta parámetros como el espesor de la probeta. Estos resultados, incluido el espesor de las muestras, se presentan en las Tablas 2.9 y 2.10.

Tabla 2. 9. Velocidades del ensayo de flexión para materiales compuestos.

Material	Muestra	Espesor (mm)	Velocidad (mm/min)	Material	Muestra	Espesor (mm)	Velocidad (mm/min)
BC1	1	3.06	1.36	BC7	1	3.10	1.34
	2	3.06	1.36		2	3.12	1.34
	3	3.02	1.38		3	3.13	1.33
	4	3.07	1.36		4	3.15	1.32
	5	3.12	1.34		5	3.11	1.34
BC2	1	3.12	1.34	BC8	1	3.05	1.37
	2	3.05	1.37		2	3.05	1.37
	3	3.05	1.37		3	2.90	1.44
	4	3.04	1.37		4	2.95	1.40
	5	3.44	1.21		5	3.05	1.37
BC3	1	3.02	1.38	BC9	1	3.05	1.37
	2	3.03	1.38		2	3.05	1.37
	3	3.11	1.34		3	3.05	1.37
	4	3.04	1.37		4	3.05	1.37
	5	3.10	1.34		5	3.00	1.39
BC4	1	3.03	1.38	BC10	1	3.05	1.37
	2	3.03	1.38		2	3.05	1.37
	3	3.01	1.38		3	3.04	1.37
	4	3.02	1.38		4	3.06	1.36
	5	3.04	1.37		5	3.05	1.37
BC5	1	3.05	1.37	BC11	1	3.10	1.34
	2	3.07	1.36		2	3.09	1.35
	3	3.06	1.36		3	3.07	1.36
	4	3.04	1.37		4	3.10	1.34
	5	3.03	1.38		5	3.10	1.34
BC6	1	3.05	1.37	BC12	1	3.05	1.37
	2	3.06	1.36		2	3.10	1.34
	3	3.04	1.37		3	3.10	1.34
	4	3.00	1.39		4	3.10	1.34
	5	3.11	1.34		5	3.10	1.34

Tabla 2. 10. Velocidades del ensayo de flexión para matrices poliméricas.

Material	Muestra	Espesor (mm)	Velocidad (mm/min)	Material	Muestra	Espesor (mm)	Velocidad (mm/min)
PPR	1	3.02	1.38	PEADR	1	3.11	1.34
	2	3.01	1.38		2	3.04	1.37
	3	3.01	1.38		3	3.09	1.35
	4	3.02	1.38		4	3.07	1.36
	5	3.05	1.37		5	3.07	1.36

El tiempo de duración de los ensayos varió conforme la deformación máxima establecida para cada biomaterial (Deformación máxima = 5%, para todos los biocompuestos). Las probetas empleadas en el ensayo de flexión se muestran en la Figura 2.7.

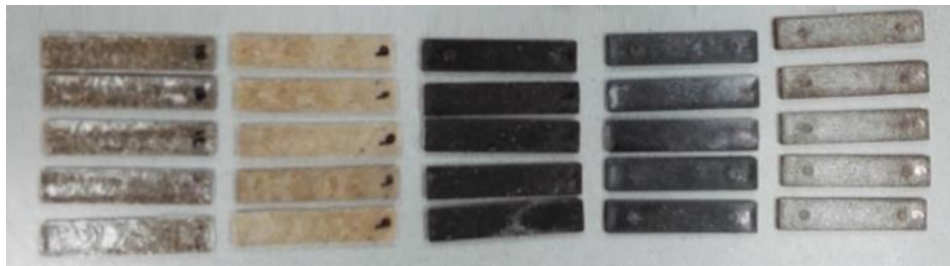


Figura 2. 8. Probetas empleadas en los ensayos de flexión.

2.3.3. Ensayo de impacto

Con la finalidad de tener un material sin variaciones en su estructura, se establecieron como condiciones de trabajo en el laboratorio una temperatura de 24°C y un porcentaje de humedad del 56%, semejante a lo establecido para los ensayos de tracción y flexión. Estos parámetros se establecieron bajo la norma ASTM D256, en la cual se presentan otros aspectos como el tipo de probeta a emplear, su dimensionamiento y la metodología para las pruebas de impacto. Las dimensiones de las probetas empleadas en el ensayo fueron 63.5 x 12.7 x 3.2 mm de largo, ancho y profundidad, respectivamente. En la parte central de cada una de estas, se realizó un pequeño entalle con una profundidad de 2.5 mm y un radio de 0.25 (Figura 2.8), según lo establecido en la norma antes mencionada. La hendidura se logró efectuar utilizando una máquina fresadora, con un ángulo de 40° en los dientes de corte (Figura 2.9).



Figura 2. 9. Probetas empleadas en el ensayo de impacto.

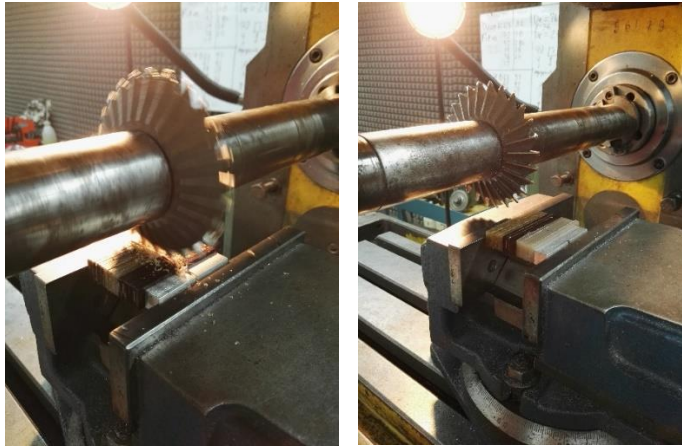


Figura 2. 10. Proceso de entalle de probetas empleadas en la prueba de impacto.

El ensayo se llevó a cabo en una máquina pendular tipo Izod marca Tinius Olsen, modelo IT 504, proporcionada por la Universidad del Valle (Cali). Los parámetros requeridos por el equipo fueron el ancho y el espesor de cada una de las probetas, así como la masa de las pesas instaladas en el péndulo (9.7 N) para llevar a cabo el ensayo. Estos parámetros se introducen al equipo, para posteriormente ser procesados por el mismo. En la Figura 2.10 se muestra el tipo de equipo empleado en la prueba de impacto.

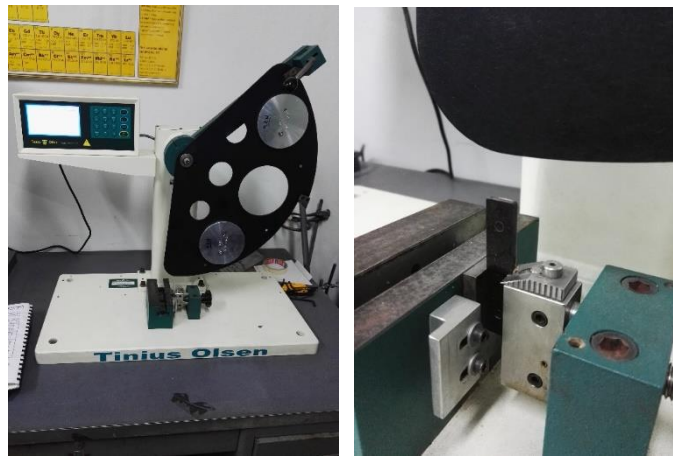


Figura 2. 11. Equipo empleado en el ensayo de impacto.

2.3.4. Uso de agente acoplante (MAPP)

Se planteó utilizar un agente acoplante con el fin de verificar la variación en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos, principalmente los cambios en propiedades de tensión y flexión. Inicialmente se realizó un análisis estadístico, empleando las metodologías o test de ANOVA y DUNCAN, buscando realizar una comparación múltiple entre los diferentes parámetros mecánicos de flexión y tracción obtenidos para los materiales compuestos. Estas pruebas fueron realizadas con ayuda del software para análisis estadístico SAS, proporcionado por la Universidad Nacional de Colombia sede Palmira. Teniendo en cuenta los resultados arrojados por esta prueba, se determinó que biocompuesto presentó las mayores variaciones. Una vez identificado este material, se procedió a incorporar el agente acoplante, el cual para efectos de este trabajo fue Anhídrido Maléico injertado en Polipropileno (MAPP). Este compuesto fue proporcionado por

el Grupo de Investigación en Tecnología para la Manufactura (GITEM) de la Universidad Autónoma de Occidente y se empleó en mezclas con PPR o biocompuestos obtenidos a partir de este polímero. Dicho agente de acople se utilizó con este tipo de materiales principalmente por su afinidad química y buscando evitar la mezcla de diferentes matrices (Lu *et al.*, 2000). La proporción empleada de este componente fue de 3%, contenido en peso, teniendo en cuenta valores reportados en la literatura (Ayrimis *et al.*, 2015; Caicedo *et al.*, 2015; Migneault *et al.*, 2015; Hietala y Oksman, 2018). El proceso mediante el cual se incorporó al biocompuesto seleccionado fue por inyección, empleando un equipo marca BOY XS proporcionado por GITEM y los parámetros de operación citados en las Tablas 2.6 y 2.8. Emplear un porcentaje superior o inferior de agente acoplante influye de forma directa en el costo del biocompuesto y en el mejoramiento de las características del mismo. El MAPP es el compuesto de mayor cuantía, por lo cual adicionar cantidades más grandes elevaría el costo del material final. Por otro lado, la reducción en la proporción de MAPP generaría cambios menos significativos en las propiedades del biocompuesto (Essabir *et al.*, 2016; Uitterhaegen *et al.*, 2018).

Los biocompuestos con MAPP fueron caracterizados por ensayos mecánicos de tracción y flexión, según la metodología descrita en los apartados 2.3.1 y 2.3.2.

2.4. Resultados y discusión

2.4.1 Ensayos de tracción y flexión

En las Figuras 2.11, 2.12, 2.13 y 2.14 se presentan los resultados de los ensayos de tracción y flexión realizados a los materiales compuestos de la Tabla 2.4. Así mismo, estos resultados se resumen en la Tabla 2.11, observándose cambios significativos en el módulo tensil y de flexión para BC4 (Módulo elástico en tracción: 2690.25 MPa, Módulo elástico en flexión: 2353 MPa) y BC10 (Módulo elástico en tracción: 1696.25 MPa, Módulo elástico en flexión: 1282.5).

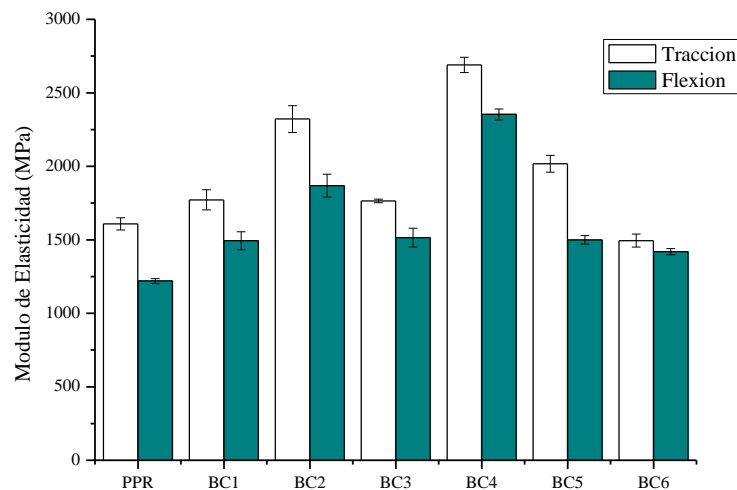


Figura 2. 12. Módulo de elasticidad en materiales compuestos empleando PPR como matriz polimérica.

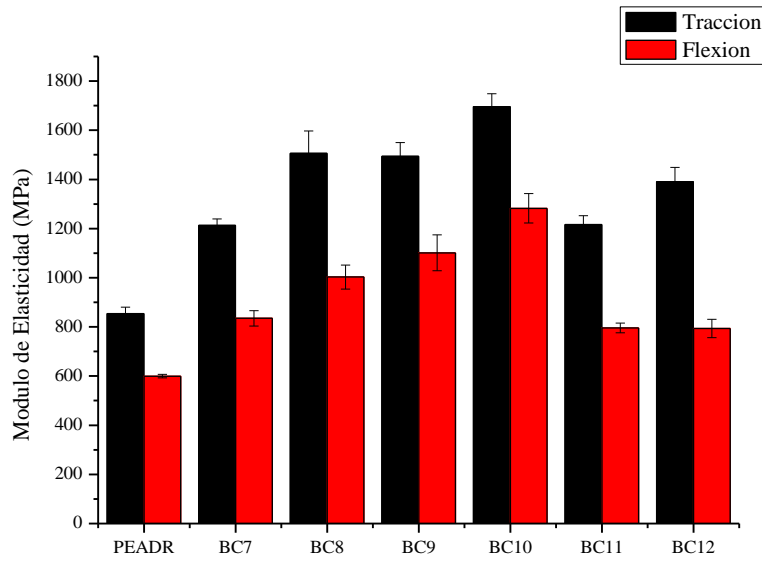


Figura 2. 13. Módulo de elasticidad en materiales compuestos empleando PEADR como matriz polimérica.

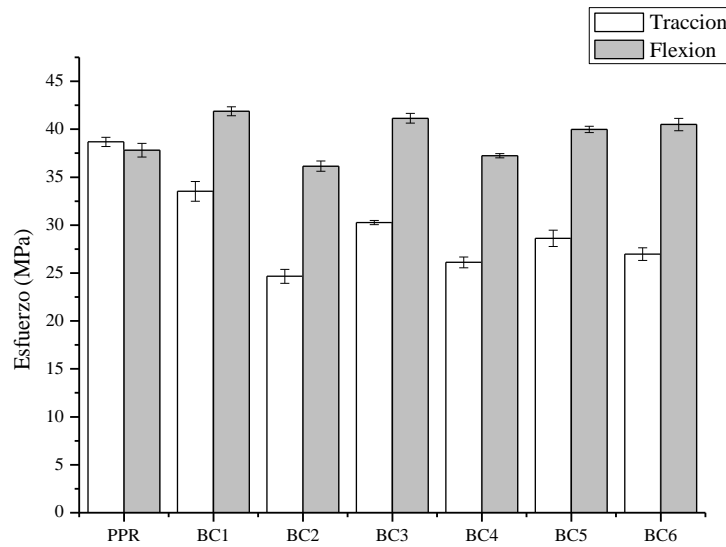


Figura 2. 14. Resistencia a la tracción y flexión en materiales compuestos empleando PPR como matriz polimérica.

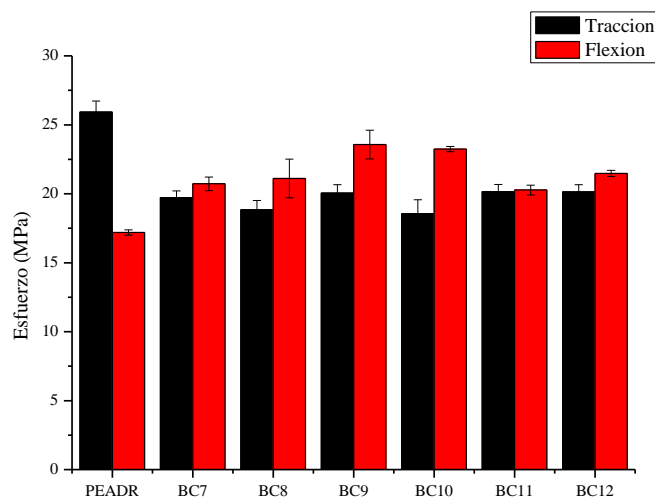


Figura 2. 15. Resistencia a la tracción y flexión en materiales compuestos empleando PEADR como matriz polimérica.

Tabla 2. 11. Propiedades mecánicas de los biocompuestos obtenidos.

Material	Tensión		Flexión		Resistencia al impacto (J/m)
	Esfuerzo (MPa)	Módulo elástico (MPa)	Esfuerzo (MPa)	Módulo elástico (MPa)	
PPR	38.68 ± 0.47	1607.75 ± 41.50	37.81 ± 0.71	1219.50 ± 15.95	10.66 ± 0.70
PEADR	25.93 ± 0.80	854.00 ± 25.86	17.19 ± 0.19	599.75 ± 7.08	15.19 ± 0.75
BC1	33.52 ± 1.03	1771.75 ± 67.99	41.88 ± 0.46	1494.5 ± 60.39	10.64 ± 1.49
BC2	24.66 ± 0.73	2321.50 ± 91.83	36.15 ± 0.54	1867.75 ± 78.01	8.77 ± 1.25
BC3	30.27 ± 0.23	1764.25 ± 11.41	41.14 ± 0.51	1514.75 ± 63.55	8.76 ± 0.51
BC4	26.11 ± 0.55	2690.25 ± 52.17	37.24 ± 0.23	2353.00 ± 36.99	7.50 ± 0.18
BC5	28.62 ± 0.85	2017.00 ± 56.69	39.98 ± 0.34	1500.00 ± 28.17	6.95 ± 0.42
BC6	26.97 ± 0.65	1494.75 ± 43.71	40.49 ± 0.64	1419.25 ± 20.47	10.26 ± 0.93
BC7	19.72 ± 0.49	1213.00 ± 26.22	20.72 ± 0.50	835.00 ± 31.58	13.17 ± 0.99
BC8	18.84 ± 0.67	1506.00 ± 90.79	21.11 ± 1.41	1003.00 ± 48.70	13.60 ± 1.05
BC9	20.06 ± 0.59	1493.50 ± 56.65	23.57 ± 1.04	1101.25 ± 73.08	14.52 ± 0.85
BC10	18.56 ± 1.01	1696.25 ± 52.67	23.24 ± 0.19	1282.50 ± 59.58	13.80 ± 0.54
BC11	20.15 ± 0.52	1216.00 ± 36.63	20.27 ± 0.36	795.75 ± 20.12	14.14 ± 0.93
BC12	20.13 ± 0.52	1390.50 ± 58.08	21.47 ± 0.23	793.50 ± 37.58	13.57 ± 0.76

Al analizar las Figuras 2.11 y 2.12 se observa que la incorporación de un refuerzo vegetal en la matriz polimérica mejora el módulo de elasticidad de esta en tracción y flexión. Los materiales compuestos, elaborados con PP como matriz, que presentaron mayores aumentos en el módulo de tracción, fueron BC2 y BC4 (30.74 y 40.24%, respectivamente). Este efecto coincide con lo reportado por Naghmouchi *et al.*

(2013), Ayrimis *et al.* (2015), Arjmandi *et al.* (2017), Nunes *et al.* (2017), Uitterhaegen *et al.* (2018) y Sarasini *et al.* (2018). A su vez, dichos autores afirman que el módulo de tracción varía de forma directa con la cantidad de refuerzo incorporada en el material compuesto, de modo que adicionar una mayor proporción de fibra genera un aumento en el módulo elástico en tracción. Este mismo comportamiento se presentó en los biocompuestos generados a partir de PEADR, siendo congruente con Bajwa *et al.* (2011) y Huang *et al.* (2018) quienes reportan incrementos en el módulo elástico con la incorporación de fibras vegetales. BC8 y BC10 fueron los biocompuestos constituidos por polietileno de alta densidad (PEAD) que presentaron un mayor incremento en el módulo de tracción (43.29 y 49.65%, correspondientemente). Hidalgo y Salinas (2019) mencionan que estos resultados se relacionan con la rigidez de las fibras, de tal forma que el efecto sobre el módulo de tracción de los biocompuestos es consecuencia de un refuerzo más rígido en comparación con la matriz polimérica. Por otro lado, en las Figuras 2.11 y 2.12 se muestran los resultados de módulo de flexión, donde BC2 y BC4 fueron los biocompuestos que reflejaron un mayor aumento, comparado con el PPR (34.71 y 48.17%, respectivamente). En adición, BC8 y BC10 representaron los materiales con un incremento superior en contraste con el PEADR (83.62 y 113.84%, de forma respectiva). Con relación a este comportamiento, Nourbakhsh y Ashori (2010) mencionan que el incorporar cargas vegetales en una matriz polimérica, genera variaciones en su módulo de flexión. Así mismo, la rigidez de la matriz termoplástica incrementa con la adición de una mayor cantidad de fibra, influyendo en el aumento del módulo elástico en flexión (Bajwa *et al.*, 2011; Moreno *et al.*, 2013; Bledzki *et al.*, 2015; Uitterhaegen *et al.*, 2018; Agustin – Salazar *et al.*, 2018; Sarasini *et al.*, 2018). Adicionalmente, Sarasini *et al.* (2018) reportan que la adición de cargas lignocelulósicas rígidas restringe la movilidad molecular de las cadenas poliméricas, viéndose reflejado en aumentos del módulo de elasticidad en tracción y flexión.

A pesar que el módulo de elasticidad mejoró en los biocompuestos obtenidos, se observa que no fue igual en todos los casos. Si se comparan los resultados obtenidos según el tipo de refuerzo y el tamaño de partícula empleado, se evidencia que la estopa de coco presentó menores cambios en comparación con el cisco de café. Esto se puede explicar teniendo en cuenta el análisis estructural de las fibras. El contenido de celulosa es reflejo de la proporción de oxígeno en la fibra y responsable del grado de resistencia de la misma, por lo cual se presentan mayores cambios en el módulo de elasticidad y resistencia a la flexión en tejidos vegetales que contengan una proporción mayor de celulosa o una mayor relación atómica O/C en su defecto (Ayrimis *et al.*, 2015; Migneault *et al.*, 2015; Arjmandi *et al.*, 2017; Huang *et al.*, 2018). Para el caso de la fibras vegetales empleadas, el CCa presentó un mayor contenido de celulosa (33.38%) que la SC (22.24%), característica que se refleja en incrementos superiores de la flexión del PPR y PEADR reforzados con CCa. Adicional a esto, Shireesha y Nandipati (2019) explican que existen otras propiedades de las fibras vegetales, como la resistencia y la rigidez, que dependen de la proporción de celulosa. Paralelamente, la rigidez de las fibras se encuentra directamente relacionada con los cambios en el módulo elástico en tracción (Essabir *et al.*, 2018), argumento que se refleja en los resultados obtenidos para BC2, BC4, BC8 y BC10. Otros autores (Moreno *et al.*, 2013; Kuburi *et al.*, 2017; Sarasini *et al.*, 2018) mencionan que los incrementos en este parámetro se generan debido a la adición de grandes cargas de material fibroso. Este comportamiento se logró evidenciar en todos los biocompuestos obtenidos, a excepción de BC6, el cual presentó un comportamiento diferente a causa de la baja dispersión del refuerzo. Essabir *et al.* (2018) explican que los resultados en el módulo de tracción son el reflejo de la dispersión de fibras biomásicas en la matriz polimérica, siendo mucho mayor para BC4 y BC10 en contraste con BC2 - BC6 y BC8 - BC12, respectivamente.

Otro de los parámetros a analizar es la resistencia a la tracción, la cual disminuyó en todos los biocompuestos (13.34 – 36.25 y 22.29 – 28.42%, para los materiales BC1 – BC6 y BC7 – BC12 respectivamente) comportamiento que coincide con los resultados reportados por Naghmouchi *et al.* (2013), Nunes *et al.* (2017), Huang *et al.* (2018) y Tran *et al.* (2018). Dicho comportamiento se puede atribuir a la descohesión o baja interacción entre la matriz hidrófoba y el refuerzo hidrofílico. Este último genera concentración de tensión, iniciando y propagando las grietas que conllevan a fallas aceleradas en los materiales (Essabir *et al.*, 2018). En adición, Nunes *et al.* (2017) exponen que la falta de uniformidad en la distribución de la fibra genera disminución en la resistencia a la tracción. Así mismo, al incorporar una mayor cantidad de fibra, se

propicia la interacción refuerzo – refuerzo en lugar de la relación refuerzo – matriz. Esto genera una reducción en el número de partículas reforzantes disponibles y del área íntima de contacto con el polímero. Además, la sobresaturación por fibra es causante del deslizamiento de las cadenas poliméricas sobre la superficie irregular del material fibroso (Tran *et al.*, 2018). Analizando otro tipo de parámetros, Bledzki *et al.* (2015) mencionan que los cambios en la resistencia a la tracción en materiales compuestos, se encuentran relacionados con el contenido de celulosa de la fibra vegetal empleada como refuerzo. Un alto contenido de celulosa proporciona una mayor resistencia a las fibras y, por consiguiente, a los materiales compuestos (Liu *et al.*, 2019). Este comportamiento se refleja en los resultados obtenidos, teniendo en cuenta que las mayores variaciones se presentaron para el CCa, siendo el refuerzo con un contenido superior de celulosa. Por otro lado, para el caso de los materiales compuestos producidos a partir de PPR, la resistencia a la flexión aumento ligeramente en BC1, BC3, BC5 y BC7 presentando incrementos del 9.7, 8.1, 5.4 y 6.6%, respectivamente. Estos resultados concuerdan con los reportes de Bledzki *et al.* (2015) y Nunes *et al.* (2017). Diferente a esto, BC2 y BC4 presentaron una resistencia a la flexión menor que el polímero puro, coincidiendo con lo reportado por Petchwattana y Covavisaruch (2013) los cuales atribuyen este comportamiento a la formación de aglomeraciones de partículas fibrosas consecuencia del aumento en la carga reforzante. En el caso de los materiales obtenidos a partir de PEADR, la resistencia a la flexión presentó cambios significativamente positivos en cada una de las mezclas (BC7, BC8, BC9, BC10, BC11 y BC12) respecto al polímero puro, presentándose mejores resultados para BC9 y BC10. Gallagher y McDonald (2013) mencionan que este comportamiento se atribuye a un mejor desempeño de las fibras más finas en comparación de las gruesas. Consideran que la interacción entre el polímero y un refuerzo de mayores dimensiones (tamaño de partícula), genera mayores concentraciones de estrés a lo largo de la interfaz.

Al realizar un análisis de varianza de los resultados asociados a las propiedades de tensión y flexión, se determinó que la matriz polimérica fue la variable en común que presentó diferencias significativas en todos los ensayos ($p < 0.05$). De igual forma, el refuerzo y el tipo de fibra fueron variables significativas asociadas a los resultados de módulo de flexión y resistencia a la tensión ($p < 0.05$), respectivamente. Adicionalmente se realizó una prueba de medias de Tukey comparando los resultados relacionados a las variables significativas y los polímeros puros. Dicho prueba permitió establecer que existen diferencias significativas entre estos datos y que las mezclas de PPR – Fibra arrojaron los mejores resultados.

En la Figuras 2.15 y 2.16 se presentan las curvas de deformación vs esfuerzo de los biocompuestos obtenidos a partir de PPR y PEADR, respectivamente. Naghmouchi *et al.* (2013) reportan que la deformación de un material compuesto disminuye de forma proporcional, casi lineal, con el contenido de fibra. Dicho efecto se ilustra en las Figuras 2.15 y 2.16, donde la deformación de los compuestos se reduce (60.89 y 59.81% para el PPR (BC6) y el PEADR (BC10), respectivamente) con la adición de una mayor proporción de fibra. El comportamiento de los biocompuestos se podría relacionar con la discontinuidad en la interfaz matriz:refuerzo, restringiendo su capacidad para deformarse (Hidalgo y Salinas, 2019). En complemento, Nunes *et al.* (2017) mencionan que los polímeros puros presentan una mayor ductilidad que los biocompuestos. Esta característica se ve reflejada en la deformación de los materiales, siendo mayor para las matrices termoplásticas en contraste con un polímero reforzado. Este comportamiento indica la fragilidad adquirida por el material plástico al mezclarse con fibras vegetales (Gonzalez *et al.*, 2019).

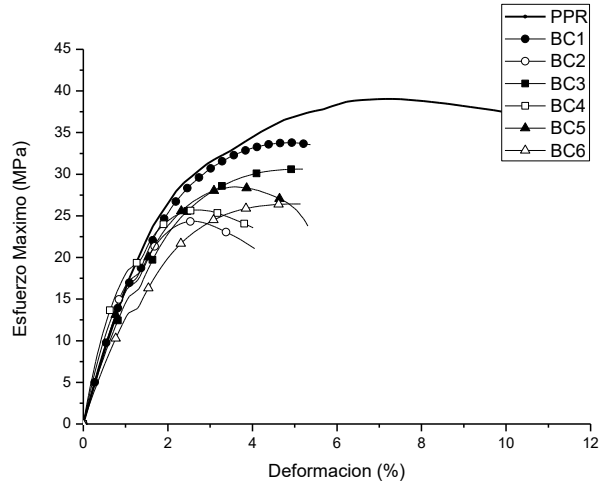


Figura 2. 16. Curva Deformación vs Esfuerzo para los biocompuestos obtenidos a partir de PPR.

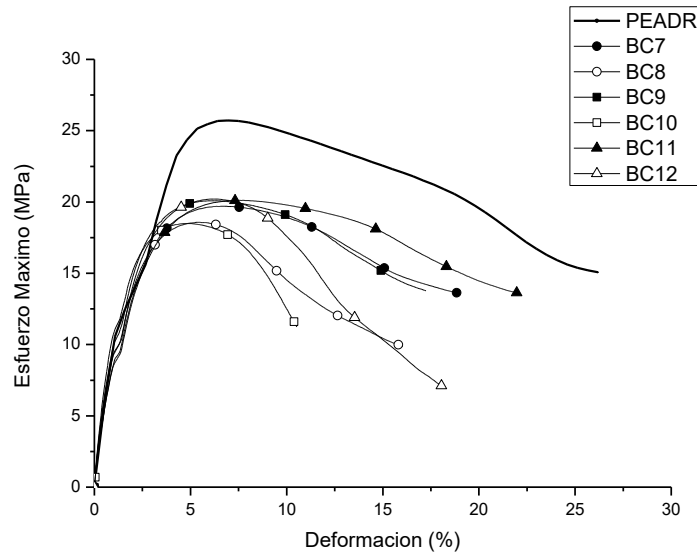


Figura 2. 17. Curva Deformación vs Esfuerzo para los biocompuestos obtenidos a partir de PEADR.

2.4.2 Ensayo de impacto

En la Figura 2.17 se presentan los resultados del ensayo mecánico de resistencia al impacto para los biocompuestos generados. En esta gráfica se logra observar una disminución de este parámetro en todos los compuestos, siendo BC1 y BC9 los materiales con menores cambios respecto a las matrices poliméricas. (0.17 y 4.46% al comparar con el PPR y el PEADR, respectivamente). Analizando las variaciones en los materiales compuestos a base de PPR, se encontró que el tamaño de partícula influyó en los resultados obtenidos de resistencia al impacto, generándose mayores variaciones adversas con la incorporación de fibras de menor tamaño (75 – 425 μm). Las fibras de tamaño más fino, al presentar mayor área superficial, muestran una adhesión interfacial baja con la matriz polimérica. Este efecto induce la aparición de una mayor cantidad de cavidades en la interfaz refuerzo – matriz, las cuales al actuar como defectos internos

(puntos de concentración de estrés), reducen la eficiencia en la transferencia de energía dentro de los materiales compuestos, afectan negativamente la energía de fractura y por ende la resistencia al impacto disminuye (Petchwattana y Covavisaruch, 2013; Moreno *et al.*, 2013; Huang *et al.*, 2018; Agustin – Salazar *et al.*, 2018; Komal *et al.*, 2020). Para el caso de los biocompuestos obtenidos a partir de PEADR, la carga de fibra vegetal incidió en la reducción de la resistencia al impacto, produciéndose mayores variaciones negativas con la adición de 30% de refuerzo. Al incorporarse una mayor cantidad de fibra, las partículas tienden a aglomerarse y disminuir su dispersión. A su vez, se genera una interfaz o relación partícula – partícula la cual incrementa la propagación de grietas y la mala adhesión interfacial con la matriz (Petchwattana y Covavisaruch, 2013; Alias *et al.*, 2019; Sanchez *et al.*, 2019). En general, la resistencia al impacto en los biocompuestos obtenidos fue menor en comparación con los polímeros puros, coincidiendo con los reportes de Nourbakhsh *et al.* (2011), Yang *et al.* (2007), Nunes *et al.* (2017), Uitterhaegen *et al.* (2018) para el caso de los biocompuestos obtenidos a partir de PP, así como con Petchwattana *et al.* (2012), Adhikary *et al.* (2008), Petchwattana *et al.* (2013) y Huang *et al.* (2018), en el caso de los compuestos obtenidos a partir de PEAD. Dicha tendencia se puede apreciar al comparar los resultados obtenidos para BC1 – BC2, BC3 – BC4, BC9 – BC10 y BC11 – BC12.

El CCa fue el material reforzante que generó las menores variaciones negativas en la resistencia al impacto de los biocompuestos producidos. Este comportamiento se puede explicar teniendo en cuenta la distribución de las partículas vegetales en la matriz polimérica. Una repartición uniforme del refuerzo, reduce la aglomeración de la fibra, aumenta la cohesión entre la biomasa reforzante y el polímero al mismo tiempo que mejora la transferencia de esfuerzos entre estos dos componentes (Bajwa *et al.*, 2016; Fitch *et al.*, 2019). Por lo cual, se podría decir que el CCa, en comparación con la SC, se distribuye de mejor manera en las matrices poliméricas empleadas (PPR y PEADR). Al tener en cuenta otro tipo de parámetros, como la caracterización estructural de las fibras, Uitterhaegen *et al.* (2018) reportan que el contenido de celulosa de la fibra se relaciona de forma directa con la resistencia al impacto del material compuesto. Este componente se asocia con la compatibilidad entre el refuerzo y matriz polimérica, mejorando las interacciones en la interfaz para fibras con un alto contenido de celulosa y una mayor resistencia al impacto del biocompuesto (Tran *et al.*, 2018). Lo anterior se refleja en el comportamiento y comparación entre BC3 – BC5, BC9 – BC11 y BC10 – BC12. Cabe resaltar que BC3, BC9 y BC10 fueron reforzados con CCa, fibra que presentó un mayor contenido de celulosa (33.38%) en contraste con la SC (22.24%). Otro tipo de parámetro a analizar es el diámetro de partícula utilizado, para lo cual Bledzki *et al.* (2015) reportan que las fibras con un diámetro mayor de partícula, generan secciones transversales más grandes. Este efecto se puede traducir en una mayor absorción de la energía de impacto o en la necesidad de aplicar una fuerza superior para romper el material. A pesar que no se presentaron mejoras en la resistencia al impacto (reducción entre 0.17 – 34.82 y 4.46 – 13.30% al comparar los biocompuestos con el PPR y el PEADR, respectivamente), el comportamiento expuesto por Bledzki *et al.* (2015) se evidenció al comparar BC1 – BC3, BC2 – BC4, BC3 – BC5, BC9 – BC11 y BC10 – BC12, en donde el primer compuesto de cada emparejamiento presentó un diámetro de fibra más grande (1603.9 μm para BC1 y BC2, 201.3 μm para BC3, BC4, BC9 y BC10, 166.5 μm para BC5, BC11 y BC12).

Al realizar un análisis de varianza de los resultados asociados al ensayo de impacto, se determinó que la matriz polimérica fue la variable que presentó diferencias significativas ($p < 0.05$). Adicionalmente se realizó una prueba de medias de Tukey comparando los resultados relacionados a la variable significativa y los polímeros puros. Dicho prueba permitió establecer que existen diferencias significativas entre estos datos y que las mezclas de PEADR – Fibra arrojaron los mejores resultados.

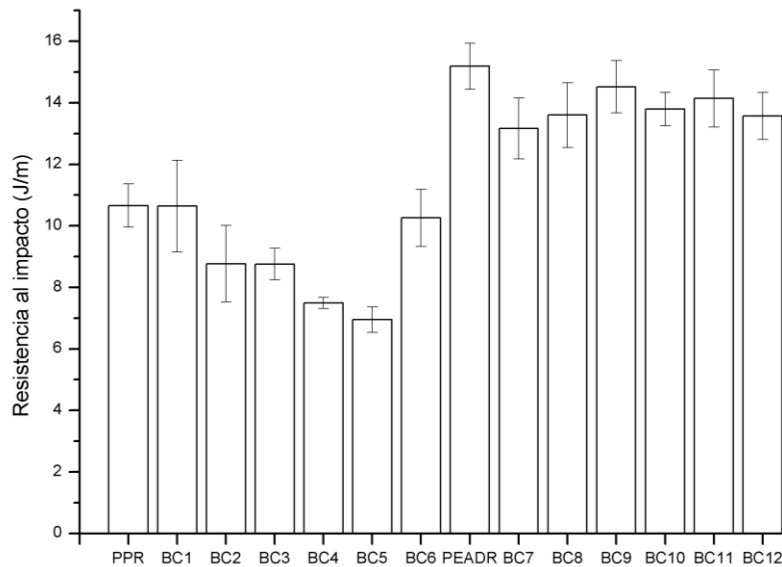


Figura 2. 18. Resistencia al impacto en materiales compuestos.

2.4.3 Uso de agente acoplante

Se efectuó una prueba o test de ANOVA y DUNCAN a los materiales obtenidos con el fin de determinar la existencia de diferencias significativas entre estos. Las variables tenidas en cuenta para las pruebas antes mencionadas fueron el módulo elástico, la deformación, la resistencia a la tracción y flexión de los biocompuestos obtenidos. Los resultados del test de ANOVA y DUNCAN se presentan en las Tabla 2.12, y 2.13.

Tabla 2. 12. Resultados obtenidos del test de ANOVA.

Propiedad	Parámetros		
	CV (%)	R-cuadrado	Pr > F
Módulo tensil	3.8913	0.9851	< 0.0001
Resistencia a la tracción	3.1416	0.9867	< 0.0001
Deformación	35.0318	0.9525	< 0.0001
Módulo de flexión	4.2601	0.9895	< 0.0001
Resistencia a la flexión	2.3863	0.9955	< 0.0001

CV: coeficiente de variación, Pr > F: valor de probabilidad significativo asociado con el valor F, F: factor de variación.

Según los resultados presentados en la Tabla 2.12 se logró establecer que los datos asociados al módulo de elasticidad y la resistencia a la tracción y flexión en los materiales compuestos obtenidos, presentaron una distribución o comportamiento normal (CV < 30 -35%) (Segura, 2000). Así mismo, el parámetro Pr > F permitió definir las propiedades mecánicas analizadas en el test ANOVA, como características altamente significativas (Pr > F: < 0.01) (Segura, 2000).

Para poder realizar el test DUNCAN, las muestras deben haber pasado exitosamente el test ANOVA, siendo este último necesario para determinar si el tratamiento es altamente significativo. Teniendo en cuenta que el valor $Pr > F$ es < 0.01 se determinó que el tratamiento es altamente significativo, por lo tanto se puede aplicar DUNCAN. Dicho test se puede definir como una prueba de comparaciones múltiples de medias para ver la variación mediante correlaciones canónicas (asociaciones entre grupos de variables vs otro grupo). (Alvarez y Gonzalez, 2018). Los resultados obtenidos en el test de DUNCAN (Tabla 2.13) muestran que no existen diferencias significativas entre i) BC1 (Media: 2642.07) y BC3 (Media: 2649.52), ii) PPR (Media: 2288.57), BC6 (Media: 2364.87) y BC10 (Media: 2378.40), iii) BC8 (Media: 1999.82) y BC9 (Media: 2075.22), y iv) BC7 (Media: 1639.38) y BC11 (Media: 1608.28). Por el contrario, las mayores diferencias se presentaron entre BC4 (Media: 4037.57) – PPR y BC4 – PEADR (Media: 1164.54). Estos resultados son el reflejo de lo reportado por Agustín – Salazar *et al.* (2018), Sarasini *et al.* (2018) y Tran *et al.* (2018), los cuales mencionan que la proporción de celulosa y la cantidad de fibra incorporada, afectan de forma positiva la rigidez en los materiales compuestos, reflejándose en aumentos del módulo elástico y una mayor resistencia a la tracción. Así mismo, las agrupaciones arrojadas por el test de DUNCAN indican que tanto difieren los materiales compuestos con los polímeros vírgenes, teniendo en cuenta las propiedades de tensión y flexión. Con base a esta agrupación, se logró analizar el comportamiento y variación de los resultados obtenidos, para lo cual BC4 fue el material que varió en mayor proporción (76.42%) sus propiedades de flexión y tensión con respecto a los polímeros vírgenes.

Tabla 2. 13. Resultados del test de DUNCAN aplicado a los materiales compuestos obtenidos.

Agrupación DUNCAN	Media	Material
A	4037.57	BC4
B	3353.44	BC2
C	2824.83	BC5
D	2649.52	BC3
D	2642.07	BC1
E	2378.40	BC10
E	2364.87	BC6
E	2288.57	PPR
F	2075.22	BC9
F	1999.82	BC8
G	1739.79	BC12
H	1639.38	BC7
H	1608.28	BC11
I	1164.54	PEADR

Los resultados de la Tabla 2.13, asociados a la prueba de DUNCAN, fueron el insumo para la selección del material compuesto a tratar con anhídrido maléico injertado en polipropileno (MAPP). Al ser BC4 la mezcla con mayor variación en sus propiedades de flexión y tracción (Módulo elástico: 48.18% y 40.24%, respectivamente), se procedió a tratarla con MAPP. En adición, el tipo de fibra incide directamente en la elección del biocompuesto a tratar con agente ligante. Migneault *et al.* (2015) explican que las reacciones de esterificación producidas por la interacción entre el refuerzo y el agente de compatibilidad, aumentan con el contenido de oxígeno de la fibra. Dicho elemento se relaciona de forma directa con la proporción de carbohidratos presentes en la superficie del material vegetal, incidiendo en una mayor cantidad de sitios polares (grupos hidroxilos, OH) disponibles para reaccionar. Lo anterior permite argumentar la elección de BC4 como biocompuesto modificado por MAPP, ya que el cisco de café (41.27%) presentó mayor contenido de oxígeno en comparación con la estopa de coco (38.84%).

En la Tabla 2.14 se presentan los resultados de las pruebas mecánicas obtenidos para BC4 + MAPP. En comparación con los resultados obtenidos para BC4 sin agente acoplante, el MAPP mejoró en 4.71 y 15.68% la resistencia a la tracción y la flexión en la muestra modificada, respectivamente. Este efecto coincide con lo reportado por Abdelwahab *et al.* (2019), los cuales mencionan que la incorporación de agente acoplante mejora la adhesión matriz-refuerzo así como la transferencia de esfuerzos. Esto a su vez genera aumentos en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos.

Tabla 2. 14. Propiedades de tracción y flexión en BC4 modificado con MAPP.

Parámetro	Valor
Resistencia a la tracción (MPa)	27.34 ± 0.57
Módulo de elasticidad en tracción (MPa)	2612.40 ± 132.12
Resistencia a la flexión (MPa)	43.08 ± 0.76
Módulo de elasticidad en flexión (MPa)	2361.67 ± 42.19

Las mejoras en las propiedades mecánicas pueden atribuirse a la incorporación de MAPP en BC4. Este tipo de agente acoplante se emplea para mejorar la adhesión interfacial entre la matriz hidrófoba y el refuerzo hidrófilo. Incide en la interacción química de los componentes mediante la formación de enlaces covalentes entre los grupos anhídrido maléicos del MAPP y los grupos hidroxilo presentes en la superficie de la fibra celulósica, al mismo tiempo que las cadenas de PP presentes en el agente de acoplamiento se entrelazan de forma aleatoria con la matriz polimérica del biocompuesto (Naghmouchi *et al.*, 2013; Delgado – Aguilar *et al.*, 2018; Huang *et al.*, 2018; Sameni *et al.*, 2018). Dicho comportamiento coincide con los resultados obtenidos por Naghmouchi *et al.* (2013), Dikobe y Luyt (2017), Nunes *et al.* (2017) y Khan *et al.* (2020), mostrando que las propiedades de flexión y tracción mejoran debido al fortalecimiento de la unión interfacial entre el refuerzo y la matriz polimérica. Así mismo, se puede observar que la presencia de MAPP disminuye el módulo de elasticidad del material compuesto (Módulo de elasticidad en tracción: 2.89%). Este resultado se puede atribuir al efecto plastificante generado por la presencia de MAPP en el polímero que no migró a la interfaz matriz – refuerzo (Doineau *et al.*, 2021).

2.5. Aplicaciones de los materiales compuestos

Diferentes estudios reportan que los biocompuestos están reemplazando parte de los materiales empleados en la actualidad, mostrándose como una alternativa sostenible en la fabricación de productos básicos y en aplicaciones de ingeniería (Rodríguez *et al.*, 2020). Dentro de estas alternativas se encuentran su uso en la industria automotriz, la manufactura de electrodomésticos, la producción de materiales de construcción y

de empaque, siendo estas últimas las áreas de mayor afinidad con los resultados de propiedades mecánicas obtenidos. Como materiales estructurantes, los biocompuestos cumplen con las especificaciones de resistencia a la tensión (9 – 21 MPa) y flexión (12.5 – 29.5 MPa) de la madera y guadua, reportados en el Reglamento Colombiano de Construcción Sismo Resistente NSR-10. Adicional a lo anterior, los materiales compuestos se pueden utilizar como relleno en la elaboración de artículos para exteriores, bancos para parques, vallas, postes y cercas (Sun, 2018). Así mismo, los biocompuestos pueden ser utilizados en la fabricación de empaques, teniendo en cuenta que las normas técnicas colombianas no los inhabilitan para este tipo de actividad. Los refuerzos naturales incorporados a las matrices poliméricas pueden reducir significativamente el costo de los materiales de empaque o embalaje, al mismo tiempo que mejoran propiedades como la resistencia, la rigidez y la deformación térmica (Sun, 2018).

2.6. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados de los ensayos mecánicos realizados, se puede concluir que la cantidad de fibra empleada para reforzar las matrices poliméricas generó aumentos en los módulos de tracción (PP como matriz: 9.73 – 67.33%; PEAD como matriz: 42.04 – 98.62%) y flexión (PP como matriz: 16.38 – 92.95 %; PEAD como matriz: 39.22 – 113.84%). Dicho comportamiento se logró apreciar en los materiales reforzados con cisco de café y estopa de coco, presentándose mejores resultados para el cisco. Así mismo, la adición de una mayor carga reforzante produce una disminución en la resistencia a la tracción (PP como matriz: 13.34 – 36.25%; PEAD como matriz: 22.29 – 28.42%) como consecuencia de una baja interacción entre la fibra y el polímero. Dicho comportamiento genera una mayor concentración de tensión en el material, propiciando la aparición de grietas y fallas. A pesar de que los biocompuestos obtenidos no presentaron mejoras en esta propiedad, se puede apreciar que los materiales reforzados con cisco de café mostraron mejores resultados en comparación (PP como matriz: 13.34%) con los compuestos generados a partir de estopa de coco (PP como matriz: 26%). Esto se debe a una mayor cantidad de sitios polares de reacción (grupos hidroxilos) presentes en el cisco, lo cual es un reflejo o contraste de la cantidad de celulosa y oxígeno contenido. Adicionalmente, se determinó que la incorporación de MAPP en BC4 aumentó la resistencia a la tracción (4.71%) y flexión (15.68%) del biomaterial, como consecuencia de una mejor interacción entre el cisco de café y el PPR. Lo anterior es propiciado por la acción del agente de acoplamiento al reaccionar con el material de refuerzo.

2.7. Referencias

- Abdelwahaba M. A., Misraa M. and Mohantya A. K. (2019). Injection molded biocomposites from polypropylene and lignin: Effect of compatibilizers on interfacial adhesion and performance. *Industrial Crops & Products*. 132, 497 – 510. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.026>.
- Adhikary K.B., Pang S. and Staiger M.P. (2008). Dimensional stability and mechanical behaviour of wood–plastic composites based on recycled and virgin high-density polyethylene (HDPE). *Composites Part B: Engineering*. 39, 807–815. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2007.10.005>.
- Agustin – Salazar S., Cerruti P., Medina – Juaréz L. A., Scarinzi G., Malinconico M., Soto – Valdez H. and Gamez – Meza N. (2018). Lignin and holocellulose from pecan nutshell as reinforcing fillers in poly (lactic acid) biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 115, 727 – 735. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.120>.
- Alias N. F., Ismail H. and Ishak K. M. (2019). The Effect of Kenaf Loading on Water Absorption and Impact Properties of Polylactic Acid/ Natural Rubber/ Kenaf Core Powder Biocomposite. *Materials Today: Proceedings*. 17, 584 – 589. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.338>.

Alvarez V. and Gonzalez B. (2018). Análisis de experimentos con el Sistema SAS. Ciudad de Guatemala, Guatemala. Universidad de San Carlos. ISBN: 978-970-10-6526-6.

Arjmandi R., Isamil A., Hassan A. and Bakar A. A. (2017). Effects of ammonium polyphosphate content on mechanical, thermal and flammability properties of kenaf/polypropylene and rice husk/polypropylene composites. *Construction and Building Materials*. 152, 484 – 493. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.052>.

Ayirmis N., Kaymakci A. and Güleç. (2015). Potential use of decayed wood in production of wood plastic composite. *Industrial Crops and Products*. 74, 279 – 284. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.04.024>.

Balasubramanian, A. (2017). Classification Of Materials. Technical Report. Doi: [10.13140/RG.2.2.12792.34567](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12792.34567).

Bajwa S. G., Bajwa D. S., Holt G., Coffelt T. and Nakayama, F. (2011). Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. *Industrial Crops and Products*. 33, 747 – 755. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2011.01.017>.

Bajwa D., Wang X., Sitz E., Loll T. and Bhattacharjee S. (2016). Application of bioethanol derived lignin for improving physico-mechanical properties of thermoset biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 89, 265 – 272. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.04.077>.

Beltrán M. and Marcilla A. (2012). Tecnología de polímeros. Procesado y propiedades. Alicante, España. Universidad de Alicante.

Bledzki A. K., Franciszczak P., Osman Z. and Elbadawi M. (2015). Polypropylene biocomposites reinforced with softwood, abaca, jute and kenaf fibers. *Industrial Crops and Products*. 70, 91 – 99. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2015.03.013>.

Caicedo C., Vázquez A., Crespo L. M., De la Cruz H. and Ossa O. H. (2015). Cedar fiber / polypropylene (PP) matrix composites: influence of the PP-g-MA compatibilizer. *Informador Técnico (Colombia)*. 79 (2), 118 – 125.

Delgado-Aguilar M., Vilaseca F., Tarrés Q., Julián F., Mutjé P. and Espinach F. X. (2018). Extending the value chain of corn agriculture by evaluating technical feasibility and the quality of the interphase of chemothermomechanical fiber from corn stover reinforced polypropylene biocomposites. *Composites Part B*. 137, 16 – 22. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.11.006>.

Dikobea D. G. and Luytc A. S. (2017). Thermal and mechanical properties of PP/HDPE/wood powder and MAPP/ HDPE/ wood powder polymer blend composites. *Thermochimica Acta*. 654, 40 – 50. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2017.05.002>.

Doineau E., Coqueugniot G., Pucci M. F., Caro A., Cathala B., Bénézet B., Bras J. and Moigne N. (2021). Hierarchical thermoplastic biocomposites reinforced with flax fibres modified by xyloglucan and cellulose nanocrystals. *Carbohydrate Polymers*. 254, 117403. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.117403>.

Essabir H., Bensalah M. O., Rodrigue D., Bouhfid R. and Qaiss A. (2016). Biocomposites based on Argan nut shell and a polymer matrix: Effect of filler content and coupling agent. *Carbohydrate Polymers*. 143, 70 – 83. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.02.002>.

Essabir H., Raji M., Laaziz S. A., Rodrigue D., Bouhfid R. and Qaiss A. (2018). Thermo-mechanical performances of polypropylene biocomposites based on untreated, treated and compatibilized spent coffee grounds. *Composites Part B*. 149, 1 – 11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.05.020>.

- Fitch P. R., Camacho I. L., Martínez F., Islas A. R., Carrillo K. I., Calderón A., Jacobo N., Carrillo A., Delgado C. I. and Aguilar E. (2019). Mechanical, physical and microstructural properties of acetylated starchbased biocomposites reinforced with acetylated sugarcane fiber. *Carbohydrate Polymers*. 219, 378 – 386. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.05.043>.
- Gallagher L.W. and McDonald A.G. (2013). The effect of micron sized wood fibers in wood plastic composites. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 15 (3), 357 – 374. Doi: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2013005000028>.
- Gonzalez I. Lopez A. and Martínez M. (2019). High-performance starch biocomposites with cellulose from waste biomass: Film properties and retrogradation behaviour. *Carbohydrate Polymers*. 216, 180 – 188. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.04.030>.
- Guna V., Ilangovan M., Ananthaprasad M.G. and Reddy N. (2017). Hybrid biocomposites. *Polymer Composites*. 39, 30 – 54. Doi: <https://doi.org/10.1002/pc.24641>.
- Hidalgo M. and Salinas E. (2019). Mechanical, thermal, viscoelastic performance and product application of PP- rice husk Colombian biocomposites. *Composites Part B*. 176, 107135. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107135>.
- Hietalaa M. and Oksman K. (2018). Pelletized cellulose fibres used in twin-screw extrusion for biocomposite manufacturing: Fibre breakage and dispersión. *Composites Part A*. 109, 538 – 545. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.04.006>.
- Huang L., Mu B., Yi X., Li S. and Wang, Q. (2018). Sustainable Use of Coffee Husks For Reinforcing Polyethylene Composites. *Journal Polymer Environment*. 26 (1), 48 – 58. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10924-016-0917-x>.
- Khan M. Z. R., Srivastava S. K. and Gupta M. K. (2020). A state of the art review on particulate wood polymer composites: Procesing, properties and applications. *Polymer Testing*. 89, 106721. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2020.106721>.
- Komal U. K., Lila M. K. and Singh I. (2020). PLA/banana fiber based sustainable biocomposites: A manufacturing perspective. *Composites Part B*. 180, 107535. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107535>.
- Kuburi L. S., Dauda M., Obada D. O., Umaru S., Dadoo-Arhin D., Iliyasu I., Balogun M. B. and Mustapha S. (2017). Effects of coir fiber loading on the physio-mechanical and morphological properties of coconut Shell poder filled low density polyrthylene composites.*Procedia Manufacturing*. 7, 138 – 144. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2016.12.036>.
- Liu W., Chen T., Fei M., Qiu R., Yu D., Fu T. Qiu J. (2019). Properties of natural fiber-reinforced biobased thermoset biocomposites: Effects of fiber type and resin composition. *Composites Part B*. 171, 87 – 95. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.04.048>.
- López D. and Rojas A. (2018). Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 12 (23), 93 – 102. Doi: <https://doi.org/10.31908/19098367.3708>.
- McKeen L. W. (2019). Introduction to Plastics and Polymers. McKeen L. W. *The effect of UV light and weather on plastics and elastomers (fourth edition)*. 1 – 20. Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816457-0.00001-0>.
- Migneault S., Koubaa A., Perré P. and Riedl B. (2015). Effects of wood fiber surface chemistry on strength of wood–plasticcomposites. *Applied Surface Science*. 343, 11 – 18. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.03.010>.

- Monroy M., Díaz A. and Acevedo H. F. (2009). Instrumentación del equipo de laboratorio de resistencia de materiales para ensayos dinámicos a flexión de probetas ranuradas. *Scientia et Technica*. 1 (41), 352-355. Doi: <https://doi.org/10.22517/23447214.2871>.
- Moreno P., Rodriguez D., Giroux Y., Ballerini A. and Gacitua W. (2013). Morphological and mechanical characterization of recycled thermoplastic foams reinforced with wood subproducts. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 15 (1), 3 – 16. ISSN: 0717-3644.
- Murugan S. S. (2020). Mechanical Properties of Materials: Definition, Testing and Application. *International Journal of Modern Studies in Mechanical Engineering*. 6 (2), 28 – 38. Doi: <http://doi.org/10.20431/2454-9711.0602003>.
- Naghmouchi I., Boufi S., Delgado M., Granda L., Vilaseca F. and Mutje P. (2013). Fabricación de madera plástica a partir de serrín de hueso de aceituna y polipropileno. 13er Congreso Internacional en Ciencia y Tecnología de Metalurgia y Materiales. Doi: 10.13140/2.1.1133.5040.
- Ngo T. D. (2020). Introduction to Composite Materials. *Fiber Composites*. 1 – 27. Doi: 10.5772/intechopen.91285.
- Nourbakhsh A. and Ashori A. (2010). Wood plastic composites from agro-waste materials: Analysis of mechanical properties. *Bioresource Technology*. 101, 2525 – 2528. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.040>.
- Nourbakhsh A, Baghlani F. F. and Ashori A. (2011). Nano-SiO₂ filled rice husk/polypropylene composites: Physico-mechanical properties. *Industrial Crops and Products*. 33, 183–187. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2010.10.010>.
- Nunes S. G., da Silva L. V., Amico S. C., Viana J.D. and Rico, F. D. (2017) Study of Composites Produced with Recovered Polypropylene and Piassava Fiber. *Materials Research*. 20 (1), 144 – 150. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2016-0659>.
- Patterson A. E., Pereira T. R., Allison J. T. and Messimer S. L. (2019). IZOD impact properties of full-density FDM polymer materials with respect to raster angle and print orientation. *Journal of Mechanical Engineering Science*, p. 095440621984038. Doi: <https://doi.org/10.1177/0954406219840385>.
- Perez M. "Elaboración de matrices de polímeros reciclados reforzados con fibras de la estopa de coco y determinación de sus propiedades físicas y mecánicas" (Tesis de Pregrado), dirigido por F. J. Quiñonez, Universidad de San Carlos, San Carlos, Jul. 2008.
- Petchwattana N, Covavisaruch S. and Chanakul S. (2012). Mechanical properties, thermal degradation and natural weathering of high density polyethylene/rice hull composites compatibilized with maleic anhydride grafted polyethylene. *Journal of Polymer Research*. 19, 1–9. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-012-9921-6>.
- Petchwattana N., Covavisaruch S. and Kanawang K. (2013). Wood plastic composites prepared from poly (vinyl chloride) and Balau sawdust (*Shorea obtusa*): Mechanical properties and N-(β -aminoethyl)- γ -aminopropyl trimethoxysilane compatibilization. *Advanced Materials Research*. 602–604, 802–806. Doi: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.602-604.802>.
- Petchwattana N. and Covavisaruch S. (2013). Effects of Rice Hull Particle Size and Content on the Mechanical Properties and Visual Appearance of Wood Plastic Composites Prepared from Poly (vinyl chloride). *Journal of Bionic Engineering*. 10, 110 – 117. Doi: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(13\)60205-X](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(13)60205-X).

- Prasanna V., Kumar N. and Kumar A. (2019). Optimisation & Mechanical Testing Of Hybrid BioComposites. *Materials Today: Proceedings.* 18, 3849 – 3855. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.324>.
- Rodriguez L. J.,Peças P., Carvalho H. and Orrego C. E. (2020). A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials. *Journal of Environmental Management.* 262, 110308. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110308>.
- Samenia J., Jaffera S. A. and Saina M. (2018). Thermal and mechanical properties of soda lignin/HDPE blends. *Composites Part A.* 115, 104 – 111. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.09.016>.
- Sanchez G., Rabe S., Perez R., Calderas F. and Schartel B. (2019). Industrial-waste agave fibres in flame-retarded thermoplastic starch biocomposites. *Composites Part B.* 177, 107370. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107370>.
- Sarasini F., Tirillo, J., Zuorro A., Maffei G., Lavecchia R., Puglia D., Dominici F., Luzi F., Valente T. and Torre L. (2018). Recycling coffee silverskin in sustainable composites based on a poly (butylene adipate-co-terephthalate)/poly (3-hydroxybutyrate-co-3- hydroxyvalerate) matrix. *Industrial Crops & Products.*118, 311 – 320. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.070>.
- Segura J. (2000). Notas de diseños experimentales. Yucatan, Mexico. Universidad Autónoma de Yucatan, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia.
- Shireesha Y. and Nandipati G. (2019). State of Art Review on Natural Fibers. *Materials Today: Proceedings.* 18, 15 – 24. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.272>.
- Sun Z. (2018). Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites. *Science and Engineering of Composite Materials.* 25 (5), 835 – 846. Doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0072>.
- Uitterhaegen E., Parinet J., Labonner I., Mérian T., Ballas S., Véronèse T., Merah O., Talou T., Stevens C. V., Chabert F. and Evon P. (2018). Performance, durability and recycling of thermoplastic biocomposites reinforced with coriander straw. *Composites Part A.* 113, 254 – 263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.038>.
- Tran D., Lee. H. R., Jung S., Park M. S. and Yang J. (2018). Lipid-extracted algal biomass based biocomposites fabrication with poly (vinyl alcohol). *Algal Research.*31, 525 – 533. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.08.016>.
- Wondmagegnehu B. T., Paramasivam V. and Selvaraj S. K. (2021). Fabricated and analyzed the mechanical properties of textile waste/glass fiber hybrid composite material. *Materials Today: Proceedings.* Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.984>.
- Yang H. S., Kim H. J., Park H. J., Lee B. J. and Hwang T. S. (2007). Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. *Composite Structures.*77, 45–55. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2005.06.005>.

CAPÍTULO 3. VARIACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS EN LOS MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS: PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y TÉRMICAS

3.1 Resumen

La generación de residuos sólidos en Colombia es uno de los aspectos ambientales de mayor impacto a tratar. Entre las alternativas de manejo de residuos se encuentra la producción de materiales compuestos para uso en el sector industrial o doméstico. El tipo de uso depende de las características de los materiales, por lo cual estos deben ser analizados mecánica, físico-químico y térmicamente. Exceptuando las propiedades mecánicas, en este capítulo se determinaron propiedades físico-químicas relevantes como la densidad, la absorción de agua, el envejecimiento a la intemperie, la composición proximal y elemental de los biocompuestos obtenidos en el Capítulo 1. Así mismo se evaluaron propiedades como la degradación térmica, la temperatura de fusión, la temperatura y porcentaje de cristalización en el mismo grupo de materiales, mediante análisis termogravimétrico (TGA) y calorimetría diferencial de barrido (DSC). Entre los resultados se encuentran el aumento en la densidad del polipropileno pos industrial (PPR) (16.4%) y el polietileno de alta densidad pos industrial (PEADR) (5.5%) reforzados con cisco de café (CCa), así como los incrementos en el porcentaje de absorción de agua del PPR (0.45%) y el PEADR (0.39%). Similarmente, los biocompuestos presentaron variaciones en i) el módulo de flexión con reducciones entre 1.81 – 38.46%, ii) la resistencia a la flexión con disminuciones entre 0.66 – 10.13%, iii) el módulo de tracción con reducciones entre 1.91 – 7.26%, y iv) la resistencia a la tracción con disminuciones entre 1.31 – 7.17%, luego de ser sometidos a condiciones de envejecimiento acelerado. Con respecto a las propiedades térmicas de los biocompuestos, se evidenció aumentos entre 0.29 – 5.06 y 0.3 – 14.93% en la temperatura inicial y la temperatura de velocidad máxima de degradación de la fase polimérica, respectivamente. Así mismo, la temperatura y porcentaje de cristalización de los biocompuestos presentó un aumento entre 0.05 – 10.03 y 0.51 – 54.76%, respectivamente. Finalmente, se concluye que las propiedades físico-químicas y térmicas de los biocompuestos se relacionan y varían con la incorporación de fibras vegetales así como con la composición estructural y proporción de humedad de las mismas (contenido de hemicelulosa, celulosa y lignina).

3.2 Marco teórico

En Colombia se producen aproximadamente 32.000 toneladas de desechos sólidos por día, compuestos aproximadamente en un 12% de material plástico (Machado y Hettiarachchi, 2020). En una gran proporción, este tipo de residuos son depositados en rellenos sanitarios y vertederos a cielo abierto, dos de los procesos de tratamiento de residuos sólidos más empleados en el mundo (Karimi *et al.*, 2021). Con el paso de los años, dichos sistemas han mostrado falencias dada la gran cantidad de residuos producidos, la falta de recursos financieros y de conocimiento técnico (Gautam y Kumar, 2021; Karimi *et al.*, 2021). Por consiguiente, se han planteado diferentes alternativas para su gestión, considerándolos un recurso con un alto potencial de aprovechamiento (Ecoplas, 2011). Por esta razón entidades como la APC (American Plastics Council), Plastic Europe (Asociación de Fabricantes de Materiales Plásticos de Europa), EPIC (Environment and Plastics Industry Council - Canadá), PWMI (Plastics Waste Management Institute - Japón), PACIA (Plastics and Chemical Industries Association - Australia), Plastivida Brasil, entre otras, estudian e investigan diferentes alternativas buscando minimizar y aprovechar adecuadamente los residuos poliméricos. Se estima que a nivel mundial se recupera menos del 21% de los materiales plásticos residuales, el resto es descargado de forma ineficiente en rellenos sanitarios, botaderos a cielo abierto e incluso en los océanos (Rodríguez *et al.*, 2020). Los plásticos contenidos en los residuos sólidos urbanos (RSU) son

mayoritariamente polietileno (PE) y polipropileno (PP). Igualmente, se presenta en menor proporción polímeros como el poliestireno (PS), el cloruro de polivinilo (PVC), el polietilentereftalato (PET), el poliestireno-butadieno (PS-BD) y el polimetilmetacrilato (PMMA) (Bahl *et al.*, 2021).

Una de las estrategias aplicadas para el control de RSU es el aprovechamiento de plásticos mediante la producción de biocompuestos, utilizando tratamientos integrales que abarcan diferentes procesos. El tratamiento empleado se conoce como reciclado mecánico, el cual consiste en recuperar residuos plásticos domiciliarios e industriales, incluyendo los polímeros simples (materiales clasificados y separados entre sí), los mixtos (plásticos de diferentes tipos mezclados entre sí) y los mixtos combinados con otras clases de residuos (biodegradables, inertes, entre otros) (Larrain *et al.*, 2021). La finalidad de este sistema es el producir plástico granulado (Figura 3.1), el cual es empleado como materia prima en la elaboración de biocompuestos.

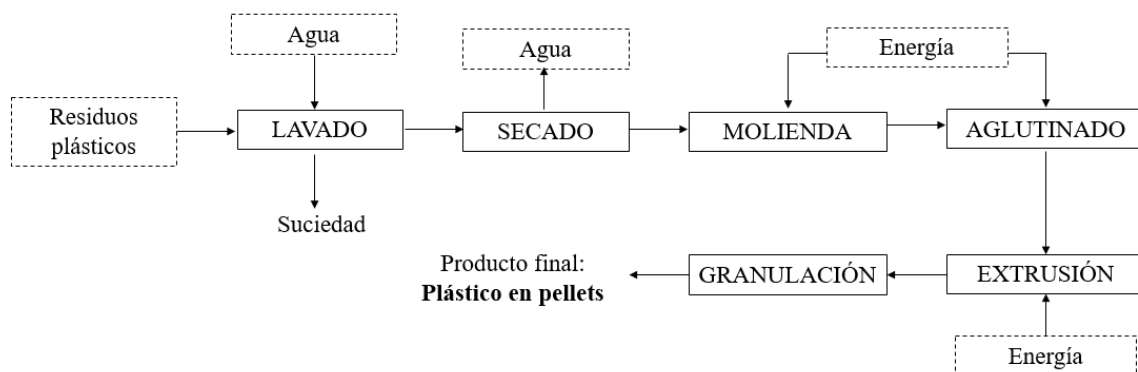


Figura 3. 1. Etapas para la producción de plástico granulado. Tomado y modificado de Ecoplas, 2011.

Entre las propiedades de interés en los biocompuestos y que varían según las características del refuerzo biomásico y la matriz polimérica, se encuentra su densidad. La densidad es una de las características físicas de mayor relevancia y se determina por medio de la relación peso / volumen asociados al material compuesto (Abbass *et al.*, 2020). Ahora bien, otra de las propiedades de interés en un material compuesto, es la absorción de agua. Este parámetro depende del tipo de fibra, la cantidad de carga del refuerzo, su orientación en el sistema de la matriz polimérica, entre otros factores (Mahmud *et al.*, 2021).

En la Tabla 3.1 se presentan algunos datos de densidad y absorción de agua reportados en la literatura para diferentes materiales compuestos. Con base a esto se puede mencionar que la mezcla de ABS con cascarilla de arroz presentó el mayor valor de densidad (1.35 g/cm³). Esta propiedad varía según la composición de los materiales, es decir, se incrementa de forma proporcional con la adición de componentes fibrosos empleados como refuerzo (Abdelwahab *et al.*, 2019). Por su parte, la mezcla que absorbe mayor porcentaje de agua es PEBD con cáscara de coco (12%). Este parámetro es determinante en biocompuestos, ya que las fibras naturales tienen una gran capacidad para retener humedad. Esta tendencia puede generar deformaciones que afectan la fuerza de los materiales compuestos e incrementen la degradación en las propiedades mecánicas y físicas asociadas a estos (Uddin, 2013).

Tabla 3. 1. Densidad y absorción de agua reportados en la literatura para materiales compuestos.

Matriz	Refuerzo	Contenido de fibra (%)	Densidad (g/cm ³)	Absorción de agua (%)	Referencia
ABS	Cascarilla de arroz	20 - 40	1.35	6.92	Norhasnan <i>et al.</i> , 2021
PEBD	Cáscara de coco	15	0.98 - 1.00	12	Kuburi <i>et al.</i> , 2017
PEAD	Madera	35	-	2.5	Bouafif <i>et al.</i> , 2008
PEAD	Rebabas y tallos del algodón	50	-	6.2	Bajwa <i>et al.</i> , 2011
PP	Haya oriental	50	-	5 - 6	Hosseinihashemi <i>et al.</i> , 2016
PPR	Harina de plumas	20	0.94	-	Aradoaei <i>et al.</i> , 2020
PVC	Hojas de palma	50	1.03	9.01	Binhussain and El-Tonsy, 2013

PP: polipropileno, PPR: polipropileno reciclado, PEAD: polietileno de alta densidad, PEBD: polietileno de baja densidad, PVC: policloruro de vinilo, ABS: acrilonitrilo butadieno estireno.

Por otro lado, el envejecimiento acelerado de los biocompuestos se ve influenciado por parámetros como la humedad relativa (HR). Este factor en conjunto con la temperatura del entorno generan fallas en las fibras reforzantes de un material compuesto, llevándolas a la fractura (Assarar *et al.*, 2012). Por su parte, las altas temperaturas son directamente proporcionales a la disminución de la resistencia a la tracción. Adicionalmente, incrementar la HR en el entorno causa un mayor índice de flexión en el material (Fontana *et al.*, 2016).

Para examinar la capacidad de un material en cuanto a resistencia térmica se realiza un análisis termogravimétrico (TGA), el cual se encarga de medir los cambios de peso de un material en función de la temperatura y el tiempo, bajo condiciones isotérmicas (Zambrano *et al.*, 2017). Este método es útil en la identificación de transformaciones que involucran la absorción o la evaporación de gases en la fase de condensación (Sierra *et al.*, 2009). La mayoría de los equipos para análisis de TGA están configurados para vacío y/o o atmósferas variables (Speyer, 1996). Otra técnica para la caracterización térmica de biocompuestos es la de Calorimetría Diferencial de Barrido o ensayo DSC. En esta prueba el material es sometido a intercambios de calor, generando modificaciones de temperatura en las muestras (Venegas, 2017). Entre los parámetros que se encuentran asociados a esta prueba se contempla la temperatura de fusión y de cristalización así como el grado o porcentaje de cristalinidad. Al estar interconectadas muchas de las reacciones químicas y transiciones físicas mediante la generación o consumo de calor, se considera al DSC un método universal para la evaluación de procesos térmicos (Höhne *et al.*, 2003).

En la Tabla 3.2 se presentan algunos datos de temperatura de fusión, degradación térmica, temperatura y porcentaje de cristalización reportados en la literatura para diferentes materiales compuestos. Con relación a esto se puede decir que la mezcla de PCL con fibra de macaiba presentó la temperatura de degradación térmica más alta (430.6 °C). La adición de fibras naturales tiende, comúnmente, a reducir la estabilidad térmica de la matriz pura ya que una parte del polímero es reemplazada con un material menos estable térmicamente (refuerzos naturales) (Arjmandi *et al.*, 2017). Por su parte, la mezcla que reportó mayor porcentaje y temperatura de cristalización fue PP con fibra de cáñamo (53.6% y 169.0 °C, respectivamente). La celulosa de las fibras representa la parte cristalina de los materiales, lo que podría resultar en una mayor cristalinidad de los biocompuestos (Arjmandi *et al.*, 2017).

Tabla 3. 2. Propiedades térmicas reportadas en la literatura para materiales compuestos.

Matriz	Refuerzo	Contenido de fibra (%)	T° Fusión (°C)	T° DT (°C)	T° C (°C)	%C	Referencia
PCL	Fibra de Macaiba	20	54.4	430.6	32.1	47.8	Siqueira <i>et al.</i> , 2020
PP	Kenaf	20	133.8	417.9	85.1	-	Arjmandi <i>et al.</i> , 2017
PLA	Cáscara de nuez	25	169.7	294	108.5	-	Agustin-Salazar <i>et al.</i> , 2018
PP	Cascarilla de arroz	20	149.3	356.8	97.6	-	Arjmandi <i>et al.</i> , 2017
PP	Fibras de piassava	20	164.7	-	126.5	27.3	Nunes <i>et al.</i> , 2017
PP	Fibra de cáñamo	30	171.0	335.0	169.0	53.6	Mazian <i>et al.</i> , 2020

T°: temperatura, DT: degradación térmica, C: cristalización, %C: porcentaje de cristalización, PCL: policaprolactona.

A lo largo de este capítulo se evaluarán características físico-químicas como la densidad, la absorción de agua y el envejecimiento acelerado, para los materiales compuestos obtenidos en el Capítulo 1. Así mismo, los biocompuestos serán sometidos a ensayos de termogravimetría (TGA) y Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC), con el fin de determinar propiedades como la temperatura de degradación térmica, la temperatura de velocidad de degradación máxima, la temperatura de fusión, la temperatura y porcentaje de cristalización.

3.3. Métodos experimentales

Empleando los materiales compuestos obtenidos y descritos en la Tabla 3.3, se procedió a caracterizarlos físico-química y térmicamente mediante pruebas de densidad, absorción de agua, análisis próximo, análisis último, envejecimiento acelerado, TGA y DSC.

Tabla 3. 3. Materiales compuestos obtenidos.

Biocompuesto	Matriz	Refuerzo	Proporción de fibra (%)	No. Tamiz
BC1	PPR	CCa	10	16 – 20
BC2	PPR	CCa	30	16 – 20
BC3	PPR	CCa	10	40 - 200
BC4	PPR	CCa	30	40 – 200
BC5	PPR	SC	10	40 – 200
BC6	PPR	SC	30	40 – 200
BC7	PEADR	CCa	10	16 – 20
BC8	PEADR	CCa	30	16 – 20
BC9	PEADR	CCa	10	40 - 200
BC10	PEADR	CCa	30	40 – 200
BC11	PEADR	SC	10	40 – 200
BC12	PEADR	SC	30	40 - 200

PPR: polipropileno pos industrial, PEADR: polietileno de alta densidad pos industrial, CCa: cisco de café, SC: estopa de coco.

3.3.1. Densidad

Entre los parámetros físicos evaluados para los materiales compuestos se encuentra la densidad. Esta propiedad se determinó empleando la norma ASTM D792, en la cual se establecen como condiciones estándares de laboratorio una temperatura de 23°C y una humedad relativa del 50%. Así mismo, se establecen los parámetros requeridos para el dimensionamiento de las muestras, el cual fue 3.5 x 13.5 x 3 mm de largo, ancho y profundidad, respectivamente. En el transcurso de la prueba, se registró el peso de las muestras en aire y sumergidas en agua destilada, así como el peso del soporte metálico empleado para mantener inmersos los especímenes evaluados. Cabe resaltar que la prueba se hizo por duplicado y los resultados obtenidos fueron utilizados para determinar la densidad de los biocompuestos, aplicando la Ec. 3.1.

$$D = a / ((a + w) - b) \times 997.99 \quad \text{Ec. 3.1}$$

Donde, D es la densidad del material (kg/m³), a es el peso del material en aire (gr), w es el peso del soporte sumergido (gr) y b es el peso del material sumergido en agua destilada (gr).

3.3.2. Absorción de agua

Este ensayo se realizó con la finalidad de determinar la absorción de agua para las matrices poliméricas evaluadas (PPR y PEADR) una vez mezcladas con el material reforzante (CCa y SC). Las condiciones de laboratorio empleadas fueron 23°C de temperatura y una humedad relativa del 50%, como se indica en la norma ISO 62:2008. Así mismo, el dimensionamiento de las muestras utilizadas fue 13.5 x 13.5 x 3 mm de largo, ancho y profundidad, respectivamente. Este tipo de procedimiento se efectuó sumergiendo la totalidad de las muestras en agua destilada, una vez pesados al inicio de la prueba. Posterior a esto, las muestras se dejaron inmersas durante cinco intervalos de tiempo: 0 – 1 día, 1 – 2 días, 2 – 4 días, 4 – 8 días y 8 – 16 días. Al finalizar cada periodo, el material fue secado superficialmente y pesado. La metodología se efectuó por triplicado, empleando 300 ml de agua destilada por espécimen. La ecuación empleada para calcular el porcentaje de absorción o retención de agua se presenta a continuación:

$$m = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad \text{Ec. 3.2}$$

Donde, m es el porcentaje de absorción de agua (%), m₁ es el peso inicial de la muestra (gr) y m₂ es el peso de la muestra luego de inmersión (gr).

3.3.3. Envejecimiento acelerado

Este tipo de ensayo se efectuó con el fin de determinar los cambios en las propiedades de flexión y tracción de los biocompuestos evaluados, una vez sometidos a condiciones no usuales de temperatura y humedad relativa. Para ello se empleó una cámara ambiental marca Centricol proporcionada por el grupo de Investigación en Alimentos de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales. Este sistema permite mantener controladas las condiciones de temperatura y humedad del medio. Las condiciones de operación del equipo se establecieron según lo estipulado por la norma ASTM 3574, Test L, siendo estas una temperatura y humedad relativa de 50°C y 95%, respectivamente. Los materiales fueron expuestos durante un intervalo severo de tiempo de 14 días, para posteriormente ser analizados mediante ensayos de tensión y flexión, empleando la metodología establecida en las normas ASTM D638 y D790, respectivamente. Este tipo de ensayos se llevó a cabo mediante el uso de probetas normalizadas tipo V, las cuales se muestran en la Figura 3.2 al mismo tiempo que se presenta el montaje y el equipo utilizado.



Figura 3. 2. Montaje utilizado para el ensayo de envejecimiento acelerado.

3.3.4 Análisis próximo, análisis último y poder calorífico

Las caracterizaciones por análisis próximo de los materiales compuestos se llevó a cabo empleando la metodología descrita en las normas ASTM E871 para humedad, NREL/TP – 510-42622 para cenizas y ASTM E872 para material volátil. El carbono fijo se obtiene por diferencia entre el total de la composición y la proporción de humedad, cenizas y materia volátil. Por su parte, la composición elemental se logró estimar mediante el uso de correlaciones, las cuales se presentan en la Tabla 3.4. No se determinó el contenido de azufre de los biocompuestos ya que no se contó con un sulfurómetro.

Tabla 3. 4. Correlaciones empleados para estimar la composición elemental de los biocompuestos obtenidos en base seca.

Parámetro	Correlación
Carbono elemental (C)	$C (\%) = (0.97 \times CF) + (0.7 \times (MV - (0.1 \times Cz))) - (Hw \times (0.6 - (0.01 \times Hw)))$ Ec. 3.3
Hidrógeno elemental (H)	$H (\%) = (0.036 \times CF) + (0.086 \times (MV - (0.1 \times Cz))) - (0.0035 \times (Hw^2 \times (1 - (0.02 \times Hw))))$ Ec. 3.4
Nitrógeno elemental (N)	$N (\%) = 2.1 - (0.02 \times MV)$ Ec. 3.5
Oxígeno elemental (O)	$O (\%) = 100 - C(\%) - H(\%) - N(\%)$ Ec. 3.6

Fuente: Las correlaciones fueron reportadas por UIS (2017).

Para el caso del poder calorífico, se empleó el modelo de energía de reacción (REM) reportado por Han *et al.* (2017). Esta ecuación se alimenta con los resultados obtenidos a partir del análisis elemental y se presenta a continuación.

$$PCS = 35C + 120H - 160 \quad \text{Ec. 3.7}$$

Donde, HHV es el poder calorífico superior (KJ/kg), C es el contenido de carbono elemental en base seca (%), H es el contenido de hidrógeno elemental en base seca (%) y O es el contenido de oxígeno elemental en base seca (%).

3.3.5. Análisis termogravimétrico (TGA)

Este análisis permitió evaluar la pérdida de peso de los biocompuestos sometidos a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min en un atmósfera inerte (Gas nitrógeno). Dicho proceso se llevó a cabo en un analizador termogravimétrico marca TA Q500, suministrado por la Universidad Autónoma de Occidente siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM E 1131. Las condiciones operativas del equipo empleadas para el ensayo fueron una rampa de calentamiento entre 20 y 600°C, una cantidad de muestra de 10 mg (Arjmandi *et al.*, 2017; Hidalgo y Salinas, 2019; Mazian *et al.*, 2020) y un flujo de gas nitrógeno de 90 ml/min. Este análisis permitió determinar la temperatura de degradación térmica y el contenido de elementos trazas presentes en los materiales compuestos. Así mismo, los resultados de pérdida de masa se derivaron respecto a la temperatura, con el fin de construir la curva de termogravimetría diferencial (DTG). Este tipo de gráfica permitió obtener otro tipo de parámetros como la temperatura de velocidad de degradación máxima de los materiales evaluados. Cabe resaltar que las curvas de TG y DTG fueron analizados empleando el software TA Universal Analyses.

3.3.6. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Este tipo de ensayo permite determinar propiedades como la temperatura de fusión, la temperatura y porcentaje de cristalización asociados a un material compuesto (Venegas, 2017). Para ello se empleó un calorímetro marca TA Q2000 proporcionado por la Universidad Autónoma de Occidente siguiendo los parámetros establecidos por la norma ASTM D3418. Las condiciones de operación establecidas fueron una cantidad de muestra de 10 mg, una velocidad de calentamiento de 10 °C/min (Arjmandi *et al.*, 2017; Hidalgo y Salinas, 2019; Mazian *et al.*, 2020) tres rampas de calentamiento de 0 a 200 °C, 200 a -20°C y -20 a 200°C, así como un flujo de gas nitrógeno de 50 ml/min. Las gráficas de calentamiento y enfriamiento obtenidas fueron analizadas empleando el software TA Universal Analyses. Por otro parte, para el cálculo del porcentaje de cristalización (X_c) se utilizó la siguiente ecuación reportada por Bhasney *et al.* (2020):

$$X_c = \left(\frac{\Delta H_{exp} \times 100\%}{\Delta H \times w} \right) \quad \text{Ec. 3.8}$$

Donde, ΔH_{exp} es la entalpía de cristalización experimental de los polímeros o los biocompuestos (J/gr), ΔH es la entalpía de cristalización del polímero completamente cristalino (J/gr), w es la fracción en peso del polímero en la mezcla.

3.4. Resultados y discusión

3.4.1. Densidad

Los resultados de densidad de los materiales compuestos se muestran en la Figura 3.3. En esta tabla se encuentra que los biocompuestos BC2 y BC4 presentaron los mayores aumentos comparados con el polipropileno pos industrial (PPR) (14.8 y 16.4%, respectivamente). Así mismo, se observó que BC8 y BC10 mostraron incrementos relevantes respecto a este parámetro al compararlos con el polietileno de alta densidad pos industrial (PEADR) (9.3 y 5.5%, respectivamente). Este comportamiento coincide con Moreno *et al.* (2013) los cuales mencionan que el incorporar o aumentar la concentración de fibra en una matriz polimérica genera una mayor densificación del compuesto (Aumento del 5.5 %). Así mismo, Nunes *et al.* (2017) relacionan la cantidad de refuerzo y la densidad real de la fibra, con el aumento en la densidad de un material compuesto (Aumento del 55.9%). Este comportamiento se puede apreciar en la densidad de los materiales compuestos obtenidos, exceptuando BC5 y BC6.

La densidad de un material se encuentra relacionada con la formación de espacios internos vacíos, así como la cantidad de estos. La presencia de vapor de agua y de compuestos orgánicos volátiles (COV) propicia el desarrollo de cavidades en la estructura interna de un material. El agua y los COV son generados por la humedad contenida en las fibras celulósicas y por la degradación térmica de la matriz polimérica durante el proceso de extrusión de materiales compuestos (Binhussain y El – Tonsy, 2013). Esta condición influye de forma directa e indirecta en la porosidad y la densidad aparente de un biocompuesto, respectivamente (Trejos, 2014). Teniendo en cuenta lo anterior se puede decir que el CCa, al presentar menor humedad que la SC (11.61 y 12.15%, respectivamente), generó una menor cantidad de espacios internos vacíos al mezclarse con el PPR y el PEADR. Este argumento se refleja en la densidad de los materiales compuestos, presentándose un mayor valor en las mezclas de CCa - PPR (BC4: 1.09 gr/cm³) y CCa – PEADR (BC8: 1.08 gr/cm³), que en las mezclas de SC – PPR (BC6: 0.98 gr/cm³) y SC – PEADR (BC12: 1.00 gr/cm³). Adicionalmente, el contenido de humedad del CCa (11.61%) y la SC (12.15%) se relacionan de manera inversa con la densidad de los biocompuestos, presentándose mejores resultados en los materiales reforzados con CCa (BC2:1.07 gr/cm³ y BC4: 1.09 gr/cm³).

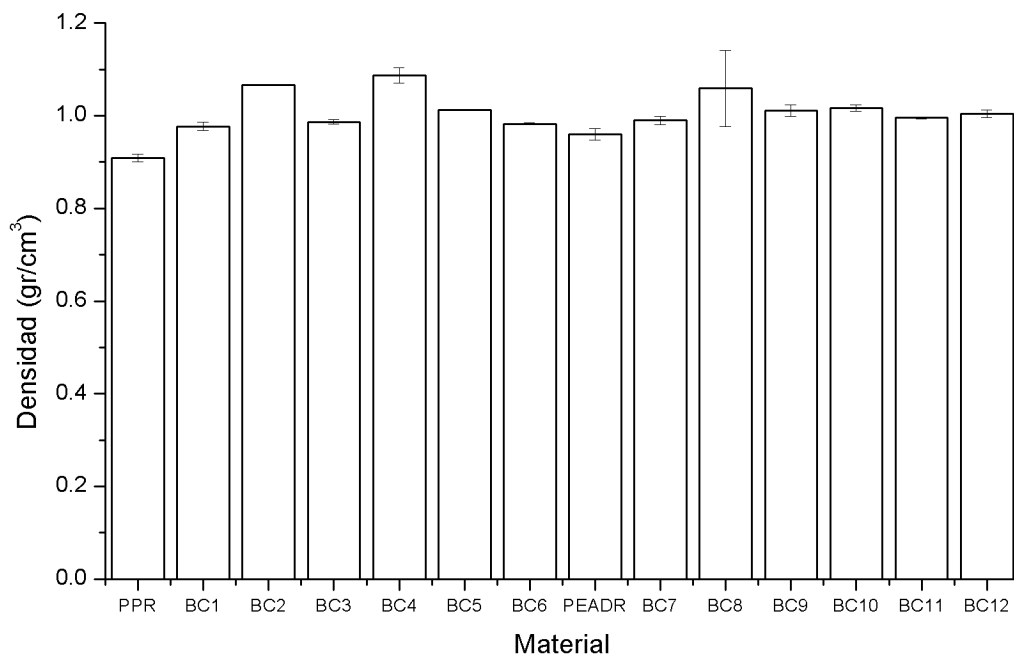


Figura 3. 3. Densidad de los materiales compuestos obtenidos.

3.4.2. Absorción de agua

Otra de las características físicas evaluadas fue la absorción de agua. Los resultados de esta propiedad se exponen en las Figuras 3.4 y 3.5, donde se puede apreciar una alta capacidad para retener agua por parte de los biocompuestos BC2, BC4, BC8 y BC10. Las fibras vegetales son compuestos porosos de características hidrofílicas, ricos en grupos funcionales como los hidroxilos. Este tipo de grupos se relacionan con la composición estructural de la biomasa (celulosa y hemicelulosa) y generan fácilmente puentes de hidrógeno mediante la interacción con las moléculas de agua (Hosseinihashemi *et al.*, 2016). Por ende, los materiales reforzados con fibras vegetales que presentan un alto contenido de holocelulosa tienden a absorber una mayor cantidad de agua. Lo anterior explica el comportamiento observado para BC2, BC4, BC8 y BC10. El CCa comparado con la SC, presenta un mayor contenido de celulosa y hemicelulosa (46.44 y 37.86%, respectivamente), estructura que propicia un mayor contenido de grupos hidroxilo y por ende, una tendencia

más grande a retener agua (Bajwa *et al.*, 2011; Huang *et al.*, 2018). En complemento, Bouafif *et al.*, (2008) indican que las fibras con un mayor contenido de lignina y extractivos tienden a absorber menos agua, debido a las características hidrofóbicas de estos componentes. Bouafif *et al.*, (2008) reportan una mayor absorción de agua en mezclas de madera de cedro – PEAD (2.5%) que en mezclas de corteza de cedro – PEAD (1.5%), siendo esta última la fibra con mayor contenido de lignina y extractivos. Este comportamiento coincide con los resultados obtenidos, ya que la mezcla CCa – PP (BC2) registró un porcentaje de absorción de agua mayor que la mezcla SC – PP (BC5) (3.64 y 0.55%, respectivamente), puesto que la SC presenta un mayor contenido de lignina y extractivos (58.42%) en comparación con el CCa (51.73%). Por su parte, Bajwa *et al.* (2016) manifiestan una relación entre el contenido de cenizas y la absorción de agua. En su trabajo, reportan mayores porcentajes de absorción de humedad para la mezcla rastrojo de maíz – resina epóxica (7.8 – 11.8%) que la mezcla de pajo de trigo – resina epóxica (2.5 – 7.8%), atribuyendo este efecto a la presencia de un mayor contenido de cenizas en la paja de trigo. Lo anterior concuerda con los resultados observados en los biocompuestos con adición de CCa, los cuales presentaron un contenido de cenizas bajo (1.84%) así como un mayor porcentaje de absorción de agua (CCa – PPR: 3.64%, CCa – PEADR: 0.90%) que los obtenidos a partir de SC (Contenido de cenizas: 3.71%, SC – PPR: 0.56%, SC – PEADR: 0.40%). Igualmente, Kuburi *et al.* (2017) mencionan que la incorporación de fibras vegetales genera cambios en la absorción de agua de un biocompuesto. Dicho argumento se refleja en los resultados de su trabajo donde la mezcla de fibras de cáscara de coco – PE residual presentó aumentos en el porcentaje de absorción de agua de 0 a 12%, coincidiendo con el efecto de las mezclas de CCa – Polímeros y SC – Polímeros donde se encontró aumentos de 0.1 a 3.64% y 0.1 a 0.44%, respectivamente.

Teniendo en cuenta otro tipo de parámetros, Bouafif *et al.*, (2008) mencionan que la capacidad de retención de agua de un material compuesto aumenta proporcionalmente con el tamaño de partícula del elemento reforzante. Este argumento se puede analizar de dos maneras para el caso de partículas grandes: i) acarrear superficies con una mayor exposición hidrófila, por lo cual inciden en una mayor absorción de agua del biocompuesto, y ii) pueden generar espacios vacíos internos en los materiales compuestos como consecuencia de la mala adhesión refuerzo – matriz, espacios que se llenan con agua (Huang *et al.*, 2018; Ramesh *et al.*, 2020). Dicha tendencia coincide con los resultados de los biocompuestos BC1, BC2 y BC7, los cuales se encuentran conformados por partículas de fibras más grandes (850 – 1180 μm) que los biocompuestos BC3, BC4 y BC9 (75 – 425 μm). A su vez, el tamaño de partícula incide en el porcentaje de absorción de agua siendo mayor para los biocompuestos BC1, BC2 y BC7 (0.36, 3.64 y 0.35%, respectivamente) que el de los biocompuestos BC3 (0.25%), BC4 (3.55%) y BC9 (0.32%), de forma correspondiente. En adición, existe una proporcionalidad inversa entre la absorción de agua y la densidad de un material compuesto, lo cual se refleja en el comportamiento de los biocompuestos BC3 y BC5. Finalmente, no todos los compuestos presentaron un aumento en la absorción de agua de forma homogénea y lineal, debido principalmente, al efecto de los tamaños grandes de partícula y la distribución no homogénea que pudieron presentar las fibras (Bajwa *et al.*, 2011).

Al analizar los datos de absorción de agua de los biocompuestos, se observa un mayor porcentaje para las mezclas CCa – PPR (3.64%) y SC – PPR (0.56%) que el de las mezclas CCa – PEADR (0.90%) y SC – PEADR (0.40%). Gilormini y Verdu (2018) explican que la capacidad de absorción de agua de un polímero se puede relacionar con su estructura, enfatizando que la fase cristalina de un polímero semicristalino no absorbe agua. Así mismo, la cristalinidad de una matriz polimérica se encuentra asociada a la entalpía de fusión (ΔH_m) reportándose una mejor cristalinidad para valores altos de ΔH_m (Agustin – Salazar *et al.*, 2018). Con base a lo anterior se puede decir que los biocompuestos obtenidos a partir de PEADR presentaron una menor absorción de agua debido a valores más altos de cristalinidad (74.5%) y ΔH_m (211.9 J/gr) que los biocompuestos procesados con PPR (Cristalinidad: 47.4%, ΔH_m : 95.74 J/gr).

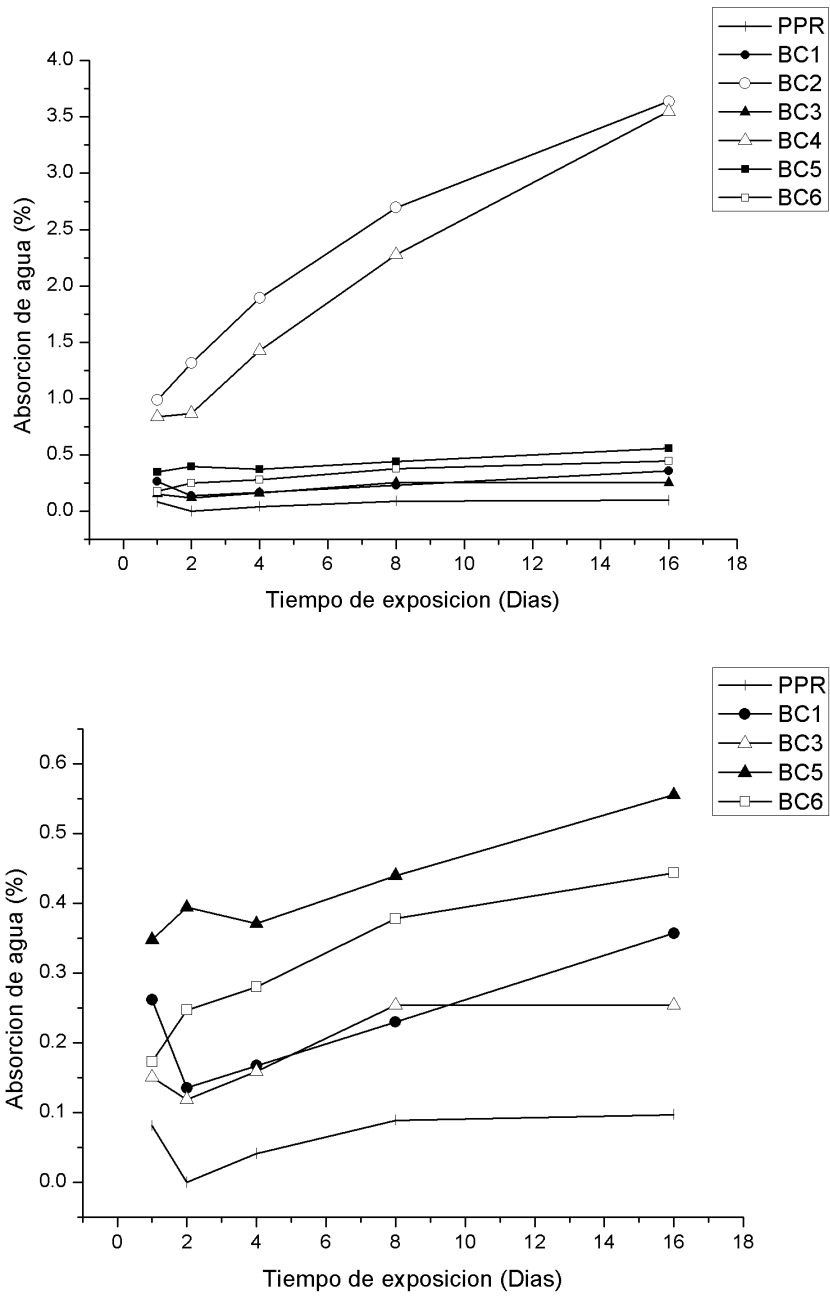


Figura 3. 4. Absorción de agua en biocompuestos empleando PPR como matriz polimérica.

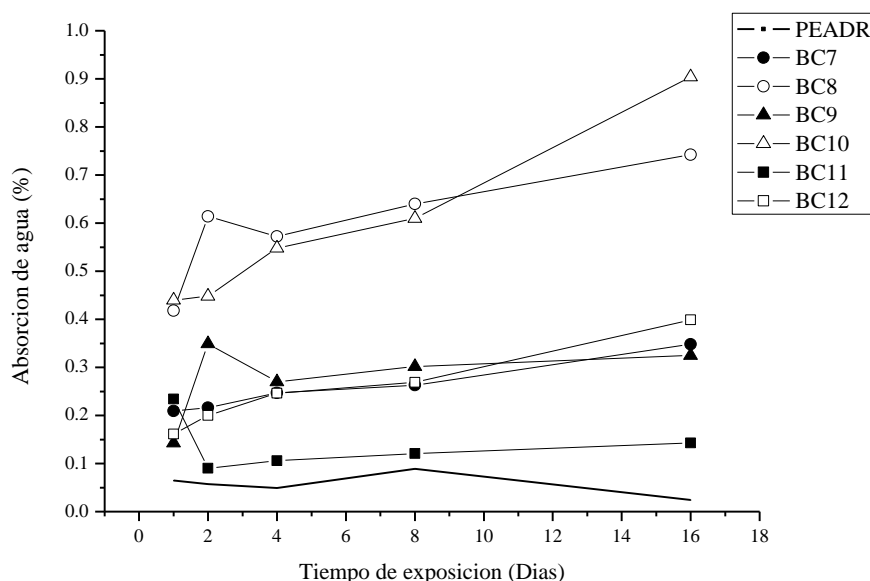


Figura 3. 5. Absorción de agua en biocompuestos empleando PEADR como matriz polimérica.

3.4.3. Análisis próximo y último

Los resultados de los análisis próximo y último para los biocompuestos obtenidos son presentados en las Tablas 3.5 y 3.6, respectivamente. Para todos los biocompuestos, se logró apreciar un alto contenido de materia volátil (MV) presentándose diferencias si se analiza el contenido de fibra incorporada y el tamaño de partícula. Las matrices reforzadas con mayores contenidos de fibra (30%) presentaron una menor proporción de MV. Se encontraron disminuciones en el MV entre 2.69 – 5.04 y 1.52 – 2.69% para las mezclas Fibra – PPR y Fibra – PEADR, respectivamente. Este comportamiento es reflejo de la disminución en la proporción de MV aportada por el material polimérico (PPR: 99.89%, PEADR: 99.55%), la cual es mucho mayor si se compara con la de la fibra vegetal (CCa: 93.99%, SC: 83.18%). Moliner *et al.* (2018) reportan este mismo comportamiento para la mezcla Sisal – PLA, con disminuciones entre 2.65 – 4.68% de MV. Por otro lado, al analizar el efecto del tamaño de partícula se encontró que el porcentaje de MV es directamente proporcional a las variaciones en las dimensiones del refuerzo, presentándose variaciones más bajas para los biocompuestos incorporados con fibras de 850 – 1180 μm (0.69 – 4.41%) que los biocompuestos con fibras de 75 – 425 μm (0.08 – 5.04%).

A diferencia del comportamiento observado para la MV, el porcentaje de carbono fijo (CF) y humedad (Hw) fue mayor en el caso de las matrices reforzadas con más carga de fibra vegetal adicionada, presentándose i) aumentos en Hw mayores al 100 y 50% para las mezclas Fibra – PPR y Fibra – PEADR, respectivamente, y ii) aumentos en CF mayores al 100% para las mezclas Fibra – PPR y Fibra – PEADR. Dicho comportamiento coincide con los resultados obtenidos por Moliner *et al.* (2018), los cuales reportan incrementos entre 16.67 – 41.67% para el CF. Por su parte, el tamaño de las partículas de fibra influyó de forma inversa en la proporción de Hw. Huang *et al.* (2018) explican que los aumentos en el contenido de humedad se pueden atribuir a los espacios vacíos internos que se generan en los biocompuestos, consecuencia de la mala adhesión refuerzo – matriz. Estos espacios entran en contacto con la humedad ambiente y se llenan con partículas de agua, por lo cual se podría mencionar que las fibras con un tamaño de partícula entre 850 – 1180 μm interactuaron mejor con la matriz polimérica. Adicionalmente, se observó

que los materiales obtenidos a partir de PEADR presentaron menores porcentajes de Hw y Cz en comparación con el uso de PPR.

Se resalta que el poder calorífico superior presentó valores superiores a los reportados por Han *et al.* (2017), los cuales exponen diferentes resultados para PP y PEAD empleados como matrices en la obtención de materiales compuestos reforzados con fibras vegetales.

Tabla 3. 5. Análisis próximo en base seca y poder calorífico de los biocompuestos.

Material	Análisis Próximo				Poder Calorífico (MJ/kg)
	Hw (%)	Cz (%)	MV (%)	CF (%)	
PPR	0.12 ± 0.01	0.09 ± 0.01	99.89 ± 0.01	0.01 ± 0.01	43.53
PEADR	0.55 ± 0.03	0.45 ± 0.03	99.55 ± 0.01	0.00 ± 0.00	43.41
CCa	11.61 ± 0.08	1.83 ± 0.05	93.99 ± 0.08	4.14 ± 0.11	15.93
SC	12.15 ± 0.11	4.06 ± 0.08	83.18 ± 0.04	12.76 ± 0.08	18.41
BC1	1.26 ± 0.01	0.13 ± 0.03	99.20 ± 0.41	0.67 ± 0.43	30.26
BC2	2.92 ± 0.02	0.47 ± 0.06	95.49 ± 0.08	4.04 ± 0.04	30.77
BC3	1.28 ± 0.04	0.36 ± 0.05	99.58 ± 0.02	0.06 ± 0.01	30.21
BC4	3.56 ± 0.13	1.08 ± 0.00	94.86 ± 0.18	4.06 ± 0.05	30.86
BC5	1.41 ± 0.1	0.70 ± 0.05	97.67 ± 0.36	1.63 ± 0.40	30.33
BC6	5.52 ± 0.06	0.83 ± 0.04	97.20 ± 0.09	1.97 ± 0.00	31.09
BC7	0.87 ± 0.27	0.16 ± 0.05	99.01 ± 0.15	0.84 ± 0.08	30.21
BC8	1.02 ± 0.04	0.11 ± 0.01	98.37 ± 0.00	1.52 ± 0.05	30.28
BC9	1.24 ± 0.04	0.30 ± 0.00	99.20 ± 0.08	0.50 ± 0.04	30.24
BC10	1.52 ± 0.00	0.42 ± 0.05	97.33 ± 0.03	2.25 ± 0.02	30.40
BC11	0.40 ± 0.04	0.07 ± 0.05	99.81 ± 0.30	0.12 ± 0.39	30.08
BC12	1.10 ± 0.04	0.64 ± 0.03	97.21 ± 0.91	2.15 ± 0.90	30.32

En cuanto a los resultados correspondientes al análisis elemental de los materiales compuestos (Tabla 3.6), se observó un incremento en el contenido de carbono (C) elemental (0.30 – 2.02%), al comparar los biocompuestos, a medida que se adicionó una mayor cantidad de fibra a la matriz polimérica. Esta tendencia concuerda con los resultados expuestos por Han *et al.* (2017) quienes reportan incrementos entre 15.60 – 35.77% para las mezclas de paja de arroz con PP, PEAD y PP reciclado. Contrario a esto, las proporciones oxígeno (O) elemental en los biocompuestos disminuyó (0.95 – 6.98 %) con la adición de carga vegetal. Han *et al.* (2017) exponen el mismo comportamiento con reducciones entre 22.17 – 44.57% para las mezclas de paja de arroz con PP, PEAD y PP reciclado. Al comparar los resultados de los biocompuestos con los valores de los polímeros, se observan aumentos en el contenido de O (> 100%) y disminuciones en los contenidos de H (32.53 – 35.49%) y C (15.48 – 17.22%). Dicho efecto es reflejo i) del aumento en la proporción de O aportada por la fibra (CCa: 41.27%, SC: 38.84%) la cual es mucho mayor que en los polímeros (PPR: 1.33%, PEADR: 2.02%), ii) de la disminución en los contenidos de H y C aportados por los polímeros (PPR: 13.17%, PEADR: 13.30%) los cuales son mayores que en las fibras (CCa: 6.88%, SC: 6.51%). Han *et al.* (2017) y Sugumaran *et al.* (2017) reportan este mismo comportamiento para la mezcla paja de arroz – PP reciclado, con aumentos mayores al 100% para el O y disminuciones del H y C entre 18.57 - 28.23% y 20.49 – 24.75%, respectivamente. Adicionalmente, Singh *et al.* (2017) mencionan que una menor proporción de O e H incide en aumentos de la cantidad de enlaces C- C. Este tipo de enlaces contienen mayor energía química que los enlaces C – O y C – H, lo cual se ve reflejado en un mayor poder calorífico del material. Lo anterior concuerda con los resultados de los biocompuestos, presentándose un poder calorífico más alto en los biocompuestos con menor proporción de O e H.

Tabla 3. 6. Análisis elemental de los biocompuestos en base seca y libre de cenizas.

Análisis elemental en base seca y libre de Cz						
Material	H (%)	C (%)	N (%)	O (%)	H/C	O/C
PPR	13.17	84.65	0.12	1.33	0.01	1.87
PEADR	13.30	84.19	0.08	2.02	0.02	1.90
CCa	6.88	50.72	1.07	41.27	0.61	1.63
SC	6.51	53.88	0.68	38.84	0.54	1.45
BC1	8.67 ± 0.02	70.32 ± 0.13	0.12 ± 0.01	20.90 ± 0.33	1.48	0.22
BC2	8.62 ± 0.01	71.47 ± 0.01	0.20 ± 0.00	19.71 ± 0.01	1.45	0.21
BC3	8.70 ± 0.00	70.13 ± 0.01	0.11 ± 0.00	21.06 ± 0.01	1.49	0.23
BC4	8.65 ± 0.02	71.55 ± 0.14	0.21 ± 0.00	19.59 ± 0.18	1.45	0.21
BC5	8.63 ± 0.02	70.56 ± 0.19	0.15 ± 0.00	20.67 ± 0.39	1.47	0.22
BC6	8.89 ± 0.01	71.38 ± 0.10	0.17 ± 0.01	19.56 ± 0.11	1.49	0.21
BC7	8.63 ± 0.02	70.31 ± 0.33	0.12 ± 0.00	20.94 ± 0.39	1.47	0.22
BC8	8.61 ± 0.00	70.52 ± 0.08	0.13 ± 0.00	20.74 ± 0.11	1.46	0.22
BC9	8.68 ± 0.01	70.25 ± 0.03	0.12 ± 0.00	20.95 ± 0.02	1.48	0.22
BC10	8.61 ± 0.00	70.76 ± 0.04	0.16 ± 0.00	20.47 ± 0.05	1.46	0.22
BC11	8.63 ± 0.01	70.07 ± 0.19	0.10 ± 0.01	21.20 ± 0.38	1.48	0.23
BC12	8.58 ± 0.05	70.66 ± 0.22	0.16 ± 0.02	20.60 ± 0.26	1.46	0.22

3.4.4. Envejecimiento acelerado

Las propiedades mecánicas en los materiales compuestos, se ven influenciadas por la presencia de defectos internos o superficiales una vez son sometidos a envejecimiento acelerado. Dichos defectos son generados por la degradación de la matriz polimérica, afectando las regiones cristalinas de los biocompuestos (Belec *et al.*, 2015). Este comportamiento se ve reflejado en las Figuras 3.6 y 3.7, donde se aprecian variaciones para las mezclas Fibra – PPR en i) el módulo de flexión con reducciones entre 4.38 – 30.36%, ii) la resistencia a la flexión con disminuciones entre 0.66 – 10.13%, iii) el módulo de tracción con reducciones entre 1.91 – 7.00%, y iv) la resistencia a la tracción con disminuciones entre 1.31 – 7.17%. Así mismo, se pueden observar cambios para las mezclas Fibra – PEADR en i) el módulo de flexión con reducciones entre 1.81 – 38.46%, ii) la resistencia a la flexión con disminuciones entre 1.05 – 8.05%, iii) el módulo de tracción con reducciones entre 2.43 – 7.26 %, y iv) la resistencia a la tracción con disminuciones entre 2.03 – 6.26%. La degradación de las propiedades en los biocompuestos puede atribuirse al estrés térmico generado por el tiempo de exposición bajo condiciones de envejecimiento acelerado (Lilaa *et al.*, 2019). Lilaa *et al.* (2019) mencionan que este tipo de estrés puede resultar en el debilitamiento de los enlaces interfaciales fibra – polímero y de sus propiedades mecánicas. Con base a esto, se puede afirmar que los biocompuestos formulados a base de PEADR presentan una mejor interacción refuerzo - matriz que los obtenidos de PPR, ya que presentaron menores variaciones en sus propiedades mecánicas. Por otro lado, se observaron mejoras en las propiedades mecánicas de los biocompuestos, encontrándose aumentos en i) el módulo de flexión para la mezcla BC7 (5.47%), ii) la resistencia al flexión para BC1 (5.95%), BC7 (1.08%) y BC11 (4.70%), iii) el módulo de tracción para BC1 (0.82%), BC6 (2.61%), BC7 (3.05%) y BC9 (1.04%), y iv) la resistencia a la tracción para las mezclas BC6 (2.10%), BC8 (4.64%), BC10 (2.18%) y BC11 (1.00%). El efecto reforzante del envejecimiento acelerado puede atribuirse al fortalecimiento de las relaciones fibra – polímero. Este efecto se debe a la formación y mayor presencia de grupos carbonilo, los cuales son el resultado de la termoxidación del polímero. Adicional a todo esto, pueden producirse reacciones de reticulación entre el polímero y la fracción de lignina, contribuyendo a una fuerte adhesión y mejora de las propiedades de resistencia mecánica (Uitterhaegen *et al.*, 2018).

Al analizar el tipo de fibra, Peng *et al.*, 2015 mencionan que los refuerzos vegetales con un alto contenido de lignina, influyen positivamente en la estabilidad de la flexión de la matriz, debido al efecto antioxidante

que presentan este tipo de polímeros. Este comportamiento se ve reflejado en los resultados del biocompuesto BC6, el cual se reforzó con SC y presentó un menor cambio en las propiedades de flexión (Módulo: disminución del 4.6%, Resistencia: disminución del 2.02%). Cabe mencionar que, entre las fibras empleadas, la SC presentó un mayor contenido de lignina (25.42%) en comparación con el CCa (17.31%). Por otro lado, Mejri *et al.* (2017) y Mahmud *et al.* (2021) reportan que la cantidad de refuerzo se relaciona con los cambios en las propiedades de tracción de los biocompuestos. Un mayor contenido de carga reforzante, propicia una mayor capacidad de un material compuesto para absorber agua y presentar cambios en su forma, producto de la hinchazón. Esta condición puede generar inestabilidad de la superficie del biocompuesto, pérdida de la integridad estructural y agrietamiento de la matriz, reflejándose en deterioro de la resistencia del material (Bajwa *et al.*, 2015; Mejri *et al.*, 2017; Huang y Young, 2019). Dicho efecto se puede evidenciar en los resultados de los biocompuestos BC2 y BC8, los cual fueron reforzados con 30% de fibra y presentaron las mayores variaciones en las propiedades de tracción (Resistencia: reducción del 7.17%, Módulo: reducción del 7.26%, respectivamente). De igual forma, González *et al.* (2020) explican que la humedad promueve la hidrólisis de la cadena polimérica en un biocompuesto, reduciendo sus propiedades de tracción en un 10%. La degradación hidrolítica se produce por el transporte de agua a través de los micro espacios internos del biocompuesto, los cuales son el resultado de la mala afinidad refuerzo – matriz y la hinchazón de las fibras.

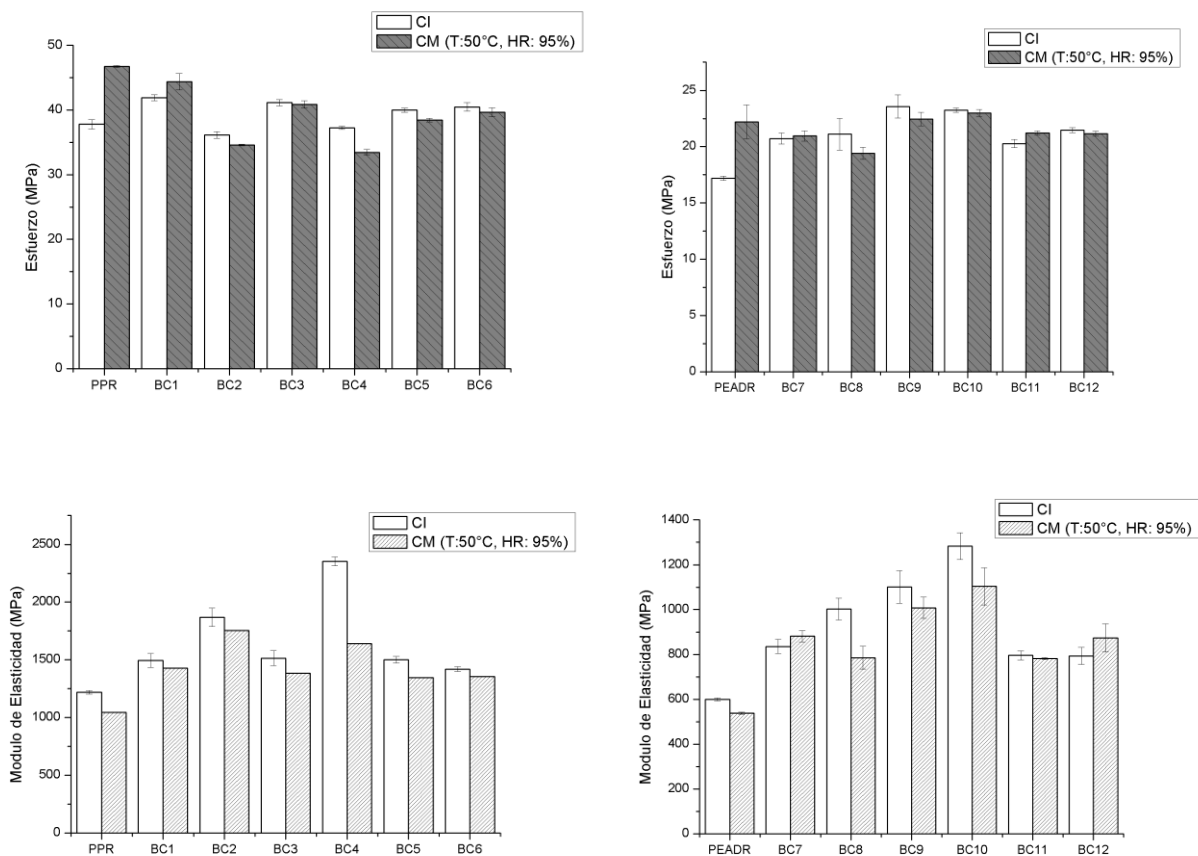


Figura 3. 6. Flexión en biocompuestos bajo condiciones de envejecimiento acelerado.

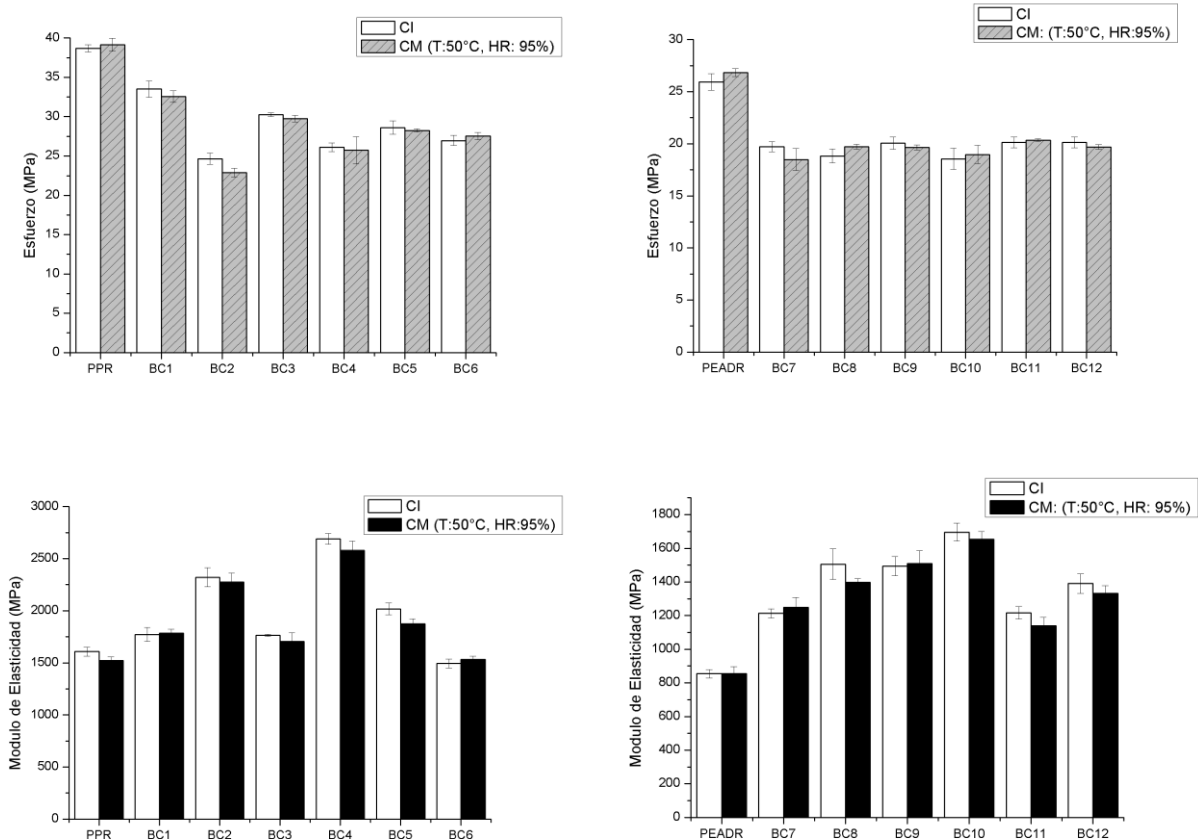


Figura 3. 7. Tracción en biocompuestos bajo condiciones de envejecimiento acelerado.

3.4.5. Termogravimetría y DSC de los materiales compuestos

La temperatura inicial de degradación, la temperatura de velocidad máxima de degradación y la cantidad de elementos trazas, son los resultados del análisis termogravimétrico de los biocompuestos y se presentan en la Tabla 3.7. A su vez, la Figura 3.16 representan las curvas DTG de los biocompuestos, donde se puede observar dos etapas de degradación. La etapa 1 se encuentra relacionada con la descomposición térmica de la biomasa, proceso que ocurre entre 300 – 380 °C. Este comportamiento concuerda con los rangos de degradación de material lignocelulósico (300 – 380 °C) reportados por Bajwa *et al.* (2016), Nunes *et al.* (2017) y Sukudom *et al.* (2019). Así mismo, se puede observar un aumento entre 1.41 – 22.87% de la temperatura de degradación inicial (T_{on}) para la biomasa, siendo un efecto esperado debido a la protección térmica que proporciona la matriz polimérica (Dikobe y Luyt, 2017) y concuerda con los resultados reportados por Dikobe y Luyt (2017) para la mezcla polvo de madera de pino – PP/PEAD (aumento de 12%). Por su parte, la etapa 2 se relaciona con la descomposición de la matriz polimérica. Este fenómeno se produce entre 400 – 480 °C, concordando con los rangos de degradación de polímeros reportados por Sukudom *et al.* (2019) y Mazian *et al.* (2020) (400 – 480 °C). Igualmente, se observa un aumento entre 1.25 – 25.15% en la T_{on} de la matriz, de forma similar que en los resultados reportados por Dikobe y Luyt (2017) para la mezcla polvo de madera de pino – PP/PEAD (incremento de 12%). Esta variación se debe probablemente a la presencia de residuos de carbón o material residual formado durante la degradación de la biomasa. Dichos materiales actúan como barrera y retrasan la transferencia de calor al polímero, haciendo más lento su proceso de degradación (Dikobe y Luyt, 2017). Continuando con el análisis de los resultados

asociados a la etapa 2, se evidencia una disminución en la T_{on} entre el 1.39 – 1.68% para las mezclas de SC – PEADR, asemejándose a lo reportado por Arjmandi *et al.* (2017) para la mezcla fibra de kenaf – PP (reducción de 2.1%). La presencia de una gran cantidad de componentes no celulósicos en la SC conduce a una mayor incompatibilidad refuerzo – matriz. Esta condición induce la formación de enlaces moleculares débiles que requieren una temperatura de degradación más baja para romperse (Arjmandi *et al.*, 2017).

La T_{on} de la fase asociada a los polímeros aumentó en todos los biocompuestos obtenidos a partir de PPR (18.83 – 25.15%) (Figura 3.15), siendo la mezclas SC – PPR los materiales con las temperaturas más altas de degradación (BC5: 441.01 °C, BC6: 434.72 °C). Este comportamiento es influenciado por la cantidad de lignina presente en la biomasa (Dikobe y Luyt, 2017; Bajwa *et al.*, 2016). La lignina se comporta como un elemento barrera, efecto que aumenta al presentarse en mayor proporción en la fibra. A causa de esto, se puede mencionar que la SC (Lignina: 25.42%) incide en una mayor estabilidad térmica de los biocompuestos, al compararse con el CCa (Lignina: 17.31%). Similarmente, las mezclas CCa – PEADR presentaron un aumento en la T_{on} de la fase polimérica (1.25 – 2.57%), variación que se ve reflejada en altas temperaturas de degradación de los biocompuestos BC9 y BC10 (447.99 y 453.82 °C, respectivamente). Dicho efecto concuerda con los datos reportados Mazian *et al.* (2020) para la mezcla de fibras de cáñamo - PP (aumento de 2.2%) y, se relaciona con la cantidad de celulosa contenida en la fibra vegetal. Al ser un componente con fuertes enlaces de hidrógeno intramoleculares y moleculares, la celulosa requiere de una mayor temperatura para romperse (Mazian *et al.*, 2020). Por tal razón, la temperatura de degradación de los biocompuestos aumenta con la proporción de celulosa, reflejándose en una mayor estabilidad térmica para los biocompuestos reforzados con CCa (Celulosa: 33.38%) si se compara con la SC (Celulosa: 22.24%). El resto de biocompuestos obtenidos a partir de PEADR disminuyeron su T_{on} (1.39 – 1.68%) concordando con los resultados reportados por Nunes *et al.* (2017) para PP reforzado con fibra de piasava (reducción de 3%).

La adición de una mayor cantidad de fibra generó aumentos entre 0.29 – 5.06% en la T_{on} y entre 0.3 – 14.93% en la temperatura de velocidad máxima de degradación (T_{max}) del polímero presente en los biocompuestos. Este fenómeno se asemeja a los resultados reportados por Bhasney *et al.* (2020) para la mezcla de fibra de celulosa microcristalina en polvo – PP/PLA (T_{on} : 0.6%, T_{max} : 0.3 %) y, ocurre debido a que las fibras de CCa y SC restringen la movilidad de las cadenas poliméricas, haciendo que la matriz requiera de más calor para ser fundida y por lo tanto, se refleje en aumentos de la estabilidad térmica (Bhasney *et al.*, 2020).

Los elementos traza son los componentes sobrantes de la degradación de los biocompuestos y fueron determinados por diferencia entre la totalidad de la muestra (100%) y el porcentaje de masa perdido al final del tratamiento térmico. Este tipo de componentes tuvieron un aumento superior al 32%, concordando con los valores reportados por Sarasini *et al.* (2018) para la mezcla cascarilla de café – polímero (incremento entre 16.7 – 61.9%). Arjmandi *et al.* (2017) y Sarasini *et al.* (2018) mencionan que los elementos trazas posiblemente corresponden con la lignina no degradada y la proporción de minerales presente en las fibras vegetales.

Tabla 3. 7. Resultados del análisis termogravimétrico de los materiales compuestos obtenidos.

Material	Etapas de degradación	T _{on} (°C)	T _{max} (°C)	Trazas (%)
PPR	2	352.38	402.4	1.47
PEADR	2	442.46	465.35	0.65
CCa	1	268.82	358.20	25.61
SC	1	242.84	329.00	33.12
BC1	1	321.35	358.00	1.95
	2	428.51	455.00	
BC2	1	326.85	360.69	14.29
	2	439.02	462.49	
BC3	1	316.10	347.00	3.29
	2	418.74	449.00	
BC4	1	272.60	356.48	12.88
	2	439.91	461.03	
BC5	1	276.06	327.55	7.45
	2	441.01	462.12	
BC6	1	268.41	327.57	11.01
	2	434.72	460.42	
BC7	1	354.00	355.92	2.16
	2	435.38	470.37	
BC8	1	330.31	348.32	3.18
	2	435.29	466.44	
BC9	1	288.59	355.76	3.59
	2	447.99	476.48	
BC10	1	318.30	341.68	5.66
	2	453.82	478.18	
BC11	1	290.94	324.56	8.88
	2	435.04	466.73	
BC12	1	280.83	324.39	11.9
	2	436.29	466.73	

T_{on}: temperatura inicial de degradación, T_{max}: temperatura de velocidad máxima de degradación.

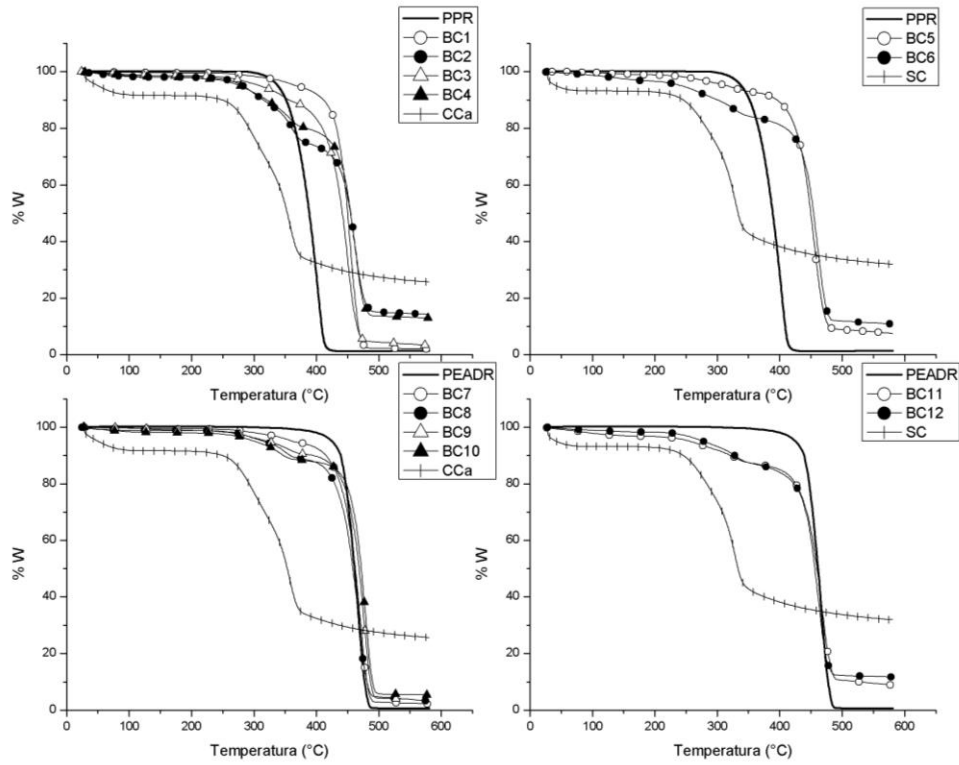


Figura 3. 8. Termogravimetría de los biocompuestos.

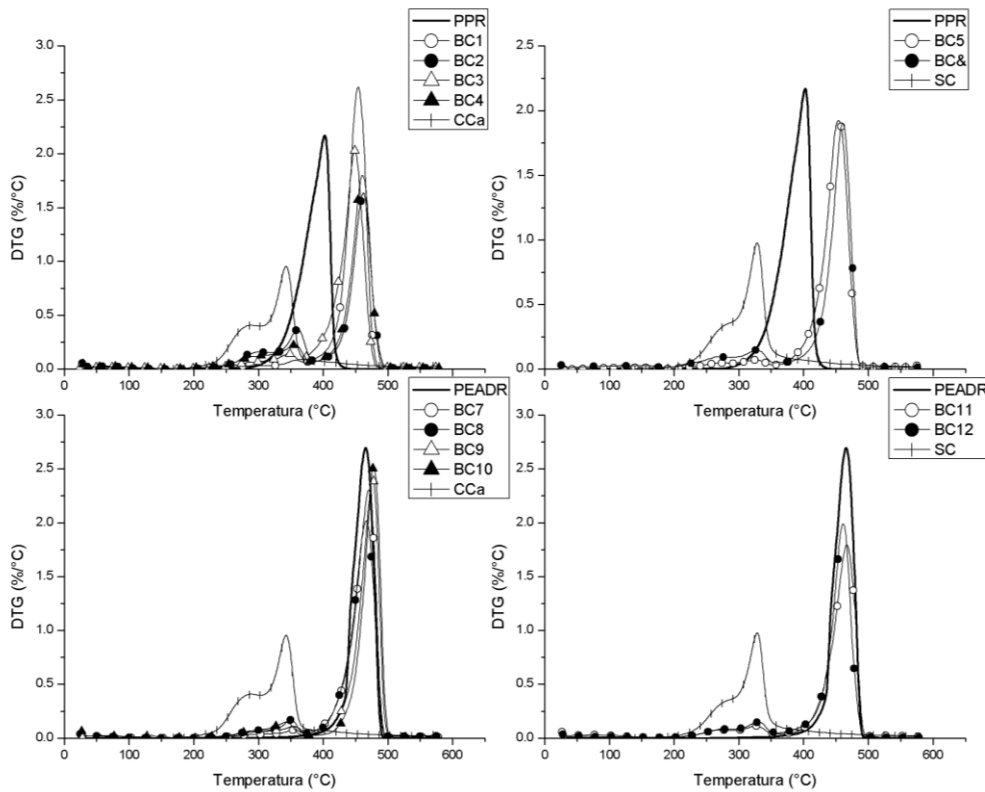


Figura 3. 9. DTG de los biocompuestos.

La temperatura de cristalización (T_c), la entalpía de cristalización (ΔH_c), el porcentaje de cristalización (X_c), la temperatura de fusión (T_m) y la entalpía de fusión (ΔH_m) son presentados en la Tabla 3.8. La T_c (Figura 3.17) de los biocompuestos aumentó en un rango entre 0.05 – 10.03%, concordando con los datos reportados por Mazian *et al.* (2020) y Zhang *et al.* (2020) quienes informan un incremento en la T_c de 0.59 – 1.79% y 0.84 – 3.36% para la mezclas de fibra de cáñamo – PP y cascarilla de arroz – PEAD, respectivamente. Este comportamiento se podría deber a la presencia de las fibras vegetales, las cuales actúan como agentes nucleantes y restringen la movilidad macromolecular de las cadenas de la matriz polimérica. Como resultado, las moléculas necesitarían de una mayor cantidad de energía para iniciar su movimiento, es decir temperaturas más altas para convertir el polímero de un estado vítreo a un estado gomoso o, en otras palabras, comenzar a cristalizar (Dikobe y Luyt, 2017; Qian *et al.*, 2018). Adicionalmente, Bhasney *et al.* (2020) mencionan que incorporar un bajo contenido de fibra influye en menor medida en el movimiento de las cadenas poliméricas, si se compara con los biocompuestos de mayor carga de refuerzo vegetal. Por esta razón, los biocompuestos con mayor cantidad de fibra requieren de más energía térmica y una temperatura más alta para comenzar a cristalizarse. Este comportamiento se ve reflejado en los biocompuestos BC4 y BC6 (30% fibra), los cuales presentaron un aumento en la T_c del 0.57 y 0.47%, respectivamente. Por otro lado, los biocompuestos BC4, BC9 y BC10 (Tamaño de partícula: 75 – 425 μm) presentaron una T_c mas alta (0.26 – 2.39%) en comparación con los biocompuestos BC2, BC7 y BC8 (Tamaño de partícula: 850 – 1180 μm). Este fenómeno es explicado por Peng *et al.* (2015) los cuales reportan que la capacidad de nucleación de las fibras no solo depende del tipo y la cantidad de refuerzo, sino también de su longitud. Afirman que las fibras largas tienen una baja actividad como agentes nucleantes, en comparación con fibras más cortas. Por tal motivo, los biocompuestos reforzados con fibras cortas necesitarían de más energía para cristalizarse.

Por su parte, la T_m de los biocompuestos no mostró grandes variaciones, oscilando en un rango de temperaturas entre 162.87 – 165.15 $^{\circ}\text{C}$ y 129.73 – 131.21 $^{\circ}\text{C}$ para las formulaciones fibra – PPR y fibra – PEADR, respectivamente. Estos resultados indican que la incorporación de fibra vegetal no altera los procesos de fusión de la matriz polimérica, concordando con Sugumaran *et al.* (2018) e Hidalgo y Salinas (2019) los cuales reportan bajas variaciones en la T_m para las mezclas de cáscara de papa – polietileno de baja densidad (PEBD) (122.1 – 123.5 $^{\circ}\text{C}$) y cascarillas de arroz – PP (165 – 166 $^{\circ}\text{C}$), en comparación con la T_m de los polímeros vírgenes (PEBD: 123.4 $^{\circ}\text{C}$, PP: 165 $^{\circ}\text{C}$).

El X_c de los biocompuestos aumentó entre 0.51 – 54.76%, concordando con los datos reportados por Mazian *et al.* (2020) quienes informan un incremento en la T_c de 11.72 – 34.6% para la mezclas de fibra de cáñamo – PP. Agustin – Salazar *et al.* (2018), Bhasney *et al.* (2020) y Lima *et al.* (2021) explican que este comportamiento se puede generar por la incorporación de fibra vegetal y el contenido de celulosa presente en esta. La proporción de celulosa se relaciona con la actividad de nucleación de las fibras reforzantes, propiciando aumentos en la cristalinidad de la matriz polimérica y posibles mejoras en las propiedades mecánicas de los materiales compuestos. Por el contrario, los biocompuestos BC2 y BC5 presentaron una reducción en el X_c de 13.57 y 6.48%, respectivamente. Dicho resultado es explicado por Nunes *et al.* (2017) los cuales mencionan que el contenido de fibra puede reducir la velocidad de cristalinidad en un material compuesto, como consecuencia de la obstrucción estérica propiciada por el refuerzo durante la cristalización. Lo anterior se traduce en un mayor grado de cristalinidad del polímero puro en contraste con las mezclas. Por otra parte, se encontró que el X_c de los biocompuestos reforzados con SC aumento en mayor proporción que en los biocompuestos incorporados con CCa (54.76 y 29.58%, respectivamente). Este efecto es explicado por Peng *et al.* (2015) los cuales relacionan el contenido de lignina con las variaciones en la cristalinidad de los biocompuestos. El aumento en la cantidad de lignina genera un incremento en la cristalinidad de los biocompuestos, lo que se asocia con una mayor viscosidad en estado fundido de las fibras vegetales. Por tal motivo, los polímeros reforzados con SC (Lignina: 25.42%) presentan una mayor cristalinidad si se comparan con el CCa (Lignina: 17.31%).

Tabla 3. 8. Resultados análisis DSC para los materiales compuestos obtenidos.

Material	Enfriamiento		X _c (%)	Calentamiento	
	T _c (°C)	ΔH _c (J/gr)		T _m (°C)	ΔH _m (J/gr)
PPR	114.17	98.94	47.39	165.49	95.74
PEADR	117.23	215	74.45	130.86	211.9
BC1	125.62	115.4	61.41	164.83	112.7
BC2	116.97	59.86	40.96	162.87	55.46
BC3	119.08	106.9	56.89	163.46	102.9
BC4	119.76	70.35	48.13	163.18	65.77
BC5	120.52	83.29	44.32	163.43	84.44
BC6	121.09	107.2	73.34	165.15	107.4
BC7	117.13	194.5	74.83	130.35	195
BC8	116.55	180.3	89.19	130.48	183.9
BC9	117.43	201	77.33	129.73	198.9
BC10	117.29	179.7	88.89	129.84	175
BC11	116.44	201.2	77.41	131.21	196.3
BC12	116.44	191.6	94.78	130.89	188.3

T_m: temperatura de fusión, T_c: temperatura de cristalización, X_c: porcentaje de cristalización, ΔH_c: entalpía de cristalización, ΔH_m: entalpía de fusión.

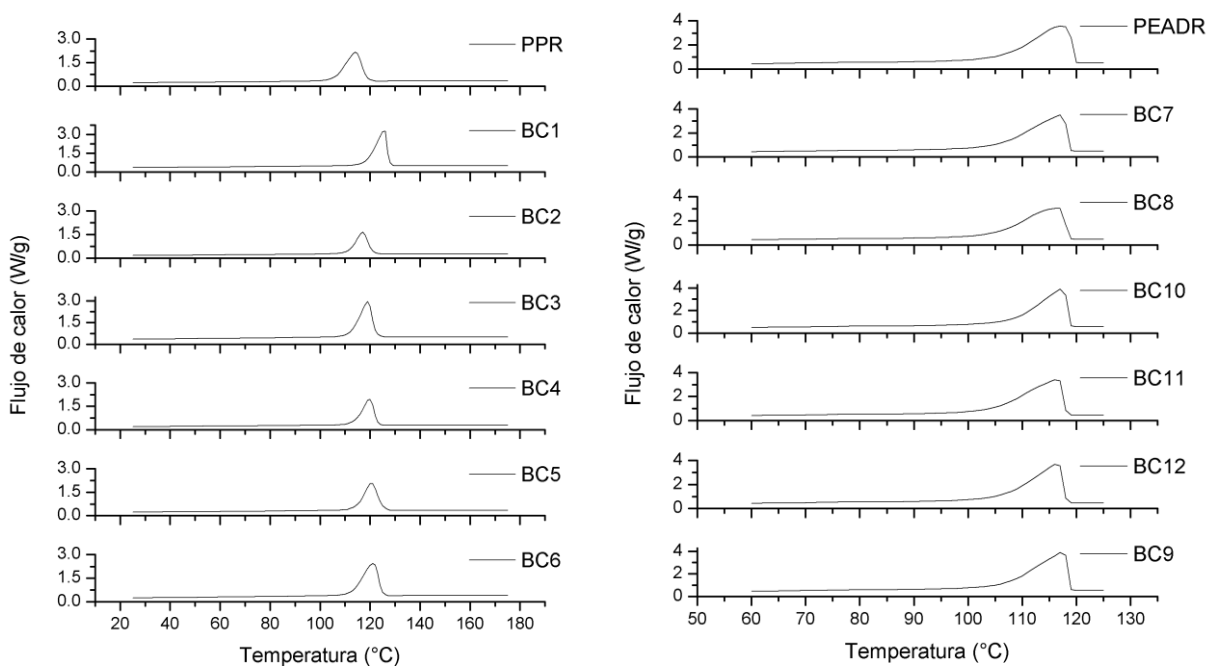


Figura 3. 10. Etapa de enfriamiento durante análisis DSC de los biocompuestos.

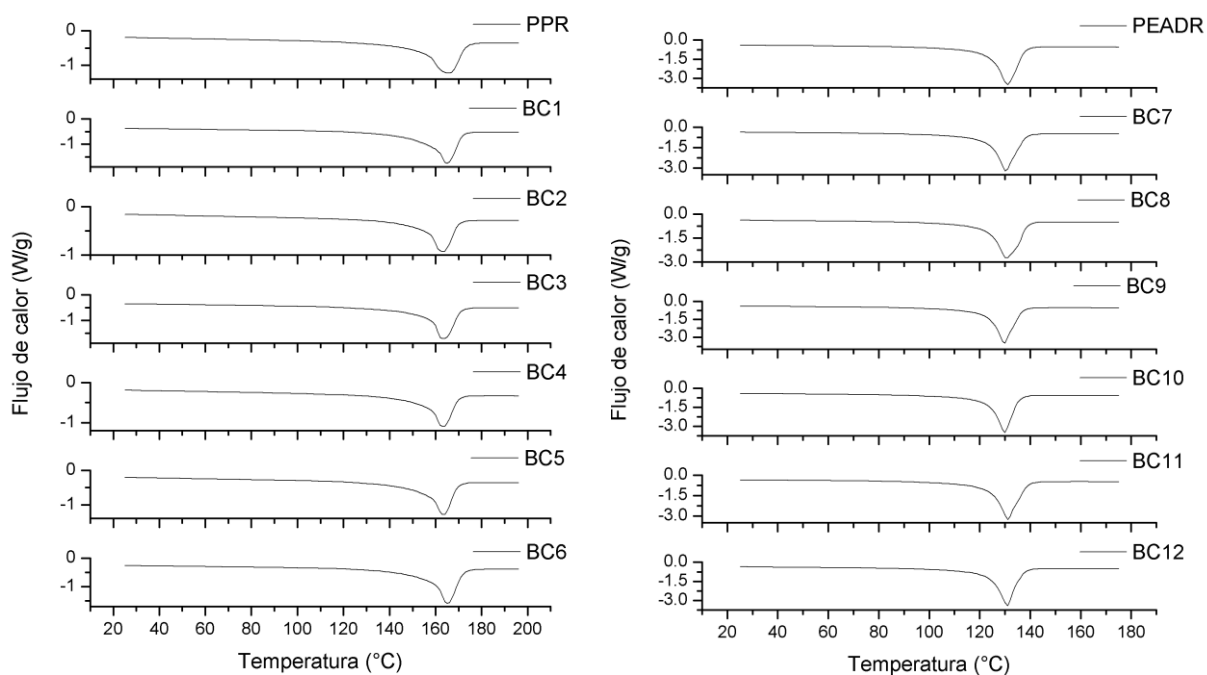


Figura 3. 11. Etapa de calentamiento durante análisis DSC de los biocompuestos.

3.5. Aplicaciones de los materiales compuestos

Uno de los sectores de mayor consumo de plásticos a nivel mundial es el sector de empaques y embalajes. Entre los principales polímeros utilizados para la producción de este tipo de artículos son el polipropileno (PP), el polietileno (PE), el poliestireno (PS) y el cloruro de polivinilo (PVC) (Campilho, 2017; Lammi *et al.*, 2018). Con el fin de reducir el efecto nocivo de los residuos plásticos derivados de la industria petroquímica, la concepción de utilizar los biocompuestos como materiales de empaque y embalaje constituye una alternativa para dar solución a esta problemática. Los aumentos en la estabilidad térmica de los biocompuestos obtenidos, los convierte en candidatos adecuados para reemplazar matrices como el PP y el PE en aplicaciones de empaque y embalaje (Jayakumar *et al.*, 2019). Adicionalmente, el uso de los biocompuestos puede reducir significativamente el costo de las materias primas asociadas a la actividad en cuestión (Sun, 2018). Como alternativa para la fabricación de estibas, los biocompuestos cumplen con los requisitos de densidad (mínimo entre 0.3 – 0.6 gr/cm³) y humedad (inferior al 20%) establecidos por la norma técnica colombiana NTC 5858: Estibas de madera para manipulación de mercancías, requisitos. Adicional a lo anterior, los materiales compuestos se pueden utilizar como relleno en la elaboración de artículos para exteriores, bancos para parques, vallas, postes y cercas (Sun, 2018).

3.6. Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos se puede concluir que los polímeros reforzados con CCa presentaron un aumento en la densidad entre el 14.8 – 16.4% y 5.5 – 9.3% para las mezclas de CCa – PPR y CCa – PEADR, respectivamente. Este comportamiento se encuentra relacionado con la incorporación o adición de una mayor cantidad de fibra, así como de un menor contenido de humedad presente en las fibras. Del mismo modo, la capacidad de absorción de agua de los biocompuestos aumentó (0.10 – 3.64%) con la incorporación de fibra. Esta tendencia puede generar deformaciones que afectan la fuerza de los materiales compuestos e incrementen la degradación en las propiedades mecánicas y físicas asociadas a estos, por lo cual la mezcla SC – Polímero presentó un mejor comportamiento asociado a valores bajos de absorción de agua. Por otro lado, luego de haber sido sometidos a condiciones de envejecimiento acelerado, los biocompuestos presentaron variaciones en i) el módulo de flexión con reducciones entre 1.81 – 38.46%, ii) la resistencia a la flexión con disminuciones entre 0.66 – 10.13%, iii) el módulo de tracción con reducciones entre 1.91 – 7.26%, y iv) la resistencia a la tracción con disminuciones entre 1.31 – 7.17%. Con base en esto, se puede apreciar que las mezclas Fibra - PPR respondieron de mejor manera ante condiciones de degradación ambiental acelerada. Con respecto a las propiedades térmicas de los biocompuestos, se presentaron aumentos en la temperatura inicial y la temperatura de velocidad máxima de degradación de la fase polimérica. Este comportamiento se asocia con la adición de una mayor cantidad de fibra vegetal, lo cual restringe la movilidad de las cadenas poliméricas y hace que la matriz requiera de más calor para ser fundida. Por lo anterior, se puede concluir que los biocompuestos térmicamente más estables corresponden a la mezcla Fibra – PPR. Así mismo, la temperatura y porcentaje de cristalización de los biocompuestos aumentó entre 0.05 – 10.03 y 0.51 – 54.76%, respectivamente. Este fenómeno se debe a la presencia de las fibras vegetales, las cuales actuaron como agente nucleantes y restringieron la movilidad de las cadenas de la matriz polimérica. A su vez, este efecto hace que los biocompuestos requieran de una mayor cantidad de energía para empezar a cristalizarse.

3.7 Referencias

- Abbass O. A., Salih A. and Hurmuzy O. M. A. (2020). Study of the mechanical and physical properties of biocomposite material based on wheat starch and wheat straw fibers. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 745, 012075. Doi:10.1088/1757-899X/745/1/012075.
- Abdelwahaba M. A., Misraa M. and Mohantya A. K. (2019). Injection molded biocomposites from polypropylene and lignin: Effect of compatibilizers on interfacial adhesion and performance. Industrial Crops & Products. 132, 497 – 510. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.02.026>.
- Aradoaei S., Bahrin V., Aradoaei M., Constantin M. A., Constantin L. A. and Ionescu I. (2020). Analysis of the Physical and Chemical Properties of Biocomposite Materials Obtained from Feather Flour and Polypropylene. Materiale Plastice. 57 (4), 325 – 332. Doi: <https://doi.org/10.37358/Mat.Plast.1964>.
- Agustin – Salazar S., Cerruti P., Medina – Juaréz L. A., Scarinzi G., Malinconico M., Soto – Valdez H. and Gamez – Meza, N. (2018). Lignin and holocellulose from pecan nutshell as reinforcing fillers in poly (lactic acid) biocomposites. International Journal of Biological Macromolecules. 115, 727 – 735.
- Arjmandi R., Isamil A., Hassan A. and Bakar A. A. (2017). Effects of ammonium polyphosphate content on mechanical, thermal and flammability properties of kenaf/polypropylene and rice husk/polypropylene composites. Construction and Building Materials. 152, 484 – 493. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.052>.

- Assarar M., Scida D., Zouari W., Saidane E.H. and Rezak A. (2012). Mechanical properties analysis of short hemp-fibre/ polypropylene composites: Influence of fibre content and hygrothermal ageing. Venecia, Italia. European Conference on Composite Materials.
- Bahl S., Dolma J., Singh J. J. and Sehgal S. (2021). Biodegradation of plastics: A state of the art review. *Materials Today: Proceedings*.39, 31 – 34. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.096>.
- Bajwa S.G., Bajwa D.S., Holt G., Coffelt T. and Nakayama F. (2011). Properties of thermoplastic composites with cotton and guayule biomass residues as fiber fillers. *Industrial Crops and Products*. 33 (3), 747-755.
- Bajwa D., Bajwa S.G. and Holt, G. A. (2015). Impact of biofibers and coupling agents on the weathering characteristics of composites. *Polymer Degradation and Stability*. 120, 212 – 219.
- Bajwa D., Wang X., Sitz E., Loll T. and Bhattacharjee S. (2016). Application of bioethanol derived lignin for improving physico-mechanical properties of thermoset biocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*. 89, 265 – 272.
- Belec I., Nguyen T.H., Nguyen D.L. and Chailan J.F. (2015). Comparative effects of humid tropical weathering and artificial ageing on a model composite properties from nano- to macro-scale. *Composites: Part A*. 68, 235 – 241.
- Bhasney S. M., Kumar A. and Katiyar V. (2020). Microcrystalline cellulose, polylactic acid and polypropylene biocomposites and its morphological, mechanical, thermal and rheological properties. *Composites Part B*. 184, 107717. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107717>.
- Binhussain M.A. and El-Tonsy M.M. (2013). Palm leave and plastic waste wood composite for out-door structures. *Construction and Building Materials*. 47, 1431-1435.
- Bouafif H., Koubaa A., Perré P. and Cloutier, A. (2008). Effects of fibre characteristics on the physical and mechanical properties of wood plastic composites. The 9th International Conference on Flow Processes in Composite Materials, Montreal.
- Campilho R.D.S.G. (2017). Recent innovations in biocomposite products. Elsevier. *Biocomposites for High-Performance Applications* (275 – 306). Doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100793-8.00010-7>.
- Dikobe D.G. and Luyt, A.S. (2017). Thermal and mechanical properties of PP/HDPE/wood powder and MAPP/HDPE/wood powder polymer blend composites. *Thermochimica Acta*. 654, 40 -50. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tca.2017.05.002>.
- Ecoplas, (2011). Manual de Valorización de los Residuos Plásticos. Buenos Aires, Argentina. Ecoplas.
- Fontana M.L., Perez V.R. and Luna C.V. (2016) Pruebas de Envejecimiento Acelerado para determinar vigor de semillas de Prosopis Alba de tres procedencias geográficas. *Revista FAVE - Ciencias Agrarias*. 15 (1), 2.
- Gautam P. and Kumar S. (2021). Characterisation of Hazardous Waste Landfill Leachate and its Reliance on Landfill Age and Seasonal Variation: A Statistical Approach. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 9, 105496.
- Gilormini P. and Verdu J. (2018). On the role of hydrogen bonding on water absorption in polymers. *Polymer*. 142, 164 – 169. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2018.03.033>.
- Gonzalez M. E., Martín del Campo A. S., Robledo J. R., Arellano M. and Perez A. A. (2020). Accelerated weathering of poly (lactic acid) and its biocomposites: A review. *Polymer Degradation and Stability*. 179, 109290. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109290>.

- Han J., Yao X., Zhan Y., Oh S., Kim L. and Kim H. (2017). A method for estimating higher heating value of biomass-plastic fuel. *Journal of the Energy Institute*. 90, 331 – 335.
- Hidalgo M. A. and Salinas E. (2019). Mechanical, thermal, viscoelastic performance and product application of PP- rice husk Colombian biocomposites. *Composites Part B*. 176, 107135. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107135>.
- Höhne G.W.H., Hemminger W.F. and Flammersheim H.J. (2003). *Differential Scanning Calorimetry*. Berlín, Alemania. Springer.
- Hosseinihashemi S.K., Arwinfar F., Najafi A., Nemli G. and Ayrilmis, N. (2016). Long-term water absorption behavior of thermoplastic composites produced with thermally treated wood. *Measurement*. 86, 202 – 208.
- Huang L., Mu B., Yi X., Li S. and Wang, Q. (2018). Sustainable Use of Coffee Husks for Reinforcing Polyethylene Composites. *Journal Polymer Environment*. 26 (1), 48 – 58.
- Huang J. K. and Young W. B. (2019). The mechanical, hygral, and interfacial strength of continuous bamboo fiber reinforced epoxy composites. *Composites Part B*. 166, 272 – 283. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.12.013>.
- Jayakumar A., Heera K. V., Sumi T.S., Joseph M., Mathew S., Praveen G., Nair I. C. and Radhakrishnan E.K. (2019). Starch-PVA composite films with zinc-oxide nanoparticles and phytochemicals as intelligent pH sensing wraps for food packaging application. *International Journal of Biological Macromolecules*. 136, 395 – 403. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.06.018>.
- Karimi N., Wai K. T., Richter A., Williams J. and Ibrahim H. (2021). Thermal heterogeneity in the proximity of municipal solid waste landfills on forest and agricultural lands. *Journal of Environmental Management*. 287, 112320.
- Kuburi L.S., Dauda M., Obada D. O., Umaru S., Dodoo-Arhin D., Iliyasu I., Balogun M.B. and Mustapha S. (2017). Effects of coir fiber loading on the physio-mechanical and morphological properties of coconut Shell powder filled low density polyethylene composites. *Procedia Manufacturing*. 7, 138 – 144.
- Lammi S., Moigne N., Djenane D., Gontard N. and Coussy H. (2018). Dry fractionation of olive pomace for the development of food packaging biocomposites. *Industrial Crops & Products*. 120, 250 – 261. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.04.052>.
- Larrain M., Van Passel S., Thomassen G., Van Gorp B., Nhu T. T., Huysveld S., Van Geem K. M., De Meester S. and Billen P. (2021). Techno-economic assessment of mechanical recycling of challenging post-consumer plastic packaging waste. *Resources, Conservation & Recycling*. 170, 105607. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105607>.
- Lilaa M. K., Shukla K., Komal U. K. and Singh I. (2019). Accelerated thermal ageing behaviour of bagasse fibers reinforced Poly (Lactic Acid) based biocomposites. *Composites Part B*. 156, 121 – 127. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.08.068>.
- Lima E. M. B., Middea A., Neumann R., Thiré R. M. S., Pereira J. F., Freitas S. C., Penteadó M. S., Lima A. M., Minguita M. P. S., Mattos M. C., Teixeira A. S., Pereira I. C. S., Santos N. R. R., Marconcini J. M., Oliveira R. N. and Corrêa A. C. (2021). Biocomposites of PLA and Mango seed Waste: Potential Material for Food Packaging and a Technological Alternative to Reduce Environmental Impact. *Starch - Stärke*. 73 (5 – 6), 2000118. Doi: <https://doi-org.ezproxy.unal.edu.co/10.1002/star.202000118>.
- Machado C. R. and Hettiarachchi H. (2020). Composting as a Municipal Solid Waste Management Strategy: Lessons Learned from Cajicá, Colombia. Hettiarachchi H., Caucci S., Schwärzel K. (eds)

Organic Waste Composting through Nexus Thinking. 17 – 38. Doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-36283-6_2.

Mahmud S., Hasan K. M. F., Jahid M. A., Mohiuddin K., Zhang R. and Zhu J. (2021). Comprehensive review on plant fiber-reinforced polymeric biocomposites. *Journal Materials Science*. 56, 7231–7264. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10853-021-05774-9>.

Mazian B., Bergereta A., Benezeta J. and Malhautier L. (2020). Impact of field retting and accelerated retting performed in a lab-scale pilot unit on the properties of hemp fibres/polypropylene biocomposites. *Industrial Crops & Products*. 143, 111912. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2019.111912>.

Mejri M., Toubal L., Cuillère J. C. and François V. (2017). Hygrothermal aging effects on mechanical and fatigue behaviors of a shortnatural-fiber-reinforced composite. *International Journal of Fatigue*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2017.11.004>. 108, 96-108.

Moliner C., Badiab J. D., Bosioa B., Aratoa E., Teruel-Juanes R., Kittikorn T., Strömberg E., Ek M., Karlsson S. and Ribes-Greus A. (2018). Thermal kinetics for the energy valorisation of polylactide/sisal biocomposites. *Thermochimica Acta*. 670, 169 – 177. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2018.10.029>.

Moreno P., Rodriguez D., Giroux Y., Ballerini A. and Gacituan W. (2013). Morphological and mechanical characterization of recycled thermoplastic foams reinforced with wood subproducts. *Maderas, Ciencia y Tecnología*. 15 (1), 3 – 16.

Norhasnan N. H. A., Hassan M. Z., Nor A. F. M., Zaki S. A., Dolah R., Jamaludin K. R. and Aziz S. A. (2021). Physicomechanical Properties of Rice Husk/Coco Peat Reinforced Acrylonitrile Butadiene Styrene Blend Composites. *Polymers*. 13, 1171. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym13071171>.

Nunes S.G., da Silva L.V., Amico S.C., Viana J.D. and Rico, F. D. (2017). Study of Composites Produced with Recovered Polypropylene and Piassava Fiber. *Materials Research*. 20 (1), 144 – 150. Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0659>

Peng Y., Liu R. and Cao J. (2015). Characterization of surface chemistry and crystallization behavior of polypropylene composites reinforced with wood flour, cellulose, and lignin during accelerated weathering. *Applied Surface Science*. 332, 253 – 259.

Qian S., Zhang H., Yao W. and Sheng K. (2018). Effects of bamboo cellulose nanowhisker content on the morphology, crystallization, mechanical, and thermal properties of PLA matrix biocomposites. *Composites Part B*. 133, 203 – 209. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.040>.

Quarshie R. and Carruthers J. (2014). Technology overview Biocomposites. Reino Unido. Materials KTN and NetComposites Ltd.

Ramesh M., Deepa C., Selvan M. T., Rajeshkumar L., Balaji D. and Bhuvaneshwari V. (2020). Mechanical and water absorption properties of *Calotropis gigantea* plant fibers reinforced polymer composites. *Materials Today: Proceedings*. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.480>.

Rodriguez L. J.,Peças P., Carvalho H. and Orrego C. E. (2020). A literature review on life cycle tools fostering holistic sustainability assessment: An application in biocomposite materials. *Journal of Environmental Management*. 262, 110308.

Sarasini F., Tirillo J., Zuorro A., Maffei G., Lavecchia R., Puglia D., Dominici F., Luzi F., Valente T. and Torre L. (2018). Recycling coffee silverskin in sustainable composites based on a poly (butylene adipate-co-terephthalate)/poly (3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) matrix. *Industrial Crops & Products*. 118, 311 – 320. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.03.070>.

Sierra I., Gómez S., Pérez D., and Morante S. (2009). *Análisis Instrumental*. La Coruña, España. Netbiblo.

Singh Y. D., Mahanta P. and Bora U. (2017). Comprehensive characterization of lignocellulosic biomass through proximate, ultimate and compositional analysis for bioenergy production. *Renewable Energy*. 103, 490 – 500. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2016.11.039>.

Siqueira D.D., Luna C.B.B., Ferreira E.S.B., Araújo E.M. and Wellen R.M.R. (2020). Tailored PCL/Macaíba fiber to reach sustainable biocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*. 9 (5), 9691 – 9708. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.06.066> 2238-7854.

Speyer R.F. and Agarwall G. (1996). *Materials Research Society Symposia Proceedings*. 11, 671.

Sugumaran V., Prakash S., Arorab A. K., Kapur G. S. and Narulaa A. K. (2017). Thermal cracking of potato-peel powder-polypropylene biocomposite and characterization of products—Pyrolysed oils and bio-char. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 126, 425 – 414. Doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaap.2017.04.014>.

Sukudom N., Jariyasakoolroj P., Jarupan L. and Tansin K. (2019). Mechanical, thermal, and biodegradation behaviors of poly (vinyl alcohol) biocomposite with reinforcement of oil palm frond fiber. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 21, 125 – 133. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10163-018-0773-y>.

Sun Z. (2018). Progress in the research and applications of natural fiber-reinforced polymer matrix composites. *Science and Engineering of Composite Materials*. 25 (5), 835 – 846. Doi: <https://doi.org/10.1515/secm-2016-0072>.

Trejos J.D. (2014). Propiedades mecánicas de una matriz de poliéster reforzada con fibra de coco comparadas con la misma matriz reforzada con fibra de vidrio. Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico. Universidad Tecnológica de Pereira, Risaralda.

Uddin N. (2013). *Developments in Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Composites for Civil Engineering*. Cambridge, Reino Unido. Woodhead Publishing Limited.

Universidad Industrial de Santander - UIS. (2017). Analytical Services.Articles: Proximate And Ultimate. Disponible en: <http://www.uis-as.co.za/index.php/component/content/article/2-news/46-ultimate-a-proximate-analysis>. Consultado en Marzo del 2017.

Uitterhaegena E., Parineta J., Labonnea L., Mérianc T., Ballasd S., Véronèsed T., Meraha O., Taloua T., Stevensb C. V., Chabertc F. and Evona P. (2018). Performance, durability and recycling of thermoplastic biocomposites reinforced with coriander Straw. *Composites Part A*. 113, 254 – 263. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2018.07.038>.

Venegas D.F. (2017). *Calorimetría Diferencial de Barrido*. Departamento de Ingeniería de Materiales – DIMAT. Doi: 10.13140/RG.2.2.12849.79204.

Zambrano A. M., Castellar G. C., Vallejo W. A., Piñeres I. E., Cely M. M. and Valencia J. S. (2017). Conceptual approach to thermal analysis and its main applications. *Prospect*. 15 (2), 117 – 125. Doi: <http://dx.doi.org/10.15665/tp.v15i2.1166>.

Zhang Q., Zhang D., Lu W., Khan M. U., Xu H., Yi W., Lei H., Huo E., Qian M., Zhao Y. and Zou R. (2020). Production of high-density polyethylene biocomposites from rice husk biochar: Effects of varying pyrolysis temperatura. *Science of the Total Environment*. 738, 139910. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139910>.

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS TÉCNICO – ECONÓMICO – AMBIENTAL DEL PROCESO PARA LA OBTENCIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS MADERO PLÁSTICOS

4.1. Resumen

La simulación de procesos permite evaluar y predecir el comportamiento de los mismos con el fin de identificar problemas, oportunidades de mejora así como la toma de decisiones acertadas por parte del área productiva. El objetivo de modelar un sistema de extrusión para obtener materiales compuestos es el generar herramientas de análisis crítico frente a la selección de materias primas, costos del proceso y sus posibles impactos sobre el medio ambiente. Por esta razón, se empleó Aspen Plus para simular la extrusión de biocompuestos constituidos por polipropileno pos industrial (PPR), polietileno de alta densidad pos industrial (PEADR), cisco de café (CCa) y estopa de coco (SC). El análisis económico y ambiental se efectuó bajo los métodos reportados por Peters y Timmerhaus (1991) y Ruiz *et al.* (2012), respectivamente. Entre los resultados obtenidos, se encontró que la formulación CCa – PEADR presentó el menor costo de producción con un valor 1237.12 US \$/Ton. El margen de ganancias obtenido de los biocompuestos fue de 8.50 – 22.2%, siendo la mezcla CCa – PEADR la mas viable económicamente (22.2%). Por otro lado, se encontró que los procesos productivo tiene un impacto ambiental bajo, el cual se relaciona principalmente con el potencial de calentamiento global.

4.2. Marco teórico

Los programas de simulación son utilizados para conocer y predecir el comportamiento de un proceso, estableciendo problemas y oportunidades de mejora asociados a éste, a través de la manipulación de variables operativas como la temperatura, presión y cantidad de flujo. De esta forma se hace posible tomar decisiones de forma más fácil y menos riesgosa (Szabó *et al.*, 2021). Para el caso de sistemas de inyección, se han encontrado métodos de simulación mediante el uso modelos numéricos, modelos 3D y elementos finitos, con el fin de determinar las condiciones de trabajo y la transferencia de calor (Juarez *et al.*, 2012; Szabó *et al.*, 2021). Por otro lado, se reporta el uso de la fluidodinámica funcional (CFD) para el análisis de flujos de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos asociados a sistemas de extrusión (Prashanth *et al.*, 2019). En el caso del diseño de extrusoras, cálculo de propiedades del material fundido y simulación del flujo de fluidos, se reporta el uso de programas como Comsol para la simulación del flujo del material utilizado (Šupić *et al.*, 2018). Adicionalmente, el uso de simulaciones 3D para analizar dinámicas de termo-fluidos, permite conocer la temperatura y el esfuerzo cortante de una zona en particular simulada para un sistema de extrusión (Cubeddu *et al.*, 2014).

Por otro lado, los análisis económico y ambiental complementan la simulación y modelación de procesos. Se ha encontrado que mediante el uso del modelo de análisis tecno – económico sostenible (TESA) se pueden identificar alternativas potenciales para la obtención de productos con valor agregado, sostenibles y con menor riesgo de impacto económico - ambiental (Briassoulis *et al.*, 2021). Otra de las metodologías utilizadas es el modelo de análisis técnico – económico TEA, el cual funciona como una herramienta de pronóstico de mercado que analiza y compila el capital fijo y los costos variables. Así mismo, proyecta la tasa anual de rendimiento económico, asociándose generalmente con un proceso de producción comercial (Haylock y Rosentrater, 2018). Peters y Timmerhaus (1991) reportan otro tipo de metodología aplicada al análisis y estimación de costos en procesos industriales, donde se tiene en cuenta diferentes componentes para calcular el costo de la inversión fija o del producto final (capital de trabajo). Uno de estos componentes es el capital requerido para la adquisición de equipos y los suministros de instalación, denominado como inversión de capital fijo. Por su parte, la cantidad de dinero invertida en materias primas, en gastos

operativos, en gastos administrativos, de distribución o marketing, son descritos como capital de trabajo (Peters y Timmerhaus, 1991). Este tipo de costos permiten analizar el desarrollo y rendimiento de un proceso, mediante el cálculo de puntos de equilibrio, margen de utilidades y tiempos de recuperación de la inversión.

En la actualidad se hace necesario conocer el impacto generado por un proceso productivo, analizando variables como la afección en la salud de las personas, el consumo de recursos (agua y energía) y las emisiones generadas (CO₂, principalmente). Teniendo en cuenta esto, la factibilidad ambiental del proceso de producción de materiales compuestos se puede determinar por medio del uso de algoritmos de reducción de desechos (WAR). Este tipo de metodología puede utilizarse como indicador ambiental, teniendo en cuenta el potencial de impacto estimado según las emisiones generadas y la cantidad de energía consumida por el proceso (Ortiz *et al.*, 2020). Otra de las metodologías utilizadas para analizar el impacto ambiental generado por los procesos industriales es el método GREENSCOPE (Gauging Reaction Effectiveness for the Environmental Sustainability of Chemistries with a multi-Objective Process Evaluator). Este método consiste en el cálculo de indicadores de sostenibilidad, los cuales permiten evaluar el estado de un proceso. Los indicadores se pueden agrupar en cuatro (4) áreas siendo estas eficiencia, energía, economía y medio ambiente. En la categoría medio ambiente se destacan el potencial por calentamiento global, por oxidación fotoquímica (smog), por acidificación atmosférica, por basificación y salinización de aguas, la ecotoxicidad del medio acuático y la eutrofización de aguas (Hernández *et al.*, 2019). Para la estimación de estos indicadores se hace uso de equivalencias, principalmente de CO₂, etileno, formaldehído, fosfatos, sulfatos entre otros compuestos. Este tipo de medidas ofrecen una visión equilibrada del impacto ambiental generado por insumos (recursos y materiales), emisiones, residuos y efluentes, así como los productos y servicios producidos (IChem, 2019). Otro tipo de metodología para la evaluación ambiental de procesos es el análisis de ciclo de vida (LCA), el cual consiste en mapear y evaluar sistemáticamente las cargas energéticas y los impactos ambientales generados a lo largo de la vida de un producto, así como un análisis para determinar los efectos ambientales indirectos (Haylock y Rosentrater, 2018; La Rosa *et al.*, 2021). Es decir que no solo se tienen en cuenta los impactos generados por la producción de un material en particular, sino también los efectos que generan la obtención de materias primas, el transporte de estas y el consumo de recursos o servicios (Rodríguez *et al.*, 2018).

4.3. Métodos experimentales

4.3.1. Simulación en AspenPlus del proceso de extrusión de biocompuestos

La simulación del proceso de extrusión de biocompuestos se realizó empleando el programa Aspen Plus V.8.8, para las mezclas CCa – PPR, SC – PPR, CCa – PEADR y SC - PEADR. Las condiciones de operación que alimentó las simulaciones fueron: i) la composición estructural de la biomasa, ii) la temperatura de secado de la materia prima, iii) el tamaño de partícula entregado por el molino, y iv) la temperatura promedio de trabajo del extrusor. Cabe resaltar que el sistema de extrusión no se encuentra incluido entre las operaciones y los procesos unitarios con los cuales cuenta Aspen Plus. Por lo cual, se empleó un sistema de transporte por bandas buscando simular el movimiento y traslado del material mezclado (refuerzo – matriz). En la Figura 4.1 se muestra el proceso diseñado en Aspen y se explica cada uno de los equipos empleados en la modelación del proceso.

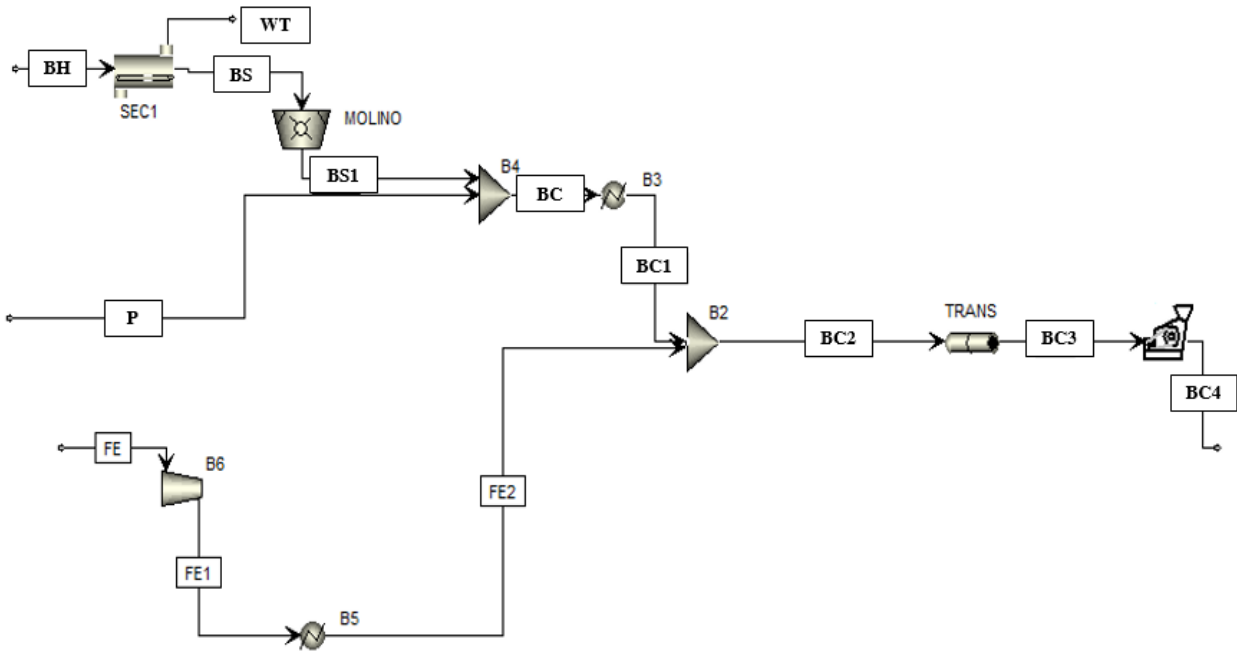


Figura 4. 1. Proceso de extrusión de materiales compuestos simulado en Aspen Plus.

BH: biomasa húmeda, SEC: secador empleado para retirar el agua de las materias primas, WT: agua, P: polímero, FE: fluido empleado para mover el sistema de bandas, BC - BC1 - BC2: Etapa transitoria del biocompuesto a obtener, TRANS: Sistema de bandas de transporte del material compuesto (simulador del tornillo sin fin), BC3: biocompuesto, BC4: biocompuesto reducido en tamaño.

4.3.2. Análisis económico del proceso de extrusión de biocompuestos

El análisis económico del proceso de extrusión se llevó a cabo empleando la metodología propuesta por Peters y Timmerhaus (1991). Dicho método se divide en dos componentes principales: i) el costo de la inversión por capital fijo y ii) el costo del producto final. Para determinar el costo de la inversión por capital fijo, se tuvo en cuenta los parámetros y rangos porcentuales expuestos en la Tabla 4.1. Cabe mencionar que el punto de inicio para emplear estos rangos fue el costo de los equipos a utilizar en el proceso. Para tener en cuenta, los costos de los equipos fueron consultados y cotizados por página web. En la Tabla 4.2 se muestra el precio (US \$) y las características asociadas a los equipos requeridos. Entre estas características se encuentra la capacidad de trabajo (kg/h) y el poder o energía que requiere para su funcionamiento (KW).

Tabla 4. 1. Rango de porcentajes asociados al costo de inversión por capital fijo.

Componentes	Porcentaje asumido (%)
Compra de equipos	15 - 40
Instalación de equipos	6 - 14
Instalación de instrumentación y controles	2 - 8
Instalación de tubería	3 - 20
Instalación eléctrica	2 - 10
Edificios (incluyendo costo de servicios)	3 - 18
Mejoras de terreno	2 - 5
Instalación de servicios	8 - 20
Ingeniería y supervisión	4 - 21
Gastos de construcción	4 - 16
Honorarios de contratistas	2 - 6
Contingencia	5 - 15

Fuente: datos tomados de Peters y Timmerhaus (1991).

Tabla 4. 2. Costo de equipos necesarios para el procesamiento de biocompuestos.

Equipos		
Molino para fibra	Costo (US \$)	1000 - 2000
	Capacidad (kg/h)	1500
	Poder (KW)	18.5 - 22
Extrusor de doble husillo	Costo (US \$)	23000
	Capacidad (kg/h)	80 - 200
	Poder (KW)	110
Molino para plástico	Costo (US \$)	1300
	Capacidad (kg/h)	450 - 600
	Poder (KW)	7.5
Secador industrial de bandejas	Costo (US \$)	2500 - 8500
	Capacidad (kg/h)	60 - 480
	Poder (KW)	0.45 - 1.8

Fuente: consulta online “Twin Screw Extruder Co-Extruder Best” (2021), “VOS supply Wood-Chip-Crusher Wood” (2021), “Silent Plastic Crusher Machine For Crushing” (2021), “Industrial Tray-Dryer Tray-Dryer Price” (2021).

Finalmente el costo de inversión por capital fijo se calcula como la suma de los componentes expuestos en la Tabla 4.1. Este dato será empleado como el punto de partida para estimar el periodo de recuperación de la inversión inicial.

Por su parte, el costo del producto final se estimó teniendo en cuenta componentes como: i) los costos directos de producción (materia prima, requerimientos operativos, supervisión, trabajo de oficina, consumo de agua, energía o vapor, mantenimiento, suministros operativos, cargos de laboratorio), ii) costos por cargos fijos (depreciación, impuestos, seguros), iii) costos sobre la planta, iv) costos administrativos, y v) costos de distribución y marketing. Los costos de materia prima fueron asociados con la inversión realizada en la adquisición del material empleado durante la experimentación. Por su parte, el costo por consumo de servicios fue determinado con base a la facturación generada en el complejo Carvajal Educación, ubicado

en la ciudad de Yumbo, Valle del Cauca. Adicionalmente, se resalta que el costo por personal operativo se estableció teniendo en cuenta el salario mínimo mensual vigente para el año 2020. Por último, el precio de venta de biocompuesto se tomó de los datos reportados por Haylock y Rosentrater (2018). En la Tabla 4.3 se presentan los costos de la materia prima, el consumo de energía, del personal operativo y el precio de venta del material compuesto.

Tabla 4. 3. Costos directos de producción y venta de materiales compuestos.

Costo directos de producción y venta		
Energía	US \$/KW/h	0.16
Operario	US \$/mes	251.43
CCa	US \$/kg	0.15
SC	US \$/kg	0.22
PPR	US \$/kg	0.95
PEADR	US \$/kg	0.70
BC	US \$/kg	1.59

4.3.3. Análisis ambiental del proceso de extrusión de biocompuestos

Para analizar los impactos o efectos ambientales del proceso de fabricación de materiales compuestos, se empleó la metodología propuesta por Ruiz *et al.* (2012) denominada GREENSCOPE (Gauging Reaction Effectiveness for the Environmental Sustainability of Chemistries with a multi-Objective Process Evaluator). Este tipo de método plantea diferentes indicadores que permiten evaluar el impacto ambiental que genera un proceso de fabricación de materiales compuestos. Los indicadores que se ajustaron al proceso y que se evaluaron son los siguientes: i) liberación tóxica específica, ii) potencial de calentamiento global, iii) potencial de oxidación fotoquímica (smog), y iv) ecotoxicidad potencial sobre la vida acuática. Las ecuaciones empleadas para el cálculo de los indicadores antes mencionados se presentan en la Tabla 4.4.

Tabla 4. 4. Indicadores para evaluación de impacto ambiental.

Indicador	Ecuación
Liberación tóxica específica	$TR = MTL/MP$ Ec. 4. 1
Potencial de calentamiento global	$GWP = MTC/MP$ Ec. 4. 2
Potencial de oxidación fotoquímica	$PCOP = MTE/MP$ Ec. 4. 3
Ecotoxicidad potencial sobre la vida acuática	$WP = MTF/MP$ Ec. 4. 4

Donde TR es la liberación tóxica específica (kg/kg), MTL es la masa total de tóxicos (TRI) liberados (kg), MP es la masa del producto (kg), TRI es la cantidad total de tóxicos liberados (kg), GWP es el potencial de calentamiento global (kg/kg), MTC es la masa total de CO₂ equivalente (kg), PCOP es el potencial de oxidación fotoquímica (kg/kg), MTE es la masa total de etileno equivalente, WP es la ecotoxicidad potencial sobre la vida acuática (kg/kg) y MTF es la masa total de formaldehído equivalente (kg).

Paralelo al análisis GREENSCOPE, se realizó una evaluación ambiental adicional empleando la metodología de análisis de ciclo de vida, centrándose en la determinación de la huella de carbono. Este tipo de método se aplica con el fin estimar los efectos ambientales del uso y procesamiento de diferentes materiales (Rodríguez *et al.*, 2018). Para el caso del proceso evaluado, la metodología de huella de carbono

se desarrollo comprendiendo de ante mano que durante la transformación primaria (extrusión) no se empleó agua. Las etapas del ciclo de vida para este parámetro se limitaron a la adquisición, el transporte y el procesamiento de las materias primas (PPR y CCa). Se resalta que el material no se convirtió en producto o disposición final, por lo cual se evaluó una huella de carbono de cuna a puerta empleando como unidad funcional 200 kg/h de material fabricado. Las emisiones CO₂ equivalente se lograron determinar mediante el uso de factores de emisión, los cuales se citan en la Tabla 4.5.

Tabla 4. 5. Factores de emisión asociados al proceso de obtención de materiales compuestos.

Material	Proceso	Factor de emisión
CCa	Producción ^d	0.37 kg CO ₂ / kg
	Molienda ^b	0.17 kg CO ₂ / KW.h
SC	Producción ^a	0.27 kg CO ₂ / kg
	Molienda ^b	0.17 kg CO ₂ / KW.h
PPR	Producción ^c	0.38 kg CO ₂ /kg
PEADR	Producción ^c	0.38 kg CO ₂ /kg
BC	Extrusión - Molienda ^b	0.17 kg CO ₂ / kg

^a Fuente Audsley *et al.* (2010), ^b Unidad de Planeación Minero Energética - UPME (2020), ^c Turner et al. (2015), ^d Mayson y Williams (2021).

4.4. Resultados y discusión

4.4.1. Análisis técnico

La simulación del proceso de extrusión en Aspen Plus, se realizó empleando un flujo de fibra vegetal y polimero de i) 68.11 y 135.18 kg/h para la mezcla CCa - PPR, respectivamente, ii) 69.55 y 138.08 kg/h para la mezcla SC - PPR, correspondientemente, iii) 69.84 y 138.19 kg/h para la mezcla CCa - PEADR, respectivamente, y iv) 70.56 y 139.65 kg/h para la mezcla SC - PEADR, correspondientemente. Estas corrientes se establecieron teniendo en cuenta el flujo másico de salida para un extrusor de doble husillo con una capacidad de procesamiento de 200 kg/h, así como la proporción de agua presente en los biocompuestos. Las variaciones que se presentan en los flujos másicos de alimentación se encuentran asociadas, principalmente, al contenido de humedad de la fibra y la matriz polimérica. Así mismo, para alcanzar la capacidad de procesamiento del extrusor se observó que la mezcla CCa - PPR necesitó entre 2.09 - 3.29% menos materia prima que las demás mezclas. Adicionalmente, se requirió remover una menor cantidad de agua de la mezcla CCa - PPR (3.29 kg/h) en comparación con las otras formulaciones (CCa PEADR: 7.63 kg/h, SC - PPR: 8.03 kg/h, SC - PEADR: 10.21 kg/h). Este comportamiento se traduce en menores costos operativos asociados a la inversión en materia prima y consumo eléctrico por parte del equipo de secado. Cabe resaltar que el agua presente en las fibras vegetales es retirada mediante el uso de un secador industrial en la etapa inicial del proceso, buscando hacer tener las condiciones adecuadas para el procesamiento del material.

Tabla 4. 6. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto CCa – PPR.

Corrientes	Corrientes de entrada		Corrientes de salida	
	Biomasa	Polímero	Biocompuesto	Agua
Temperatura (°C)	24	24	185	105
Presión (Bar)	1	1	17	1
Flujo másico (kg/h)	68.11	135.18	200	3.29
Porcentaje másico (%)				
Celulosa	43.24	-	14.72	-
Hemicelulosa	16.92	-	5.76	-
Lignina	22.42	-	7.63	-
Cenizas	2.38	-	0.81	-
H ₂ O	15.04	0.12	3.56	100
PPR	-	99.88	67.51	-

Tabla 4. 7. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto SC – PPR.

Corrientes	Corrientes de entrada		Corrientes de salida	
	Biomasa	Polímero	Biocompuesto	Agua
Temperatura (°C)	24	24	185	105
Presión (Bar)	1	1	17	1
Flujo másico (kg/h)	69.55	138.08	200	7.63
Porcentaje másico (%)				
Celulosa	43.24	-	15.04	-
Hemicelulosa	16.92	-	5.88	-
Lignina	22.42	-	7.80	-
Cenizas	2.38	-	0.83	-
H ₂ O	15.04	0.15	1.52	100
PEADR	-	99.85	68.94	-

Tabla 4. 8. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto CCa – PEADR.

Corrientes	Corrientes de entrada		Corrientes de salida	
	Biomasa	Polímero	Biocompuesto	Agua
Temperatura (°C)	24	24	185	105
Presión (Bar)	1	1	17	1
Flujo másico (kg/h)	69.84	138.19	200	8.03
Porcentaje másico (%)				
Celulosa	28.10	-	9.82	-
Hemicelulosa	19.74	-	6.90	-
Lignina	32.12	-	11.22	-
Cenizas	4.69	-	1.64	-
H ₂ O	15.35	0.12	1.41	100
PPR	-	99.88	69.01	-

Tabla 4. 9. Balance de masa de la proceso de obtención del biocompuesto SC – PEADR.

Corrientes	Corrientes de entrada		Corrientes de salida	
	Biomasa	Polímero	Biocompuesto	Agua
Temperatura (°C)	24	24	185	105
Presión (Bar)	1	1	17	1
Flujo másico (kg/h)	70.56	139.65	200	10.21
Porcentaje másico (%)				
Celulosa	28.10	-	9.92	-
Hemicelulosa	19.74	-	6.97	-
Lignina	32.12	-	11.34	-
Cenizas	4.69	-	1.66	-
H ₂ O	15.35	0.15	0.40	100
PEADR	-	99.85	69.72	-

4.4.2. Análisis económico

Los resultados de inversión en capital fijo para la fabricación de biocompuestos se presentan en la Tabla 4.10. La mayor proporción en inversión corresponde a la compra de equipos (33.5%), seguido de los costos por instalación de servicios (11.9%), por ingeniería, supervisión y contingencias (9.0%). Por su parte, la menor inversión se encuentra asociada a los costos por mejora de terreno (1.5%), junto con los honorarios presupuestados para pago de contratistas (1.7%). La división de costos se encuentra relacionada con criterios como: i) la estructura física con la cual cuenta el área escogida para desarrollar el proyecto, ii) las instalaciones (red eléctrica, hidráulica, sanitaria) con las cuales cuenta el área en cuestión. Cabe resaltar, que se asume un terreno con infraestructura terminada, construido y que cuente con red eléctrica, hidráulica y sanitaria, haciendo que los costos por adecuación de terreno e instalaciones sean menores.

Tabla 4. 10. Costos de inversión por capital fijo para los biocompuestos.

Inversión por capital fijo			
Componentes	Porcentaje asumido (%)	Costo (US \$)	Porcentaje proporcional (%)
Compra de equipos	30	31300.00	33.5
Instalación de equipos	6	6260.00	6.7
Instalación de instrumentación y controles	4	4173.33	4.5
Instalación de tubería	4	4173.33	4.5
Instalación eléctrica	5	5216.67	5.6
Edificios (incluyendo costo de servicios)	4	4173.33	4.5
Mejoras de terreno	1.3	1356.33	1.5
Instalación de servicios	10.7	11163.67	11.9
Ingeniería y supervisión	8.1	8451.00	9.0
Gastos de construcción	7	7303.33	7.8
Honorarios de contratistas	1.5	1565.00	1.7
Contingencia	8	8346.67	8.9

Por otro lado, en las Tablas 4.11 – 4.14 se presentan los costos del producto final. Para estimarlos se empleó como base de cálculo una (1) tonelada de biocompuesto producido. En los resultados obtenidos, se evidenció que los costos por materia prima contribuyeron en una mayor proporción (43.25 – 50.24%) al costo total de los biocompuestos. Otros componentes como los de mantenimiento y suministros operativos influyeron en menor medida en el precio del producto final (0.74 – 0.87 y 0.11 – 0.13%, respectivamente). Por su parte, los costos por cargos fijos generaron un bajo impacto en el costo de los biocompuestos (0.65 – 0.77%). Esto se debe a la periodicidad de pago (anual) de este tipo de saldos (depreciación, pago de impuestos y seguros). Teniendo en cuenta el grado de influencia y la proporcionalidad de los costos directos de producción, por cargos fijos y otros costos, se determinó que el valor de una tonelada de los biocompuestos se encuentra entre 1237.12 – 1454.90 US \$/Ton. La mezcla que presentó menor costo de producción fue CCa – PEADR, debido principalmente a los bajos costos de adquisición de las materias primas (CCa: 0.15 US \$/kg, PEADR: 0.7 US \$/kg) en comparación con la SC y el PPR (0.22 y 0.95 US \$/kg, respectivamente).

Con base al costo de los biocompuestos (1.24 – 1.45 US \$/kg) y el precio promedio manejado en el mercado (1.59 US \$/kg), se calculó el margen de utilidad. El resultado varió entre 8.50 – 22.2%, generando una utilidad bruta anual entre 70254.37 – 183498.82 US \$ con base a un promedio de producción y de ventas de 520 Ton/año. Así mismo, empleando los costos anuales por cargos fijos (4945.45 US \$), el costo sobre la planta (86638.52 US \$), gastos generales (688855.83 – 80180.28 US \$) y el costo directo por producción (928.58 – 1124.58 US \$/Ton), se calculó el punto de equilibrio. Este valor corresponde a la igualdad entre el costo por cantidad de material producido y el costo por venta del mismo. Siendo así, se determinó que la cantidad de biocompuesto necesaria para alcanzar el punto de equilibrio es de 242.57, 252.43, 350.58 y 369.05 Ton/año para las formulaciones CCa – PEADR, SC – PEADR, CCa – PPR y SC – PPR, respectivamente. Adicionalmente se estimó el tiempo de recuperación de la inversión inicial, empleando los valores de utilidad bruta anual y de inversión por capital fijo. Con base a estos valores se puede afirmar que la inversión inicial se recuperará en un periodo estimado de 0.51, 0.55, 1.1 y 1.3 años para los biocompuestos CCa – PEADR, SC – PEADR, CCa – PPR y SC – PPR, respectivamente.

Tabla 4. 11. Costos del producto final o biocompuesto CCa – PPR.

Costo del producto final		
Costos directos de producción		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Materia prima	710.00	49.60
Requerimientos operativos	232.09	16.21
Supervisión y trabajo de oficina	34.81	2.43
Consumo	91.01	6.36
Mantenimiento	10.79	0.75
Suministros operativos	1.62	0.11
Cargos de laboratorio	23.21	1.62
Costos por cargos fijos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Depreciación	5.02	0.35
Impuestos	3.00	0.21
Seguro	1.50	0.10
Otros costos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Costo sobre la planta	166.61	11.64
Costos administrativos	8.70	0.61
Costos de distribución y marketing	143.15	10.00

Tabla 4. 12. Costos del producto final o biocompuesto SC – PPR.

Costo del producto final		
Costos directos de producción		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Materia prima	731.00	50.24
Requerimientos operativos	232.09	15.95
Supervisión y trabajo de oficina	34.81	2.39
Consumo	91.07	6.26
Mantenimiento	10.79	0.74
Suministros operativos	1.62	0.11
Cargos de laboratorio	23.21	1.60
Costos por cargos fijos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Depreciación	5.02	0.34
Impuestos	3.00	0.21
Seguro	1.50	0.10
Otros costos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Costo sobre la planta	166.61	11.45
Costos administrativos	8.70	0.60
Costos de distribución y marketing	145.49	10.00

Tabla 4. 13. Costos del producto final o biocompuesto CCa – PEADR.

Costo del producto final		
Costos directos de producción		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Materia prima	535.00	43.25
Requerimientos operativos	232.09	18.76
Supervisión y trabajo de oficina	34.81	2.81
Consumo	91.07	7.36
Mantenimiento	10.79	0.87
Suministros operativos	1.62	0.13
Cargos de laboratorio	23.21	1.88
Costos por cargos fijos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Depreciación	5.02	0.41
Impuestos	3.00	0.24
Seguro	1.50	0.12
Otros costos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Costo sobre la planta	166.61	13.47
Costos administrativos	8.70	0.70
Costos de distribución y marketing	123.12	10.00

Tabla 4. 14. Costos del producto final o biocompuesto SC – PEADR.

Costo del producto final		
Costos directos de producción		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Materia prima	556.00	44.11
Requerimientos operativos	232.09	18.41
Supervisión y trabajo de oficina	34.81	2.76
Consumo	91.09	7.23
Mantenimiento	10.79	0.86
Suministros operativos	1.62	0.13
Cargos de laboratorio	23.21	1.84
Costos por cargos fijos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Depreciación	5.02	0.40
Impuestos	3.00	0.24
Seguro	1.50	0.12
Otros costos		
Componente	Costo (US \$/Ton)	Porcentaje proporcional (%)
Costo sobre la planta	166.61	13.22
Costos administrativos	8.70	0.69
Costos de distribución y marketing	126.05	10.00

Rodriguez *et al.* (2018) reportan que los costos de las materias primas son el componente de mayor influencia en el costo final de un material compuesto, coincidiendo con los resultados obtenidos en el análisis económico. En adición mencionan que el incorporar una mayor proporción de fibra y aplicar pretratamientos sobre las mismas, permite reducir el costo del compuesto final. La industria de los biocompuesto es un sector creciente en nuestro país, por lo cual se hace necesario buscar tecnologías y materiales que permitan reducir el costo de fabricación y hacerlos competitivos en el medio local.

4.4.3. Análisis ambiental

En la Tabla 4.15 se presentan los resultados asociados a la emisión de gases, subproducto de la obtención de los biocompuestos. Estos valores se determinaron empleando como base de cálculo una (1) tonelada de PPR y PEADR procesada (Ton PPR – Ton PEADR) y las relaciones expuestas por Barlow *et al.* (1996) y Adams *et al.* (1999). Los compuestos orgánicos volátiles se liberan en mayor cantidad (0.1846 kg/Ton PPR y 0.0457 kg/Ton PEADR) que los ácidos orgánicos, las cetonas y los aldehídos.

Tabla 4. 15. Emisión de gases como subproducto del procesamiento de los polímeros.

Componente	Emisión (Kg/Ton PPR)	Emisión (kg/Ton PEADR)
Ácidos orgánicos	0.0019	0.0004
Cetonas	0.0098	6.9450 E ⁻⁵
Aldehídos	0.0022	0.0001
VOC's	0.1846	0.0457

VOC: Compuestos orgánicos volátiles

Con base a los datos de la Tabla 4.15 se calculó los valores de CO₂, etileno y formaldehído equivalentes, usando la metodología reportada por IChem (2019). A su vez, estos datos fueron utilizados en la determinación de los indicadores de liberación tóxica específica, potencial de calentamiento global, potencial de oxidación fotoquímica y ecotoxicidad potencial para la vida acuática (Tabla 4.16). Se puede observar que el proceso de producción de los biocompuestos no genera un riesgo potencial en la generación de smog fotoquímico (PCOP) y un bajo impacto en la ecotoxicidad de organismos acuáticos (WP), ya que los valores son aproximadamente igual a cero (0) y coinciden con los parámetros de sostenibilidad establecidos por Ruiz *et al.* (2012) (PCOP y WP = 0, mejor objetivo). El mayor riesgo se encuentra asociado con el potencial de calentamiento global (GWP) y en menor medida a la liberación tóxica específica (TR). Esta última relaciona la cantidad emitida de compuestos contaminantes con la cantidad de biocompuesto procesado. Por su parte, el potencial de calentamiento global relaciona el CO₂ equivalente con la masa total de los biocompuestos procesados.

Tabla 4. 16. Indicadores ambientales asociados al proceso de obtención de materiales compuestos.

Indicador	Indicadores ambientales			
	Valor (CCa-PPR)	Valor (SC-PPR)	Valor (CCa-PEADR)	Valor (SC-PEADR)
TR (kg/kg)	0.00013	0.00014	0.00010	0.00009
GWP (kg/kg)	0.00137	0.00140	0.00053	0.00053
PCOP (kg/kg)	2.77 E ⁻⁶	2.83 E ⁻⁶	1.00 E ⁻⁷	1.00 E ⁻⁷
WP (kg/kg)	5.00 E ⁻⁷	3.18 E ⁻⁷	4.10 E ⁻⁸	4.20 E ⁻⁸

Donde TR es la liberación tóxica específica, GWP es el potencial de calentamiento global, PCOP es el potencial de oxidación fotoquímica, WP es la ecotoxicidad potencial sobre la vida acuática.

Por otro lado, los costos de fabricación de los biocompuestos deben de compararse con los impactos ambientales asociados a estos. En la Tabla 4.17 se exponen los resultados obtenidos para la huella de carbono de los biocompuestos, evidenciándose un mayor valor para la formulación CCa – PEADR (487.6 CO₂). Este comportamiento se debe principalmente a la cantidad de emisiones de CO₂ liberadas durante el kg proceso de producción o generación de las materias primas (CCa y PEADR). Dichas emisiones fueron mayores entre 2.54 – 37.61% en comparación con los otros biocompuestos. Así mismo, cabe resaltar que el consumo de energía eléctrica fue el parámetro que menor influencia tuvo para el cálculo de la huella de carbono, con valores entre 95.78 – 95.86 kg CO₂. El consumo de combustibles fósiles relacionados con el transporte de la materia prima y el producto terminado no fue tenido en cuenta en los cálculos, ya que el control sobre los consumos y las rutas utilizadas para el desplazamiento de los vehículos son muy variables. Rodríguez *et al.* (2018) mencionan que la incorporación de fibra vegetal en una matriz polimérica, disminuye el impacto sobre los componentes ambientales de los ecosistemas, resaltando la calidad del aire como un constituyente principal. Así mismo, este parámetro se relaciona de forma directa con las cargas contaminantes emitidas.

Tabla 4. 17. Huella de carbono asociada al proceso de obtención de los biocompuestos.

Biocompuesto	Huella de Carbono (kg CO₂)
CCa - PPR	478.63
SC - PPR	452.08
CCa- PEADR	487.60
SC - PEADR	456.45

4.5. Conclusiones

Con base a los resultados obtenidos del análisis técnico – económico y ambiental para los biocompuestos, se puede concluir que la formulación CCa – PEADR presentó el menor costo de producción con un valor 1237.12 US \$/Ton. Este resultado se debe principalmente a los bajos costos de adquisición de las materias primas (CCa: 0.15 US \$/kg, PEADR: 0.7 US \$/kg). Así mismo, el costo total de los biocompuesto se ve influenciado en mayor medida por el valor de las materias primas (43.25 – 50.24% del costo final de los biocompuestos). Con la producción de este tipo de biocompuestos se espera tener un margen de ganancia entre 8.50 – 22.2%, siendo la mezcla CCa – PEADR la mas viable económicamente (22.2%). Adicional a esto, la formulación CCa – PEADR presentó el punto de equilibrio mas bajo con 242.57 toneladas de material producido por año y un periodo de recuperación de la inversión inicial de 0.51 años. Por otro lado, se encontró que el proceso productivo tiene un impacto ambiental bajo, el cual se relaciona principalmente con el potencial de calentamiento global. Por su parte, los resultados de huella de carbono se ven influenciados en mayor proporción por las emisiones de CO₂ liberadas durante la producción de las materias primas.

4.6. Referencias

Adams K., Bankston J., Barlow A., Holdren M. W., Meyer J. and Marchesani J. (1999). Development of emission factors for polypropylene processing. *Journal of the air and waste management association*. 49 (1), 49 – 56. Doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.1999.10463782>.

Audsley E., Brander M., Chatterton J., Murphy-Bokern D., Webster C. and Williams A. G. (2010). An assessment of greenhouse gas emissions from the UK food system and the scope for reduction by 2050: how low can we go. Godalming, UK: WWF UK and Food Climate Research Network.

Barlow A., Contos D. A., Holdren M. W., Garrison P. J., Harris L. R. and Janke B. (1996). Development of Emission Factors for Polyethylene Processing. *Journal of the Air & Waste Management Association*. 46 (6), 569 – 580. Doi: <https://doi.org/10.1080/10473289.1996.10467493>.

Briassoulis D., Pikasi A. and Hiskakis M. (2021). Recirculation potential of post-consumer /industrial bio-based plastics through mechanical recycling - Techno-economic sustainability criteria and indicators. *Polymer Degradation and Stability*. 183, 109217. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polyimdegradstab.2020.109217>.

Cubeddu A., Rauh C. and Delgado A. (2014). 3D thermo-fluid dynamic simulations of high-speed-extruded starch based products. *Open Journal of Luid Dynamics*. 4, 103 – 114.

Haylock R. and Rosentrater K. A. (2018). Cradle-to-Grave Life Cycle Assessment and Techno-Economic Analysis of Polylactic Acid Composites with Traditional and BioBased Fillers. *Journal of Polymers and the Environment*. 26, 1484 – 1503. Doi: [10.1007/s10924-017-1041-2](https://doi.org/10.1007/s10924-017-1041-2).

Hernandez J. D., Hernandez H. F. and Ocampo L. M. (2019). A holistic framework for assessing hot-dip galvanizing process sustainability. *Journal of Cleaner Production*. 206, 755 – 766. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.177>.

Industrial Tray-Dryer Tray-Dryer Price. (2021, Junio). Recuperado de https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Tray-Dryer-Tray-Dryer-Price_60429893034.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.73942e70Bwu6tV&s=p.

Institution of Chemical Engineers (IChem). (2019). Sustainable development progress metrics. Disponible en: http://nbis.org/nbisresources/metrics/triple_bottom_line_indicators_process_industries.pdf

Juárez D., Balart R., Peydró M. A. and Errandiz S. (2012). Estudio y análisis del moldeo por inyección de materiales poliméricos termoplásticos. *Revista de Investigación*.

La Rosa A. D., Greco S., Tosto C. and Cicala G. (2021). LCA and LCC of a chemical recycling process of waste CF-thermoset composites for the production of novel CF-thermoplastic composites. Open loop and closed loop scenarios. *Journal of Cleaner Production*. 304, 127158. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127158>.

Mayson S. and Williams I. D. (2021). Applying a circular economy approach to valorize spent coffee grounds. *Resources, Conservation & Recycling*. 172, 105659. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105659>.

Ortiz M., Solarte J. C., González J. A., Peltonen K. E., Richard P. and Cardona C. A. (2020). Pre-feasibility analysis of the production of mucic acid from orange peel waste under the biorefinery concept. *Biochemical Engineering Journal*. 161, 107680. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.bej.2020.107680>.

Peters M. S. and Timmerhaus K. D (Cuarta Edición). (1991). *Plant design and economics for chemical engineers international edition*. Singapur: McGraw – Hill Book Co.

Prashanth S. R., Arumugama S. K., Gangradey R., Mukherjee S., Kasthuriengan S., Behera U., Pabbineedi G. and Ma M. (2019). CFD modelling and performance analysis of a twin screw hydrogen extruder. *Fusion Engineering and Design*. 138, 151 – 158. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.11.014>.

Rodriguez L. J., Orrego C. E., Ribeiro I. and Peças, P. (2018). Life-Cycle Assessment and Life-Cycle Cost study of Banana (*Musa sapientum*) fiber Biocomposite materials. *Procedia*. 69, 585 – 590.

Ruiz G. J., Smith R. L. and Gonzalez M. A. (2012). Sustainability indicators for chemical processes: I. Taxonomy. *Industrial and engineering chemistry research*. 51, 2309 – 2328.

Silent Plastic Crusher Machine For Crushing. (2021, Junio). Recuperado de https://www.alibaba.com/product-detail/Silent-Plastic-Crusher-Machine-For-Crushing_62477498542.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.da586350AZQDBy.

Šupić A., Bečirović A., Obućina A. and Zrilić M. (2018). Modeling and Simulation for Aluminium Profile Extrusion. *Procedia Structural Integrity*. 13, 2077 – 2082. Doi: 10.1016/j.prostr.2018.12.205.

Szabó F., Suplicz A. and Kovács J. G. (2021). Development of injection molding simulation algorithms that take into account segregation. *Powder Technology*. 389, 368 – 375. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.05.053>.

Turner D. A., Williams I. D. and Kemp S. (2015). Greenhouse gas emission factors for recycling of source-segregated waste materials. *Resources, Conservation & Recycling*. 105(Part A), 186-197.

Twin Screw Extruder Co-Extruder Best. (2021, Junio). Recuperado de https://www.alibaba.com/product-detail/Twin-Screw-Extruder-Co-Extruder-Best_62403216739.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.3e2d6f412soB5U&s=p.

Unidad de Planeación Minero Energética - UPME. (2020). Resolución 385 de 2020. Bogotá, Colombia.

VOS supply Wood Chip-Crusher Wood. (2021, Junio). Recueprado de https://www.alibaba.com/product-detail/VOS-supply-Wood-Chip-Crusher-Wood_60699952219.html?spm=a2700.details.0.0.1e1175e37wvvQx.

CONCLUSIONES

- El CCa es el refuerzo lignocelulósico que mejor se comportó durante el procesamiento de biocompuestos, debido a la presencia de una mayor proporción de materia volátil y celulosa. Estas características influyeron en un grado de idoneidad y compatibilidad más alto con el PPR y PEADR, presentándose una mejor interacción fibra/matriz en los centros reactivos de alta polaridad (grupos hidroxilo) del material vegetativo. Así mismo, el CCa presentó un contenido de humedad y cenizas bajo, resultados que incidieron en la capacidad de dispersión de las fibras en la extrusión de materiales compuestos.
- La cantidad de fibra empleada para reforzar una matriz polimérica genera aumentos en los módulos de tracción y flexión. Este comportamiento se logró apreciar en los materiales reforzados con cisco de café y estopa de coco, presentándose mejores resultados para el CCa. Se pudo apreciar que los materiales reforzados con CCa mostraron mejores resultados debido a una mayor cantidad de sitios polares de reacción (grupos hidroxilos), las cuales son áreas que se relacionan con la cantidad de celulosa y oxígeno contenido en la fibra. Por otro lado, la adición de una mayor carga reforzante produjo una disminución en la resistencia a la tracción como consecuencia de la pobre interacción fibra/matriz.
- La incorporación de MAPP en BC4 aumentó la resistencia a la tracción y flexión del biocompuesto, como consecuencia de una mejor interacción entre la fibra y el polímero. Lo anterior es propiciado por la acción del agente de acoplamiento al reaccionar con el material de refuerzo.
- Los biocompuestos reforzados con CCa presentaron un mayor grado de densificación, comportamiento relacionado con la carga de biomasa incorporada y el contenido de humedad. De igual forma, las matrices reforzadas con CCa presentaron un mayor grado de retención de agua, parámetro asociado directamente con el contenido de fibra adicionada y su composición estructural (hemicelulosa, celulosa y lignina).
- El contenido de lignina influyó positivamente en la estabilidad de las propiedades de flexión de los biocompuestos reforzados con SC sometidos a condiciones de envejecimiento acelerado. Por el contrario, las propiedades de tracción disminuyeron en todos los biocompuestos como consecuencia del debilitamiento de la interfaz matriz – refuerzo y el grado de fragilidad adquirido por acción de las condiciones adversas a las cuales fueron expuestos.
- El biocompuesto con mayor estabilidad térmica fue BC6 (Matriz: PPR, Refuerzo: SC, Concentración de fibra: 30%, Tamaño de partícula: 0.042 – 0.074 mm), ya que presentó los mayores aumentos en la temperatura de degradación y de cristalización. Cabe resaltar que las propiedades térmicas de los biocompuestos se vieron afectadas por la incorporación, la dispersión y la composición estructural de la fibra vegetal.
- La formulación CCa – PEADR presentó la mayor viabilidad económica. El costo total del biocompuesto se ve influenciado en mayor proporción por el valor de las materias primas. Con base a esto y según el precio de venta de los biocompuestos, se estimó el margen de ganancia del 22.2%, con un punto de equilibrio de 242.57 Ton/año y un periodo de recuperación de la inversión inicial de 0.51 años.
- El proceso de fabricación de los biocompuestos presenta un impacto ambiental bajo, asociado principalmente con el potencial de calentamiento global.

RECOMENDACIONES

- Realizar pretratamiento a las fibras vegetales (básico, ácido, biológico), buscando mejorar la interacción con el matriz polimérica.
- Utilizar otro tipo de agente ligante, con el fin de mejorar las propiedades del material compuesto procesado. En lo posible buscar elementos acoplantes diferentes al anhídrido maleico, ya que este presenta características que pueden afectar significativamente la salud de las personas que lo manipulen.
- Efectuar una medición de gases durante el proceso de extrusión de biocompuestos. Lo anterior se propone con la finalidad de tener medidas directas de los componentes emitidos durante el tratamiento de polímeros.
- Realizar un análisis de ciclo de vida completo del producto, bajo estándares y normas nacionales e internacionales. Esta actividad se plantea con el fin de conocer los impactos asociados a la huella de carbono del proceso de obtención de materiales compuestos.
- Analizar los biocompuestos obtenidos bajo la metodología SEM. La propuesta se realiza para conocer de forma más clara y puntual, el grado de interacción y unión existente entre el refuerzo y la matriz.
- La prueba de envejecimiento acelerado se debe de realizar empleando un equipo con acción ultravioleta (UV), ya que este tipo de parámetro impacta significativamente las propiedades de los materiales compuestos procesados.
- Los materiales compuestos obtenidos se deben de probar con base a aplicaciones reales y prácticas, buscando evaluar su comportamiento bajo condiciones y requerimientos establecidos por el cliente.

PUBLICACIONES

Publicaciones en revistas

- Rojas – González A. F., Flórez – Montes C. and López – Rodríguez D. F. (2019). Prospectivas de aprovechamiento de algunos residuos agroindustriales. *Revista Cuabana de Química*. 31 (1), 31 – 52. ISSN: 2224 – 5421.
- López D. and Rojas A. (2018). Factores que influncian las propiedades mecánicas, físicas y térmicas de materiales compuestos madero plásticos. *Entre Ciencia e Ingeniería*. 12 (23), 93 – 102. Doi: <https://doi.org/10.31908/19098367.3708>.

Publicaciones en eventos científicos

- López D. and Rojas A. (2017). Identificación y caracterización de residuos sólidos agroindustriales para establecer su potencial aproechamiento energético. V Jornada Técnica de Ingeniería Química e Ingeniería Biológica – PROCESA. Medellín, Marzo 13 al 17.

Publicaciones en capítulos de libro

- Hidalgo – Salazar M. A., Correa – Aguirre J. P., Montalvo – Navarrete J. M., López – Rodríguez D. F. and Rojas – González A. F. Chapter 1: Recycled polypropylene – coffee husk and coir coconut biocomposites: morphological, mechanical, termal and environmental studies. *Polymer recycling*. Editorial Intech Open. Pages 1 – 26. Doi: 10.5772/intechopen.81635.