

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AGROINDUSTRIA

**CARACTERIZACIÓN DE BIO-COMPOSITES DE MATRIZ
POLIMÉRICA FORMADA POR ACETATO DE POLIVINILO/HARINA
DE HABA Y REFORZADOS CON RESIDUOS
LIGNOCELULÓSICOS**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA A TRACCIÓN Y POR FTIR DE
BIO-COMPOSITES ELABORADOS A PARTIR DE UNA MATRIZ
CONFORMADA POR ACETATO DE POLIVINILO/HARINA DE
HABA Y REFORZADOS CON FIBRAS DE RAQUIS Y CUESCO DE
PALMA (*Elaeis guineensis Jacq.*)**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AGROINDUSTRIAL**

FRANKLIN FERNANDO PAREDES GARCÍA

franklin.paredes@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ, M.Sc.

vladimir.valle@epn.edu.ec

DMQ, febrero de 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Franklin Fernando Paredes García declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

FRANKLIN FERNANDO PAREDES GARCÍA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Franklin Fernando Paredes García, bajo mi supervisión.

LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

FRANKLIN FERNANDO PAREDES GARCÍA

LAURO VLADIMIR VALLE ÁLVAREZ

DEDICATORIA

Todo este trabajo se lo dedico a mi madre, que con su apoyo y su amor siempre me ha dado la fuerza para continuar adelante, y me motiva a superarme y a proponerme nuevos objetivos día tras día.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco a Dios por haberme dado la oportunidad de seguir luchando por mis objetivos y mis aspiraciones con cada día de vida que me da.

Le agradezco a mi madre, Elva España García Guerrero por todo el amor que me ha dado desde el día que nací, por ser un ejemplo de superación constante y una muestra de cariño que me impulsa a ser mejor. Le agradezco a mi padre, Franklin Medardo Paredes Aldás, por haber sembrado en mi el deseo de superación, y la curiosidad que me ha impulsado a conocer el mundo que me rodea.

A mi tutor, Ing. Vladimir Valle, M.Sc, por su guía durante la realización de este trabajo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT.....	VII
1.1 Objetivo general.....	2
1.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcance	3
1.4 Marco teórico	3
2 METODOLOGÍA.....	11
2.1 Materiales	11
2.2 Preparación del bio-composite.....	11
2.3 Caracterización del bio-composite	14
2.3.1 Propiedades mecánicas del bio-composite.....	14
2.3.2 Análisis de Espectroscopía FTIR	16
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	17
3.1 Resultados y Discusión.....	17
3.1.1 Elección de las condiciones idóneas de procesamiento del bio-composite	17
3.1.2 Caracterización mecánica de los bio-composites	24
3.1.3 Caracterización del bio-composite mediante espectroscopía ATR-FTIR	30
3.2 Conclusiones	35
3.3 Recomendaciones	36
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
5 ANEXOS	44
ANEXO I. PROPIEDADES MECÁNICAS EVALUADAS PARA LOS 2 TIPOS DE BIO-COMPOSITES ELABORADOS	44

RESUMEN

La búsqueda de soluciones para la gestión responsable de residuos de la agroindustria ha motivado al ser humano en la investigación y desarrollo de los bio-composites reforzados con materiales lignocelulósicos.

En este trabajo se buscó aprovechar las fibras de raquis y cuesco de palma como materiales de refuerzo de bio-composites de matriz polimérica termoplástica. Se evaluó a través del ensayo mecánico de tracción el efecto que la proporción de fibra de raquis y cuesco de palma presentes en el refuerzo tiene sobre las propiedades mecánicas de porcentaje de elongación a la rotura, módulo de elasticidad, resistencia a la tracción y tenacidad del bio-composite, así como también su efecto en los espectros infrarrojos obtenidos mediante espectroscopía de infrarrojos por transformada de Fourier (FT-IR). Las proporciones de fibra/cuesco de palma que se estudiaron fueron 10:90 y 20:80.

El bio-composite se elaboró mediante la técnica de moldeo por compresión, a una temperatura de procesamiento de 130 °C y con una fibra de tamaño malla 45-50. Se encontró que el incremento en la proporción de fibra en el refuerzo produce un aumento de la rigidez del bio-composite. Así mismo, se observó que al adicionar una mayor cantidad de fibra en el composite se favorece la interacción entre los componentes del refuerzo y la matriz, ya que se propicia la formación de enlaces de hidrógeno, lo cual provoca el aumento de la intensidad de las bandas de absorción de este tipo de enlaces.

PALABRAS CLAVE: bio-composite, materiales lignocelulósicos, cuesco y raquis de palma, espectroscopía, esfuerzo, deformación.

ABSTRACT

The search for solutions for the responsible management of agroindustry waste has motivated humans to research and develop bio-composites reinforced with lignocellulosic materials.

In this work, we sought to take advantage of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) fiber and oil palm kernel shell (PKS) as reinforcing materials for thermoplastic polymeric matrix bio-composites. The effect that the proportion of OPEFB and PKS in the reinforcement has on the mechanical properties of percentage of elongation at break, elastic modulus, tensile strength, and tenacity of the bio-composite was evaluated through mechanical tensile testing, as well as its effect on the infrared spectra obtained by Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR). The OPEFB/PKS proportions that were studied were 10:90 and 20:80.

The bio-composite was produced using the compression molding technique, at a processing temperature of 130 °C and with a 45-50 mesh size fiber. It was found that the increase in the proportion of fiber in the reinforcement produces an increase in the stiffness of the bio-composite. Likewise, it will be observed that adding a greater amount of fiber to the composite favors the interaction between the reinforcement components and the matrix, since it promotes the formation of hydrogen bonds, which causes an increase in the intensity of the absorption bands of this type of bonds.

KEYWORDS: bio-composite, lignocellulosic materials, palm kernel and rachis, spectroscopy, stress, deformation.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es una planta perenne originaria de la región occidental de la zona ecuatorial de África, y cuyo cultivo se ha difundido en la actualidad a regiones tan distantes como Asia y América debido a la importancia de los aceites que se extraen de sus frutos. Estos aceites son ampliamente utilizados en la industria alimenticia, ya sea como componente de otros alimentos, en el caso de la panadería y confitería, o utilizados directamente con fines gastronómicos (Gesteiro et al., 2019), así mismo la industria oleoquímica los aprovecha como materia prima para la generación de importantes derivados como son los ésteres de alcohol y los ácidos grasos sencillos mediante la hidrólisis de los aceites (Lai et al., 2012).

En el año 2023 se produjeron en el mundo aproximadamente 79,5 millones de toneladas métricas de aceite de palma, siendo Indonesia, Malasia y Tailandia, los responsables de aproximadamente el 87 % de la producción, mientras que Colombia, Guatemala, Honduras, Brasil y Ecuador generaron el 6 % (USDA, 2024). En el caso de Ecuador, en el año 2022 se alcanzó un pico de producción de 2.3 millones de toneladas métricas de palma africana fresca, siendo las provincias de Los Ríos y Esmeraldas las principales zonas productoras del país, cubriendo el 62 % de la producción de ese año (CFN, 2023).

Sin embargo, la industria de producción de aceite de palma también es la responsable de fomentar la tala indiscriminada de bosques nativos para su conversión en plantaciones de palma, así como también contribuye a la generación de importantes residuos de naturaleza biológica, ya que se estima que solamente el 10 % de la biomasa total generada en las plantaciones de palma africana se convierte en aceite comestible, mientras que el otro 90% se elimina como desecho (Zahan & Kano, 2018). Ejemplo de ello son el raquis y cuesco de palma que son desechos sólidos generados a partir de la extracción mecánica de aceite de palma y palmiste, los cuales tienen un contenido rico en celulosa, hemicelulosa, y lignina, y en menor medida ceras, pectinas, y otros azúcares (Mahlia et al., 2019).

En consecuencia, se ha explorado la posibilidad de utilizar el cuesco y raquis de palma como agentes de refuerzo en la fabricación de bio-composites, ya que se busca aprovechar su composición lignocelulósica, su carácter biodegradable y su bajo peso específico para generar materiales compuestos sostenibles con propiedades mecánicas mejoradas, a la vez que su incorporación contribuye a disminuir los efectos ambientales negativos originados a raíz de una mala disposición de estos residuos sólidos (Jawaid et al., 2017).

Por otro lado, junto con el refuerzo, la matriz juega un papel crucial en las propiedades finales del bio-composite, por lo que se ha estudiado el uso de distintas matrices, de las

cuales se han destacado las matrices de base polimérica, especialmente los polímeros termoplásticos, ya que estos polímeros ofrecen ventajas como son el mejorar la rentabilidad y versatilidad del diseño del bio-composite, poseen resistencia a la corrosión, además de que pueden ser reprocesados, lo que facilita su reciclaje (Awais et al., 2021).

Así mismo con el objetivo de aumentar la bio-degradabilidad y mejorar la sostenibilidad de la producción de los bio-composites, se ha utilizado el almidón como complemento de las matrices poliméricas, ya que se busca aprovechar la polaridad de sus grupos funcionales y su capacidad de formar puentes de hidrógeno con otros polímeros para crear matrices más ecológicas (Thomas et al., 2013).

Para encontrar la mejor aplicación de los bio-composites es necesario determinar sus propiedades mecánicas, tales como son la resistencia a la tracción, módulo de Young, elongación a la rotura y tenacidad, ya que a través de estas propiedades se puede conocer la respuesta estructural del material al ser sometido a un esfuerzo externo, y en base a esa respuesta validar o no su idoneidad para una aplicación particular (Benkhelladi et al., 2020).

De la misma manera, también es relevante la caracterización de bio-composites por espectroscopía infrarroja por transformadas de Fourier (FT-IR), puesto que se consigue evaluar la composición molecular y la interacción entre componentes del bio-composite, lo que permite analizar la efectividad de la incorporación de refuerzos biológicos y la compatibilidad entre matriz y refuerzo (Baillie & Jayasinghe, 2017).

1.1 Objetivo general

Caracterizar materiales compuestos de matriz biodegradable y refuerzos lignocelulósicos, a través de ensayos mecánicos de tracción y espectroscopía FT-IR.

1.2 Objetivos específicos

1. Elaborar bio-composites a partir de raquis y cuesco de palma como material de refuerzo, glicerol como agente plastificante y una mezcla de harina de haba y acetato de polivinilo como matriz.
2. Analizar el efecto de la incorporación de distintas proporciones de raquis y cuesco de palma en el comportamiento mecánico de los composites elaborados.
3. Analizar el efecto de la incorporación de distintas proporciones de raquis y cuesco de palma sobre la caracterización FT-IR de los composites elaborados.

1.3 Alcance

El alcance del proyecto incluye la búsqueda, lectura y análisis de información bibliográfica vinculada al tema propuesto del proyecto, además de la elaboración de bio-composites que cuenten con la composición detallada a continuación. Se va a usar una matriz polimérica compuesta por harina de haba y acetato de polivinilo en una proporción de 20:80, la matriz constituye el 35% del material, el glicerol, que es el agente plastificante, un 25 % y el refuerzo, que está formado por fibra de raquis y cuesco de palma, el 40 % restante. En el refuerzo se utilizarán distintas proporciones de raquis y cuesco, ya que se prepararán bio-composites con un refuerzo formado por fibra y cuesco en una proporción de 10:90 y 20:80.

Los bio-composites se caracterizarán mediante pruebas mecánicas de tracción y espectroscopía FT-IR. Se analizarán los resultados de estas pruebas para identificar cómo afecta la variación en la proporción de los componentes del refuerzo a las propiedades finales de los bio-composites.

1.4 Marco teórico

En la actualidad una de las prioridades del ser humano es mitigar el impacto ambiental negativo generado a raíz de sus actividades, especialmente aquellas ligadas a la producción de bienes y servicios. En consecuencia, la labor de investigación se ha concentrado en la búsqueda de alternativas para poder seguir generando productos de consumo masivo, pero de una forma más ecológica y sostenible (Inamuddin & Tariq Altalhi, 2022). En este contexto aparece la ingeniería de materiales como un campo de investigación crucial para abordar los desafíos de la problemática ambiental presente, especialmente aquellos generados a raíz del uso y producción de plásticos convencionales, tales como el polipropileno, polietileno de alta y baja densidad y tereftalato de polietileno, entre otros que tienen origen petroquímico y que se caracterizan por no ser biodegradables (Rieger et al., 2012). Este tipo de materiales representan un problema que ha crecido a un ritmo acelerado e ininterrumpido desde la aparición del primer plástico sintético, la baquelita a inicios del siglo XIX, ya que son materiales altamente duraderos y persistentes en la naturaleza, lo que sumado al hecho de que se producen en grandes volúmenes por su uso generalizado en envases, embalajes y productos desechables, provoca que se acumulen en la naturaleza y generen daños severos en el equilibrio y bienestar de los ecosistemas marinos y terrestres, y también en última instancia en la salud del ser humano (Ncube et al., 2020). Por lo tanto, es crucial la investigación y desarrollo de materiales alternativos que reemplacen a los materiales convencionales y que permitan la preservación del entorno y un desarrollo sustentable.

Una potencial solución que se ha propuesto frente a este escenario son los bio-composites. La ingeniería de materiales los define como un tipo de material compuesto y bio-basado, ya que en su estructura presentan dos fases, una fase continua que sería la matriz polimérica y una fase dispersa, el refuerzo. Además, incorporan componentes biológicos en su composición, los cuales pueden formar parte de la matriz, ya sea parcial o totalmente, o desempeñar roles como agentes de refuerzo, e inclusive pueden ser un constituyente tanto de la matriz como del refuerzo (Thomas et al., 2013).

La matriz polimérica es la base estructural del bio-composite, ya que aporta cohesión y forma al material. Tradicionalmente, se utilizan matrices formadas a partir de polímeros termoestables como las resinas de poliéster o resinas epoxi, o polímeros termoplásticos como el polietileno y polipropileno (Krishnasamy et al., 2021). Además de su función estructural, la matriz también protege y mantiene unido el material reforzante, y se encarga de distribuir las tensiones aplicadas en el material hacia el refuerzo, lo que permite generar una acción sinérgica entre ambas fase y conseguir materiales con propiedades mecánicas mejoradas en comparación a las de los componentes actuando de forma individual (Inamuddin & Tariq Altalhi, 2022).

Por otro lado, los refuerzos cumplen la función de proporcionar resistencia mecánica, rigidez y otras propiedades mecánicas al bio-composite, ya que las fibras soportan gran parte de la carga aplicada en el material, debido a que en la mayoría de los casos, con relación a la matriz polimérica, los refuerzos poseen una resistencia mecánica superior, y son capaces de absorber y distribuir de forma eficiente las cargas aplicadas, contribuyendo así a mejorar las propiedades mecánicas globales (Misra et al., 2015).

Sin embargo, es importante destacar que la mejora en las propiedades del bio-composite está condicionada por la compatibilidad entre la matriz y el refuerzo, ya que cuando existe incompatibilidad, las interacciones matriz-refuerzo resultan deficientes y escasas, lo que provoca una transferencia ineficiente de las tensiones desde la matriz hacia el refuerzo. Este escenario conlleva a una concentración de tensiones en la matriz, lo que provoca su deformación y una pérdida de la acción sinérgica deseada (Krishnasamy et al., 2021).

En la fabricación de bio-composites, los refuerzos que más destacan por su popularidad son las fibras vegetales, las cuales son materiales lignocelulósicos, que en algunos casos tienen la ventaja de que se pueden encontrar en grandes cantidades por ser residuos del sector agroindustrial, tal es el caso del raquis y cuesco de palma que son subproductos de la industria de aceite de palma (Misra et al., 2015) . Normalmente se suelen utilizar fibras vegetales provenientes de distintas partes de una planta, tales como el tallo, el fruto, las

hojas, y semillas. Este tipo de fibras se caracterizan por tener una composición rica en celulosa y hemicelulosa, polisacáridos que ejercen como elemento estructural, pectinas, minerales, ceras y lignina. Su uso presenta ventajas como son el ser asequibles económicamente, presentan una baja densidad y propiedades mecánicas sobresalientes, y en relación con las fibras petroquímicas son materiales renovables y biodegradables (Thomas et al., 2013).

En el Ecuador, el uso de fibras vegetales obtenidas de los residuos de la industria de palma representa una oportunidad estratégica para mejorar la sostenibilidad de esta industria, la que actualmente se encuentra bien establecida y que año tras año genera un elevado volumen de subproductos, los cuales constituyen una problemática ambiental debido a su acumulación en rellenos sanitarios o apilados en la intemperie. Esta disposición irresponsable conlleva a la generación de lixiviados que afectan a las reservas hídricas, además de que al ser quemados como combustible liberan gases de efecto invernadero (Lam et al, 2019). Se estima que la industria del aceite de palma en Ecuador produce aproximadamente 6,87 millones de toneladas de residuos sólidos anuales (Calderón et al., 2017), de los cuales, el 22 % corresponde a raquis y el 6 % a cuesco de palma (Fedepalma, 2007).

La incorporación de estos residuos como refuerzo de bio-composites no solo permite su revalorización, sino que también posibilita la fabricación de un material compuesto con un mayor grado de biodegradabilidad. Adicionalmente, desde el punto de vista energético, la inclusión de subproductos agroindustriales en materiales compuestos significa un doble beneficio, el ahorro de recursos energéticos y la consecuente reducción en la huella de carbono, ya que la preparación y obtención de los subproductos para su inclusión en matrices poliméricas requieren una menor cantidad de energía y emiten una menor cantidad de gases de efecto invernadero en comparación con el uso de refuerzos tradicionales como por ejemplo la fibra de vidrio, fibra de carbono y aramidas (Baillie & Jayasinghe, 2017).

Una barrera que se presenta al momento de incorporar fibras lignocelulósicas en materiales compuestos es el efecto que su inclusión tendrá en las propiedades mecánicas del producto final, ya que para que su aplicación sea viable a largo plazo, es necesario que sus propiedades sean similares o superiores a las de los materiales convencionales (Inamuddin & Tariq Altalhi, 2022). Las propiedades mecánicas del bio-composite están intrínsecamente ligadas a la compleja interacción entre el bio-refuerzo y la matriz, por lo que conseguir una mejora en estas propiedades se dificulta cuando se utilizan polímeros sintéticos como matriz y fibras vegetales como refuerzo, dado que presentan una

naturaleza química antagónica, puesto que el polímero exhibe un comportamiento hidrofóbico, mientras que las fibras son hidrofílicas (Sapuan et al., 2018). Esta incompatibilidad química demanda de un enfoque riguroso en la selección de materiales para garantizar una integración efectiva en el bio-composite.

La interacción bio-refuerzo/matriz se ve influenciada por diversos factores, como la uniformidad de las fibras y su orientación en la matriz, el tamaño y forma de las fibras, así como también las técnicas de procesamiento aplicadas en la formación del bio-composite (Inamuddin & Tariq Altalhi, 2022). Por lo tanto, estos aspectos deben ser cuidadosamente gestionados para lograr una distribución homogénea de las fibras y maximizar la transferencia de carga entre la matriz y el refuerzo, garantizando así el rendimiento mecánico deseado.

No obstante, la inclusión de fibras vegetales produce un aumento en la capacidad de absorción de humedad del material, lo cual significa una desventaja significativa, ya que el aumento en la absorción de humedad resulta en una pérdida de rigidez, debilitamiento estructural y la propensión del material a la deformación y la formación de grietas. Estos efectos desembocan en una reducción del tiempo de vida útil del material. Por lo tanto, muchos de los refuerzos lignocelulósicos usados en bio-composites van a requerir de pretratamientos físicos y químicos que ayuden a superar estos efectos adversos (Girimurugan et al., 2021).

En la búsqueda de mejorar la biodegradabilidad de los bio-composites, se han formulado diversas propuestas dirigidas a sustituir las matrices poliméricas sintéticas por biopolímeros. Una opción viable implica la incorporación de almidón en la matriz polimérica, a través de la adición de harinas vegetales. Este biopolímero, compuesto por amilosa y amilopectina, se presenta como una alternativa para sustituir o complementar la acción de las matrices poliméricas sintéticas. Sin embargo, es esencial destacar que su uso requiere de tratamientos previos que ayuden a minimizar su capacidad de absorción de agua y su falta de integridad mecánica al emplearse como matriz de materiales compuestos (Bangar & Whiteside, 2021).

El almidón, que se puede encontrar en harinas vegetales de maíz, arroz, trigo, amaranto y habas entre otros, desempeña un papel crucial al actuar como agente de refuerzo estructural en la matriz polimérica, ya que aporta resistencia y rigidez al producto final, actuando como punto de anclaje para las cadenas poliméricas de la matriz polimérica sintética y los grupos funcionales del refuerzo. Además, se ha observado que la harina de productos vegetales mejora la compatibilidad entre el refuerzo y la matriz polimérica,

reduciendo así la separación de componentes y la delaminación del bio-compuesto. Este enfoque no solo contribuye a la mejora de la integridad mecánica, sino que también resulta eficaz para potenciar la biodegradabilidad del material (Wang et al., 2023).

Un aspecto relevante es que la utilización de almidón vegetal no solo mejora la sostenibilidad ambiental del bio-compuesto, sino que también incide positivamente en la gestión de recursos. Los productos vegetales de los cuales se extraen los almidones son recursos renovables, de amplia disponibilidad y con costos de adquisición considerablemente bajos. Esta característica los posiciona como alternativas atractivas para reemplazar aditivos sintéticos, contribuyendo así a reducir la dependencia de recursos no renovables en la fabricación de materiales compuestos (Biswas et al., 2022).

De la misma manera la investigación y desarrollo de nuevos materiales es una labor que estaría incompleta si no se realiza una caracterización, debido a que esta etapa permite analizar las propiedades del material, y, con base a ellas, definir la utilidad de este y su mejor campo de aplicación, así como también poder conocer la forma en que interactúan los elementos que componen los bio-composites y su efecto en las propiedades macroscópicas y microscópicas del material, lo que a su vez es una oportunidad valiosa para mejorar formulaciones y condiciones de procesamiento hasta alcanzar un producto que cumpla con las características deseadas (Torres et al., 2019). Dos de las principales formas de caracterizar materiales compuestos bio-basados son el ensayo de tracción y la espectroscopía de infrarrojos por transformadas de Fourier (FTIR), cada una de ellas cumple con un propósito diferente y posee un enfoque característico.

En el caso del ensayo de tracción, se tiene que es una prueba fundamental para caracterizar los bio-composites, ya que permite evaluar su comportamiento mecánico frente a fuerzas de tensión. La naturaleza de este ensayo consiste en la aplicación controlada de una carga axial gradual a una muestra del material, a la vez que se van registrando las correspondientes deformaciones que experimenta. La carga se aplica a través de una máquina de ensayos universal, que es capaz de generar un esfuerzo uniaxial controlado en la muestra (Askeland & Wright, 2017). El procedimiento para la ejecución de los ensayos de tracción está regido por distintas normativas, las cuales se aplicarán en función de la naturaleza del material y su aplicación. En estas normas se especifican criterios de ensayo como son las condiciones de carga y velocidad de aplicación de la tensión, al igual que la forma y dimensiones de las muestras, un ejemplo de ello es la norma ASTM D638-14, que proporciona un método de ensayo aplicable a materiales plásticos reforzados, como es el caso del material compuesto estudiado en el presente trabajo. De igual forma, la normativa resulta relevante ya que las propiedades mecánicas varían con la

preparación de la probeta y con la velocidad y el entorno del ensayo (Zwick Roell Group, s. f.)

Con el ensayo de tracción se puede obtener información muy valiosa sobre la capacidad del material para soportar cargas y deformaciones, ya que permite medir la resistencia y elasticidad del material bajo tensión, lo que es esencial para su aplicación en diversos propósitos (Askeland & Wright, 2017). Además, se puede estudiar la respuesta mecánica de los materiales compuestos a nivel micro y macroscópico, ya que por ejemplo la resistencia a la tracción y elongación a la rotura, el módulo de elasticidad y la tenacidad son propiedades mecánicas que dependen de la estructura interna del material, la distribución de cargas, la interacción entre los componentes del bio-composite y la presencia de defectos en el material (Zuccarello et al., 2018).

Las propiedades mecánicas antes mencionadas se pueden determinar a través de la curva de esfuerzo vs deformación, la cual se obtiene al graficar los valores de esfuerzo aplicado y la respectiva deformación resultante en el material. Un parámetro clave derivado de esta curva es la pendiente inicial, que corresponde al módulo de elasticidad del bio-composite. Este valor representa la rigidez intrínseca del material, y describe su capacidad para deformarse elásticamente bajo la influencia de una carga externa, ya que cuanto mayor es el módulo más rígido es el material. Cuantitativamente, se expresa como el cociente entre el esfuerzo aplicado y la correspondiente deformación unitaria correspondiente, considerando exclusivamente la zona elástica del material, que teóricamente en la curva aparece como una línea recta al inicio y se caracteriza porque se cumple la Ley de Hooke (Krishnasamy et al., 2021).

Otras propiedades mecánicas esenciales que se evidencian a través de la curva de esfuerzo vs. deformación es la elongación a la rotura y la resistencia a la tracción. En cuanto a la resistencia a la tracción, este parámetro corresponde al valor de tensión en el punto más alto de la curva, y representa el máximo esfuerzo que el material puede soportar, ya que si se aplica y mantiene este valor de tensión entonces el material se fracturará. Por otro lado, la elongación a la rotura representa el aumento en la longitud de una muestra de material en el punto de fractura en relación con su longitud original. Este parámetro cuantifica la ductilidad del material, es decir, su capacidad para deformarse plásticamente antes de la rotura (Jawaid et al., 2019).

Ambos parámetros poseen una relevancia significativa. En el caso de la resistencia a la tracción, este valor delimita la capacidad del material para resistir deformaciones y soportar condiciones de carga extremas, lo cual resulta fundamental para identificar limitaciones de

diseño, seleccionar materiales apropiados para aplicaciones específicas y asegurar que el material pueda soportar las cargas previstas sin experimentar una fractura total del material (Zuccarello et al., 2018).

Por otro lado, la elongación a la rotura, al estar relacionada con la ductilidad, proporciona un criterio crucial al seleccionar un material para una aplicación particular. Materiales con valores elevados de elongación a la rotura son adecuados para aplicaciones que demandan flexibilidad y resistencia, siendo especialmente idóneos en procesos de fabricación que requieren una capacidad significativa de deformación sin experimentar fracturas, como el moldeado de plásticos (Hameed et al., 2021).

Asimismo, la elongación a la rotura sirve como indicador de la resistencia de un material ante impactos o cargas repentinas. Valores elevados de elongación indican que el material posee una destacada capacidad para absorber energía a través de la deformación plástica, lo cual mejora su capacidad para resistir impactos sin sufrir una fractura catastrófica (Askeland & Wright, 2017). Este aspecto se torna crucial en la evaluación del comportamiento del material frente a condiciones dinámicas y su resistencia a cargas repentinas e intensas.

Finalmente, la tenacidad es una propiedad mecánica crucial que indica la capacidad de un material para absorber energía antes de alcanzar el punto de fractura. Desde una perspectiva matemática ingenieril, la tenacidad se cuantifica como el área bajo la curva de esfuerzo vs. deformación. Este valor está intrínsecamente ligado a las condiciones del ensayo de tracción y se ve fuertemente influenciado por la velocidad de deformación, como se establece en la literatura especializada (Askeland & Wright, 2017).

En el contexto de los bio-composites, la tenacidad adquiere un papel fundamental al proporcionar información sobre la capacidad del material para resistir impactos y tensiones repentinas sin experimentar fracturas. Este atributo resulta especialmente relevante en aplicaciones donde el material estará expuesto a cargas dinámicas y repentinas, como en la industria automotriz y aeroespacial (Krishnasamy et al., 2021). La evaluación de la tenacidad se convierte así en un indicador crucial para garantizar la integridad estructural y la resistencia a eventos imprevistos en entornos donde la respuesta del material a cargas dinámicas es un factor determinante.

Y un aspecto que engloba a todas las propiedades mecánicas antes mencionadas es que se pueden emplear para la selección y optimización del diseño de materiales compuestos bio-basados. Los resultados de estas propiedades sirven como una guía en la modificación de las formulaciones y condiciones de procesamiento del bio-composite, las cuales se

pueden ir modificando hasta conseguir un material con las características específicas necesarias para un rendimiento óptimo en una aplicación particular (Muthuraj et al., 2016). Este enfoque sistemático facilita la adaptación del material a requisitos específicos, maximizando su eficiencia y funcionalidad en contextos de aplicación concretos.

En cuanto a la técnica de espectroscopía FT-IR, esta posee relevancia en la caracterización de materiales, debido a su capacidad para proporcionar información detallada sobre la estructura molecular y composición química de los materiales analizados, además de que un aspecto distintivo que refuerza su utilidad es su naturaleza no destructiva (Yaghoobi & Fereidoon, 2019).

El principio teórico de la espectroscopía FT-IR se basa en la interacción entre la radiación electromagnética de la región del infrarrojo y la materia, aunque se emplea principalmente la región del infrarrojo medio. Al incidir esta radiación sobre una muestra, los componentes moleculares del material absorben selectivamente una fracción de la radiación. La absorción se manifiesta a frecuencias específicas, directamente relacionadas con la energía de los enlaces vibratorios interatómicos presentes en las moléculas. Cuando la energía del enlace coincide con la energía de la luz infrarroja incidente, se produce la absorción, y esta energía de enlace está intrínsecamente vinculada a la fuerza del enlace y a la masa de los átomos involucrados. Este fenómeno proporciona una base sólida para la caracterización precisa de un material (Skoog et al., 2018).

Para el ensayo espectroscópico se utiliza un espectrofotómetro de tipo FT-IR, el cual genera un espectro infrarrojo que relaciona la transmitancia en función de la frecuencia de la onda electromagnética aplicada, aunque lo más usual es utilizar el número de onda como parámetro equivalente en lugar de la frecuencia. El espectro infrarrojo que se genera aporta información sobre los grupos funcionales que están presentes en la estructura molecular de un compuesto, lo que permite realizar una identificación cualitativa de un compuesto al observar el espectro que se genera, ya que cada molécula presenta un espectro de infrarrojos característico, similar a una huella digital, y al comparar el espectro obtenido de la muestra con los espectros de sustancias conocidas se pueden identificar los componentes del material (Smoca, 2020).

Este espectro se manifiesta gráficamente mediante bandas de absorción que ofrecen información valiosa sobre los enlaces intramoleculares presentes en las moléculas que constituyen el material. Cada banda corresponde a una frecuencia natural vibratoria de los enlaces interatómicos, donde se produce una absorción significativa de energía (Skoog et al., 2018). De este modo, la representación gráfica del espectro FT-IR se convierte en una

herramienta poderosa para analizar y entender la composición molecular de los materiales, destacando los enlaces y proporcionando información esencial para la caracterización cualitativa de los materiales.

2 METODOLOGÍA

2.1 Materiales

En la elaboración del bio-composite se utilizó harina de haba de grado alimenticio de la marca “La Pradera” disponible comercialmente, el acetato de polivinilo empleado fue de grado comercial y corresponde a la marca “Bioplast”, de la misma manera se utilizó glicerol de grado USP, con una pureza del 99,5 %.

Para el refuerzo se emplearon fibras vegetales obtenidas mediante la trituración de residuos de raquis de palma en un molino de cuchillas marca SHINI, modelo SG-2348E. El raquis utilizado fue suministrado por una empresa especializada en la extracción de aceite de palma. Asimismo, dicha empresa suministró el cuesco de palma, el cual también fue sometido al proceso de trituración. Este procedimiento aseguró la obtención de fibras de raquis y cuesco de palma en condiciones óptimas para su incorporación como refuerzo en el material compuesto.

Las fibras de raquis obtenidas se tamizaron y clasificaron de acuerdo con su tamaño, el cual se definió con base en el valor de malla del tamiz en que cada fracción de fibra molida fue retenida.

2.2 Preparación del bio-composite

El bio-composite de matriz polimérica formada por acetato de polivinilo (PVAc) y almidón, y reforzado con materiales lignocelulósicos se elaboró utilizando el método de moldeo por compresión, debido a las ventajas que presenta tales como son su reproducibilidad, que facilita su escalado a nivel industrial, así como también su rapidez (Edebali, 2021). Para garantizar la homogeneidad de los componentes del bio-composite se realizó previamente una etapa de mezclado manual de los componentes.

Para la preparación del bio-composite se consideraron dos formulaciones en las que el elemento diferenciador fue la relación fibra:cuesco presente en el agente de refuerzo. La composición másica de cada una de las formulaciones se presenta a continuación:

Tabla 2.1. Composición de los bio-composites elaborados.

Formulación	Matriz (35%)	Plastificante (25%)	Refuerzo (40%)
1	Harina de haba:PVAc (20:80)	Glicerol	Fibra:cuesco (10:90)
2	Harina de haba:PVAc (20:80)		Fibra:cuesco (20:80)

Inicialmente se prepararon bio-composites con una de las formulaciones, modificando las condiciones de tamaño de fibra y temperatura de prensado, para así poder definir las mejores condiciones de procesamiento para la formación del bio-composite en función de sus propiedades mecánicas, y a partir de estas condiciones se prepararon nuevos bio-composites en los que se analizaron las dos formulaciones definidas anteriormente y que se caracterizaron a través del ensayo de tracción y mediante espectroscopía de FTIR. En la Tabla 2.2 se detallan las características de tamaño de fibra y temperatura de prensado de cada una de las 12 condiciones de procesamiento evaluadas como experimentación preliminar.

Tabla 2.2. Condiciones de procesamiento evaluadas preliminarmente

Tamaño de fibra (Malla)	Temperatura de prensado (°C)		
	100 °C	130 °C	160 °C
70-80	Condición 7	Condición 3	Condición 10
60-70	Condición 5	Condición 4	Condición 6
45-50	Condición 8	Condición 2	Condición 11
20-25	Condición 9	Condición 1	Condición 12

La elaboración del bio-composite inició con la preparación de una mezcla de agua y harina de haba en una proporción másica de 70:30. De acuerdo con la formulación la cantidad de harina utilizada debe correspondió al 20 % (m/m) del contenido de la matriz en el bio-composite. La mezcla se calentó en una plancha calefactora hasta alcanzar la temperatura de 120 °C y se procuró mantener esta temperatura constante para evitar la degradación

térmica del almidón. Durante todo el calentamiento la mezcla se agitó manualmente hasta conseguir la gelatinización del almidón, y una vez alcanzado este punto se retiró la mezcla de la plancha.

A continuación, se añadió a la mezcla el PVAc que equivalía al 80 % (m/m) del contenido de la matriz polimérica. También se adicionó la fibra (malla: 20-25, 45-50, 60-70 y 70-80) y el cuesco de palma, de acuerdo con la proporción másica especificada en la formulación, además de que se consideró que el refuerzo compone el 40 % del total de la masa del bio-composite. Así mismo, también se añadió glicerol como agente plastificante, en una cantidad igual al 25 % de la masa total del bio-composite. Todos los componentes se mezclaron manualmente para garantizar la homogeneidad de la composición del producto.

La mezcla obtenida se esparció sobre una placa de vidrio recubierta con un film plástico y se secó en una estufa de secado por convección natural durante 24 horas a una temperatura de 100 °C. Una vez finalizado la etapa de secado, se procedió a desprender la mezcla seca de la placa de vidrio. El material se dejó enfriar hasta que alcanzó la temperatura ambiente y a continuación se lo trituró en un molino de cuchillas marca SHINI, modelo SG-2348E.

El material triturado se recogió en una bolsa plástica y se pesó para registrar la cantidad de masa perdida durante el procesamiento. A continuación, se distribuyó el material triturado en un molde metálico, el cual se llevó a una prensa hidráulica, marca Labtech, modelo LP-S-50, la cual se presenta en la Figura 2.1, y se configuraron las condiciones de temperatura (Temperatura de prensado: 100 °C, 130 °C y 160 °C), tiempo de precalentamiento, 15 minutos, tiempo y presión de prensado, 15 minutos y 150 bar respectivamente, y tiempo de enfriamiento, 6 minutos. Una vez que concluyó el prensado, se retiró el molde del equipo y se procedió a desprender la lámina obtenida, la cual se dejó enfriar hasta alcanzar la temperatura ambiente.



Figura 2.1. Prensa hidráulica de la marca LabTech, modelo LP-S-50.

2.3 Caracterización del bio-composite

2.3.1 Propiedades mecánicas del bio-composite

Las propiedades mecánicas como módulo de elasticidad, tenacidad, resistencia a la tracción y elongación a la rotura se evaluaron a través de un ensayo mecánico de tracción, el cual se realizó en una máquina de prueba universal, marca INSTRON, con número de modelo 3365, la cual se puede observar en la figura a continuación.

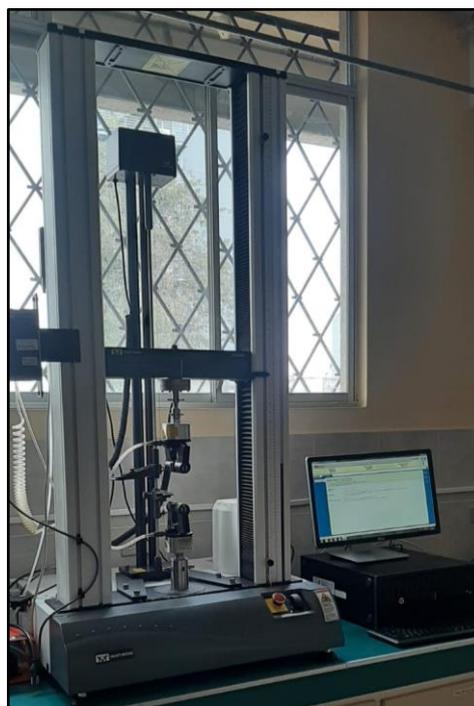


Figura 2.2. Máquina universal de ensayos de la marca INSTRON, modelo 3365.

El ensayo de tracción se realizó siguiendo las directrices establecidas por la norma ASTM D638-14, la cual es utilizada para la evaluación de propiedades mecánicas de material poliméricos reforzados y no reforzados. En el ensayo se utilizaron probetas tipo IV con forma y dimensiones especificadas de acuerdo con la norma. La forma y dimensiones de las probetas se muestran en la Figura 2.3 y la Tabla 2.3.

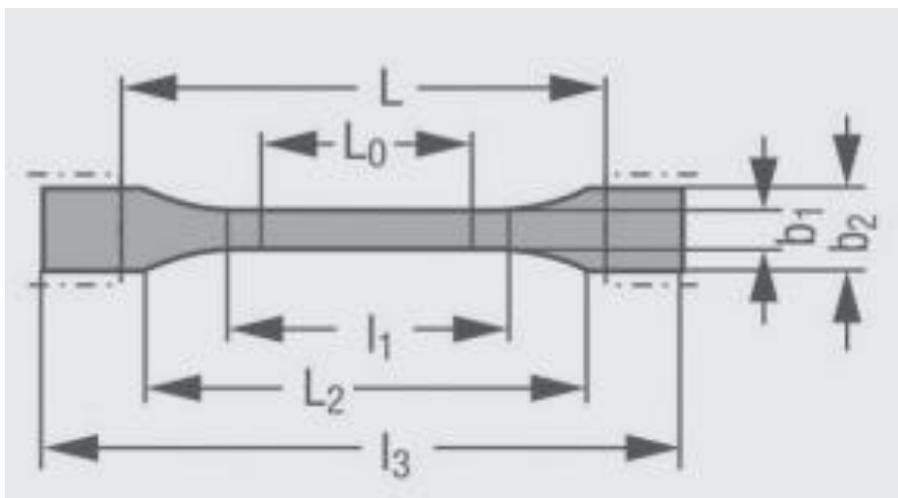


Figura 2.3. Forma de una probeta tipo IV para ensayos de tracción con dimensiones especificadas de acuerdo con la norma ASTM D638.

Tabla 2.3. Dimensiones para una probeta tipo IV especificadas por la norma ASTM D638.

Standard	Tipo	l_3 mm	l_1 mm	b_2 mm	b_1 mm	espesor mm	L_0 mm	L mm
ASTM D638	IV	≥ 115	$33 \pm 0,5$	$19 \pm 6,4$	$6 \pm 0,05$	$3.2 \pm 0,4$	$25 \pm 0,13$	65 ± 5

Se consiguieron las probetas a través del troquelado de las láminas de bio-composite obtenidas después del prensado. Se utilizó una troqueladora marca INSTRON, que se presenta en la Figura 2.4. Para la evaluación preliminar de las condiciones de procesamiento se prepararon 5 probetas a partir de cada una de las láminas de bio-composite fabricadas. Por otro lado, para la caracterización de los bio-composites elaborados con diferentes proporciones de fibra/cuesco se elaboraron 15 probetas para cada formulación estudiada (10:90 y 20:80).



Figura 2.4. Troqueladora INSTRON

2.3.2 Análisis de Espectroscopía FTIR

El estudio de la composición estructural del bio-composite se realizó a través de la técnica de espectroscopía infrarroja por reflexión total atenuada con Transformadas de Fourier. (ATR-FTIR). El equipo empleado fue un espectrofotómetro JASCO, modelo FT/IR-6800, el cual se presenta en la Figura 2.5. Se usó un cristal ATR de diamante y el rango de frecuencia de la radiación infrarroja empleada en el análisis fue de 400 cm^{-1} a 4000 cm^{-1} . Se realizó el escaneo de una muestra del bio-composite, tanto de la muestra obtenida del bio-composite elaborado con la formulación 1 como con la formulación 2. El cristal de diamante se limpió con alcohol isopropílico entre cada una de las mediciones para evitar cualquier contaminación de la muestra anterior.

El análisis de la composición química del bio-composite se realizó a partir de los espectros infrarrojos obtenidos, ya que se compararon las bandas obtenidas con las presentadas en bibliografía. Y así determinar la presencia de un determinado grupo funcional en el material y analizar su pertinencia en función de la naturaleza química de los componentes usados en la elaboración del bio-composite.



Figura 2.5. Espectrofotómetro infrarrojo de la marca JASCO, modelo 6800

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados y Discusión

3.1.1 Elección de las condiciones idóneas de procesamiento del bio-composite

En la Figura 3.1 se pueden observar las placas de bio-composite elaboradas a partir de las 12 condiciones de procesamiento evaluadas. De cada una de las placas se obtuvieron 5 probetas que se utilizaron para determinar las propiedades mecánicas de módulo de elasticidad, tenacidad, porcentaje de elongación a la rotura y resistencia a la tracción.



Figura 3.1. Placas de bio-composite elaboradas a distintas condiciones de procesamiento. Al moverse de izquierda a derecha la temperatura de procesamiento cambia en 100 °C, 130 °C y 160 °C. Mientras que al moverse de abajo hacia arriba el tamaño de fibra cambia en valores de malla 20-25, 45-50, 60-70, 70-80.

En la Figura 3.2 se muestran los resultados de módulo de elasticidad promedio y su respectiva desviación estándar, obtenidos para cada uno de los bio-composites elaborados bajo distintas condiciones de procesamiento. Se puede observar que el módulo de elasticidad cambia tanto en función del tamaño de fibra como de la temperatura de procesamiento.

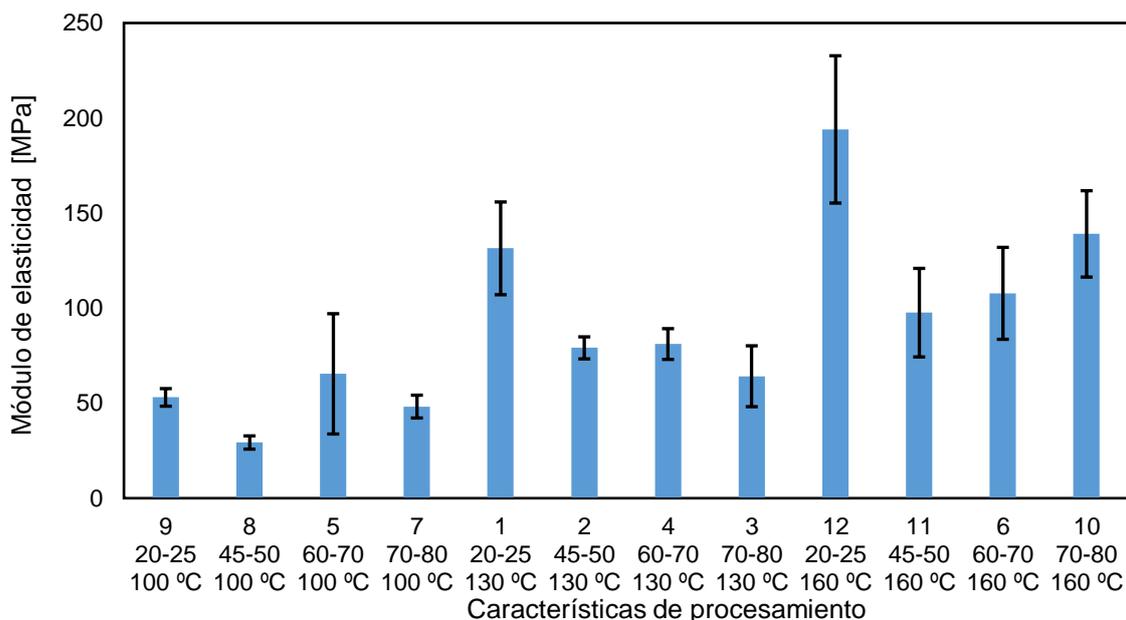


Figura 3.2. Módulo de elasticidad evaluado para muestras de bio-composites elaborados a partir de distintas condiciones de procesamiento.

En la Figura 3.2 se puede notar que el valor más alto del módulo de elasticidad se alcanza cuando las condiciones de procesamiento son de 160 °C y se usa una fibra de raquis con tamaño de malla 20-25, sin embargo es importante destacar que este valor presenta una desviación estándar considerablemente alta, al igual que el resto de valores obtenidos a esta temperatura.

La variabilidad observada en los resultados de las propiedades mecánicas evaluadas está estrechamente vinculada a la elevada heterogeneidad presente en el bio-composite, y es señal de una distribución deficiente de los componentes o de la falta de uniformidad en el procesamiento a lo largo de la totalidad de la superficie del material (Robledo-Ortíz et al., 2020). Además, esta dispersión puede atribuirse a diversos factores que guardan una relación directa con la heterogeneidad de las características de las fibras de raquis y cuesco de palma debido a su origen biológico. Dentro de estas características se encuentran la composición química, que engloba componentes cruciales como celulosa, lignina, hemicelulosa, ceras y otros elementos orgánicos que confieren rigidez, elasticidad o que pueden interferir en la compatibilidad entre refuerzo y matriz, y todos ellos son propensos a cambios debido a factores relacionados con las condiciones edafoclimáticas en las que se desarrollan las palmas de las que se obtuvieron el raquis y el cuesco. Asimismo, deben considerarse las disparidades en la morfología y microestructura de las fibras, que abarcan aspectos como la forma y geometría tanto en la superficie como en la sección transversal

de las fibras, así como la orientación de las microfibrillas que componen la fibra (Goh et al., 2020).

Por lo tanto, se va a preferir trabajar en las condiciones que garanticen una mayor homogeneidad en los resultados del módulo de elasticidad, manteniendo al mismo tiempo un valor elevado, ya que esto es indicador de una buena compatibilidad entre la matriz y el refuerzo lignocelulósico empleado. La compatibilidad y el efecto reforzante de las fibras influye positivamente en los valores de tenacidad, módulo de elasticidad y resistencia a la tracción (Thomas et al., 2013).

Desde la perspectiva del módulo de elasticidad, una elección óptima para las condiciones de procesamiento consistió en utilizar una temperatura de prensado de 130 °C y emplear fibras de raquis con un tamaño de malla de 45-50, ya que se ha encontrado que el uso de fibras de tamaño corto en la formación del bio-composite aumenta su susceptibilidad al agrietamiento, ya que se incrementa la cantidad de extremos de fibra que pueden servir como puntos de inicio de las grietas (Farahani et al., 2012). De manera similar, se ha evidenciado que a medida que la longitud de la fibra aumenta, también lo hace la probabilidad de que se presente un punto débil en la fibra, lo que podría resultar en su ruptura con una carga menor (Cheng et al., 2018).

En la Figura 3.3 se pueden observar los resultados de resistencia a la tracción. El valor más elevado de la propiedad mecánica se alcanzó al preparar el bio-composite bajo condiciones de procesamiento de 160 °C en la temperatura de prensado, utilizando fibras de tamaño malla 20-25. Sin embargo, debido a la desviación estándar asociada a este resultado, se optó por trabajar con las condiciones de procesamiento correspondientes a una temperatura de prensado de 130 °C utilizando fibra de tamaño malla 45-50. Bajo estas condiciones, se obtuvo un valor de resistencia a la tracción de 1.28 MPa, que representa el tercer valor más alto obtenido, siendo el primero de 1,5 MPa, pero se consigue una mejora notable en cuanto a la reducción de la desviación estándar de los resultados.

En relación con esta propiedad mecánica, en composites reforzados con fibras vegetales, se prefiere trabajar con formulaciones que arrojen valores superiores, debido a que esto indica que el tamaño de fibra es apropiado, ya que el tamaño de fibra repercute directamente en la capacidad de dispersión del refuerzo en la matriz (Mahdi et al., 2021). La óptima dispersión del refuerzo favorece una buena adhesión interfacial que facilita la transferencia de tensión desde la matriz a las fibras, lo que aumenta la resistencia a la tracción, además de que se evita la formación de grietas y microespacios en la región interfacial del material (Nayak et al., 2013). De la misma manera también se debe tomar en

cuenta que un tamaño de fibra grande compromete la distribución de la fase continua sobre el refuerzo, ya que impide que la matriz rodee completamente y de manera eficiente al refuerzo. Este fenómeno resulta en una humectación deficiente y, en consecuencia, en una transferencia ineficaz de los esfuerzos, conduciendo a una baja resistencia a la tracción (Praveena et al., 2022).

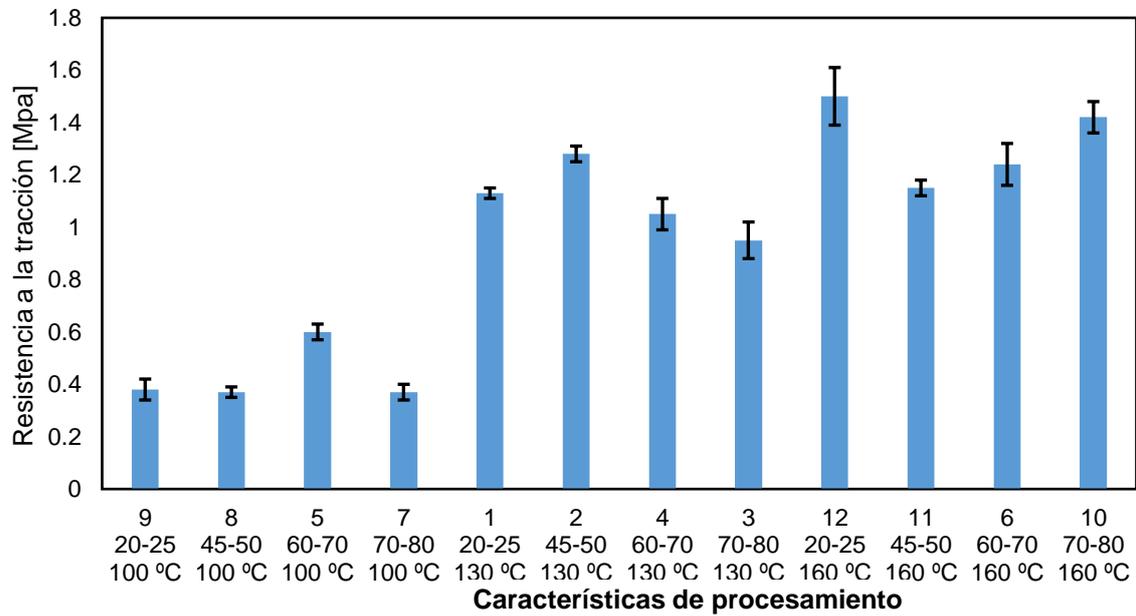


Figura 3.3. Resistencia a la tracción evaluada para muestras de bio-composites elaborados a partir de distintas condiciones de procesamiento.

Al analizar la influencia de la temperatura en la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad del composite, se evidencia una tendencia ascendente en ambas propiedades a medida que la temperatura aumenta. Esta relación se atribuye a una mejora en la cobertura de la matriz sobre el refuerzo lignocelulósico, lo que resulta en una considerable optimización de la interacción entre ambas fases y facilita la transferencia de esfuerzos. El incremento de temperatura favorece la movilidad de la matriz polimérica, permitiéndole cubrir eficientemente la superficie de todas las fibras (Goh et al., 2020).

La mejora en la humectabilidad lograda mediante el aumento de la temperatura también incide en el módulo de elasticidad del bio-compuesto al promover y fortalecer las uniones intermoleculares entre los componentes de la matriz y el refuerzo en la interfaz. Este fenómeno resulta en un aumento de la rigidez del material (Thomas et al., 2013).

Según Jawaid et al. (2019), el porcentaje de elongación a la rotura constituye un criterio mecánico fundamental al evaluar la compatibilidad entre el refuerzo lignocelulósico y la matriz polimérica. Valores elevados en este parámetro indican una buena compatibilidad,

así como una integración y distribución adecuadas del refuerzo en la matriz. De igual forma la elongación a la rotura es un indicador de la capacidad de transferir las tensiones desde la matriz hacia el refuerzo a través de tensiones cortantes que se forman debido a la unión entre matriz y refuerzo. Una mayor elongación a la rotura es un indicador de un incremento en presencia de estas uniones a nivel estructural y por tanto mayor cantidad de tensiones cortantes, que hacen que el material compuesto se deforme en conjunto, y no solo la matriz, evitando así una rotura prematura (Krishnasamy et al., 2021).

Al analizar los resultados de elongación a la rotura presentados en la Figura 3.4, se destaca que el valor más alto de esta propiedad se logró al preparar el bio-compuesto a una temperatura de 130 °C, utilizando fibras de tamaño malla 70-80, obteniendo una elongación del 5,16%. En contraste, la segunda mayor elongación, del 4,54%, se alcanzó a una temperatura de prensado de 130 °C, utilizando fibras de tamaño malla 45-50. En ambos casos, los resultados sugieren que la temperatura de 130 °C es adecuada para obtener una óptima elongación a la rotura.

Al analizar el impacto del tamaño de fibra en la dispersión de los resultados, se observa que el empleo de fibras de menor tamaño, malla 70-80, se traduce en una desviación estándar más reducida, situándose en 0,39 en comparación con la fibra de malla 45-50, 0,44. Sin embargo, entre ambos resultados, la diferencia en la desviación no es significativa.

La elección del tamaño de fibra influye en la aparición y propagación de grietas durante la aplicación de fuerza en el material. En este contexto, cuando surgen grietas como consecuencia de la carga, estas tienden a expandirse alrededor de las fibras, aumentando la superficie de fractura en función de la longitud y el diámetro de las fibras y materiales de refuerzo utilizados, lo que provoca una reducción de las propiedades mecánicas (Kumar et al., 2021). Por otro lado, un tamaño de fibra excesivamente pequeño incrementa la cantidad de extremos de fibra susceptibles de actuar como puntos iniciales para la formación de grietas (Farahani et al., 2012). En consecuencia, se optó por trabajar con fibras de tamaño malla 45-50 y una temperatura de prensado de 130 °C.

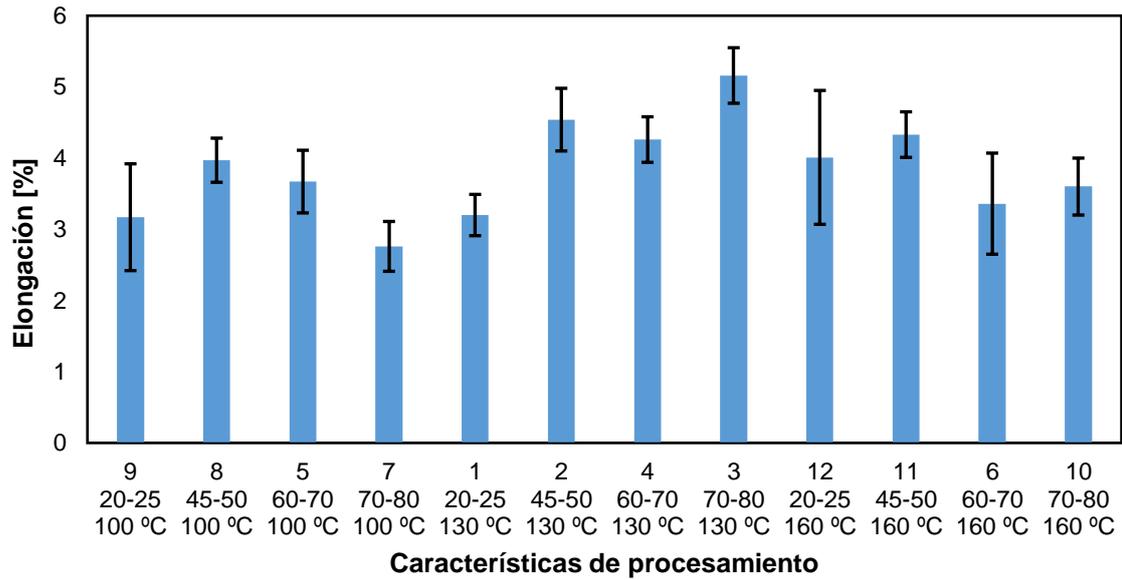


Figura 3.4. Resultados de porcentaje de elongación a la rotura para muestras de bio-composites elaborados a partir de distintas condiciones de procesamiento.

Finalmente, en cuanto a la tenacidad, los resultados de esta propiedad se pueden observar en la Figura 3.4. Se puede notar que el valor más elevado se presenta a una temperatura de prensado de 130 °C utilizando fibra de raquis de palma de tamaño malla 45-50, ya que se consiguió una tenacidad de 0,04787 MPa, mientras que el valor mínimo presentó cuando el material se elaboró a una temperatura de 100 °C y se empleó fibra con un tamaño de malla 70-80, ya que se obtuvo un bio-composite con una tenacidad de 0,00665.

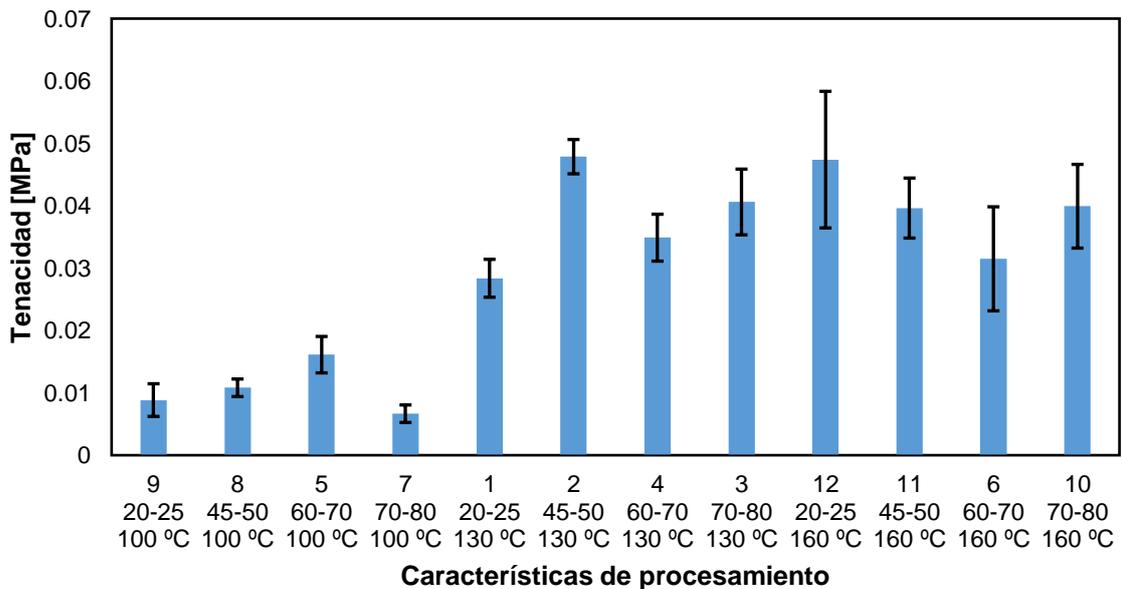


Figura 3.5. Resultados de tenacidad para muestras de bio-composites elaborados a partir de distintas condiciones de procesamiento.

Considerando lo expuesto previamente, si se busca priorizar la obtención de un bio-composite con una sinergia efectiva entre la matriz polimérica y el refuerzo vegetal, resulta recomendable trabajar a una temperatura de prensado de 130 °C, junto con el uso de fibras de tamaño malla 45-50. Esta elección no solo resulta en valores elevados de las propiedades mecánicas, sino que, incluso en los casos en que el resultado es menor en comparación a otras condiciones de procesamiento, se logra obtener un material más homogéneo debido a la menor desviación estándar presente en los resultados.

Además, bajo estas condiciones de procesamiento evitar parcialmente la aparición de microfisuras y fallas prematuras antes y durante la aplicación de esfuerzos sobre el material. La selección del tamaño de fibra se realizó considerando la influencia de dicho parámetro en la aparición y propagación de grietas en el composite. Así mismo, se ha tenido en cuenta su impacto en la dispersión de los resultados e interacción del refuerzo con la matriz.

3.1.2 Caracterización mecánica de los bio-composites

En la Figura 3.5 se presentan las curvas de esfuerzo vs deformación obtenidas para cada una de las formulaciones evaluadas en el trabajo. En la gráfica se puede observar que con la formulación 1 se consigue un bio-composite que presenta una mayor elongación a la rotura, pero un menor módulo de elasticidad, mientras que la resistencia a la tracción alcanza valores similares en ambas formulaciones. En cuanto a la tenacidad, esta propiedad es considerablemente superior en el bio-composite fabricado con la formulación 1. Los resultados promedio de las 4 propiedades mecánicas estudiadas junto con sus correspondientes desviaciones estándar se presentan en la Tabla 3.1.

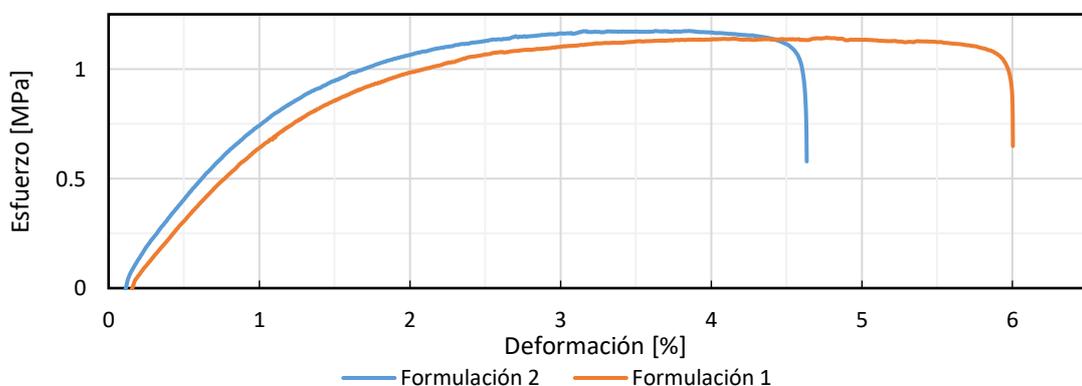


Figura 3.5. Gráfico de esfuerzo vs deformación por fuerzas de tracción para bio-composites de matriz polimérica y refuerzo de fibra de raquis y cuesco de palma. La formulación 1 incluía una relación fibra/cuesco en el refuerzo igual a 10:90, mientras que en la formulación 2, la relación fue de 20:80.

Tabla 3.1. Valores de media y desviación estándar de las propiedades mecánicas evaluadas en el material compuesto elaborado a partir de una distinta composición de Fibra de raquis y cuesco de palma en el refuerzo.

Relación Fibra/cuesco	Propiedades mecánicas			
	Módulo de elasticidad [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Tenacidad [MPa]
Formulación 1 10/90	80.187 ± 10.789	1.147 ± 0.054	5.977 ± 0.562	0.05642 ± 0.006
Formulación 2 20/80	110.397 ± 15.293	1.177 ± 0.081	4.605 ± 0.571	0.04456 ± 0.008

El aumento en la cantidad de fibras en la formulación 2 produjo un leve aumento en la resistencia a la tracción, como se detalla en la Tabla 3.1. Este resultado se atribuye a que las fibras son las que soportan principalmente la carga aplicada sobre el material compuesto, sin embargo la diferencia poco significativa de los resultados obtenidos puede estar ligada a la incapacidad de la matriz de transmitir la fuerza aplicada hacia las fibras (Askeland & Wright, 2017). Esta limitación está relacionada con la falta de cohesión entre el refuerzo y la matriz, consecuencia de la presencia de ceras y grasas naturales presentes principalmente en el cuesco de palma y en menor medida en la fibra, por lo que la presencia de una proporción superior de cuesco en relación a la fibra genera que estas sustancias formen una especie de barrera que restringe la unión entre refuerzo y matriz, obstaculizando la acción de mejora al adicionar las fibras (Srikanth et al., 2021) Cabe destacar que ninguno de los materiales lignocelulósicos fue sometido a tratamiento previo, lo que propicia la formación de una barrera que restringe la unión entre el refuerzo y la matriz, obstaculizando el beneficio potencial al agregar fibras (Srikanth et al., 2021).

En la Formulación 1, la reducción en el valor de resistencia a la tracción se produjo por el aumento en el contenido de cuesco de palma en el refuerzo del bio-composite. Esto se debe a que la relación entre el área superficial del refuerzo y el volumen de la matriz polimérica alcanzó un punto de saturación. En este punto, la adición de cuesco de palma resulta en una transferencia ineficiente de tensiones desde la matriz al refuerzo (Uyor et al., 2019). Asimismo, la incorporación adicional de cuesco de palma en la composición del refuerzo dificulta la obtención de una dispersión adecuada del refuerzo en la matriz durante el proceso de mezclado de los componentes (Ike-Eze et al., 2019).

La investigación de Alias et al. (2018) reveló que el incremento en la concentración de cuesco de palma en un bio-composite de matriz polimérica (alcohol polivinílico) conlleva a una significativa disminución de la resistencia a la tracción. Esta reducción puede atribuirse a una deficiente interacción interfacial entre el refuerzo y la matriz, y una distribución inadecuada del refuerzo dentro de la matriz, lo que provoca que la acción de refuerzo sea deficiente, y por lo tanto las tensiones aplicadas en el material no pueden transferirse de forma eficaz al refuerzo durante la deformación. Además, la falta de uniformidad en la distribución se ve favorecida por el aumento en el contenido de cuesco de palma, ya que esto incrementa la propensión a la aglomeración del refuerzo. Dichas aglomeraciones propician la formación de puntos de concentración de tensiones, generando discontinuidades en la matriz.

Otro aspecto que pudo haber influido en el impacto poco significativo que tuvo el aumento la cantidad de fibra en el refuerzo, es debido a que cuando se utilizan fibras distribuidas al azar en el bio-composite, se incrementa la cantidad de espacios huecos en el material, los cuales interrumpen la transferencia efectiva de las cargas desde la matriz hacia el refuerzo. De la misma manera la presencia de huecos favorece la degradación de las fibras, debido a que se facilita el contacto entre la fibra y agentes ambientales como la humedad y el oxígeno, lo que afecta negativamente a la resistencia del material (Prasad et al., 2020).

En la Tabla 3.1, se puede observar que el bio-composite elaborado con la formulación 1 presenta un valor inferior en el módulo de elasticidad. Esta reducción se atribuye al incremento en la proporción de cuesco de palma en el refuerzo. Según Alias et al. (2018), el aumento en la concentración de cuesco por encima de un valor límite puede resultar en la obtención de bio-composites con un módulo de tracción más bajo. Esta inclusión excesiva conlleva a una ineficaz transferencia de la tensión aplicada en el material, además de que el comportamiento del material frente a esfuerzos de tensión puede disminuir debido a la aglomeración del material de refuerzo como resultado del aumento en la cantidad de cuesco de palma. Este comportamiento también se puede observar en los resultados encontrados por Ike-Eze et al. (2019) y Alias et al. (2018), presentados en la Tabla 3.3, ya que se observa que el aumento en la cantidad de cuesco adicionado al refuerzo produce una caída pronunciada de la resistencia a la tracción.

Si se analiza el efecto de las fibras de raquis de palma, se puede observar en la Tabla 3.1 que la inclusión de una mayor cantidad de estas fibras en el bio-composite resulta en un aumento de la rigidez del material y, en consecuencia, un incremento en el módulo de elasticidad. Este efecto se atribuye a la efectiva transferencia de la carga aplicada desde la matriz hacia las fibras. Además, la adición de la fibra de raquis pudo inducir una

restricción en la movilidad de las cadenas moleculares del polímero, contribuyendo así al aumento en la rigidez del material (Uyor et al., 2019).

El incremento en el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción observado en el bio-composite elaborado con la formulación 2 puede atribuirse al aumento en la cantidad de celulosa presente en el material, debido al aumento en la cantidad de fibra de raquis añadida. Esta fibra posee un contenido de celulosa notablemente superior en comparación con el cuesco de palma, como se detalla en la Tabla 3.2. La literatura respalda este fenómeno, indicando que en bio-compuestos con matriz de almidón reforzados con celulosa extraída de raquis de palma, se observa un comportamiento análogo. Los valores altos de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad indican que existe una buena dispersión del refuerzo en la matriz, favoreciendo las interacciones entre el almidón de la matriz y la celulosa del refuerzo, provocando el incremento de la rigidez del material. Esta interacción positiva se debe a la similitud en la estructura química de ambos biopolímeros y a la presencia de grupos hidroxilo que permiten la formación de enlaces de hidrógeno (Owi et al., 2017).

Tabla 3.2. Contenido en base seca de componentes lignocelulósicos presentes en las fibras de raquis de palma y cuesco

Componente	Lignina	Celulosa	Hemicelulosa	Referencia
Fibra de raquis de palma	14,1-30,45 (wt%)	23,7-65,0 (wt%)	20,58-33,52 (wt%)	(Chang, 2014)
Cuesco de palma	46,3 (wt%)	33,4 (wt%)	14,4 (wt%)	(Ninduangdee et al., 2015)

Sin embargo, se ha observado que el incremento en las propiedades de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad producido por la adición de fibra de raquis de palma en composites de matriz termoplástica, solamente se produce hasta un cierto valor límite en la concentración de fibra, y si se sobrepasa este valor, entonces los valores de las propiedades mecánicas antes mencionadas descienden. Este fenómeno se atribuye a que la incorporación excesiva de fibra en el composite ocasiona el debilitamiento en la adhesión entre matriz y refuerzo, debido a que se produce una distribución deficiente de las fibras en la matriz, lo que conduce a un fallo prematuro durante el ensayo de tracción (Adnan et al., 2021). Este comportamiento se refleja en los resultados presentados en la Tabla 3.3, donde se puede observar que para el composite de matriz de almidón termoplástica y refuerzo de fibras de raquis de palma, el aumento en la concentración de fibra por encima

del 4 % resulta en una disminución de los valores de resistencia a la tracción y módulo de elasticidad.

Tabla 3.3. Influencia de la concentración de fibra de raquis de palma y cuesco de palma en las propiedades mecánicas de tracción de composites de matriz termoplástica.

Bio-Composite	Contenido de Fibra/Cuesco de palma	Módulo de elasticidad [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Referencia
Matriz: Almidón termoplástico Refuerzo: Fibras de raquis de palma	0 wt%	0.25	2.15	-	Adnan et al. (2021)
	1 wt%	0.68	2.26		
	2 wt%	0.79	2.95		
	3 wt%	1.01	3.29		
	4 wt%	1.16	4.51		
	5 wt%	1.1	4.23		
Matriz: Alcohol Polivinílico Refuerzo: Fibras de raquis de palma	1 wt%	0.12	1.12	16.75	Sarjadi et al. (2018)
	3 wt%	0.13	1.97	8.37	
	5 wt%	0.12	1.61	5.63	
Matriz: Resina Poliéster Refuerzo: Cuesco de palma	Vol 0 %	160	8.0	4.5	Ike-Eze et al. (2019)
	Vol 5 %	140	5.4	4.5	
	Vol 10 %	400	7.0	6.0	
	Vol 15 %	253.3	6.1	3.0	
	Vol 20 %	224	3.5	2.0	
Matriz: Alcohol Polivinílico Refuerzo: Cuesco de palma	0 wt%	98	32	339	Alias et al. (2018)
	10 wt%	165	11	76	
	20 wt%	188	10	64	
	30 wt%	331	9	28	
	40 wt%	185	6	26	

Así mismo, también es importante tomar en cuenta la afinidad por las moléculas de agua que presentan las fibras de raquis de palma, ya que los 3 grupos hidroxilo presentes en cada glucosa que conforma la celulosa tienen la capacidad de formar enlaces hidrógeno con las moléculas de agua. Los grupos OH presentes tanto en la hemicelulosa como lignina también contribuyen a este efecto (AL-Oqila & Salit, 2017). Las fibras lignocelulósicas captan la humedad del ambiente, lo que provoca un hinchamiento del material y con ello la aparición de espacios vacíos en su estructura interna. Estos espacios son sitios de concentración de tensiones (Mahdi et al., 2021).

De acuerdo con los resultados de la Tabla 3.1 se puede notar que el aumento en la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad se asocia con una disminución en el

porcentaje de elongación a la rotura del bio-composite. Este comportamiento del material también se ha presentado en trabajos previos, en los que se ha combinado matrices termoplásticas con refuerzos de fibras de raquis de palma, como se detalla en la Tabla 3.3. Sarjadi et al. (2018) investigaron el efecto de la adición de fibras de raquis de palma en una matriz de alcohol polivinílico. Se encontró que al aumentar la concentración de fibras hasta el 3 wt%, se produjo un aumento en la resistencia a la tracción y módulo de elasticidad del composite, acompañado de una significativa reducción en el porcentaje de elongación a la rotura, ya que al pasar de un contenido de fibra del 1 wt% a 3 wt%, la elongación a la rotura cambia de 16.75 a 8.37. Este resultado se atribuye al aumento de la rigidez del composite debido al incremento en la formación de enlaces hidrógeno, ya que los grupos hidroxilo de la celulosa que compone las fibras es capaz de formar puentes de hidrógeno con los grupos OH del almidón de la matriz del composite elaborado, y en menor medida con los oxígenos presentes en el grupo carbonilo del polivinil acetato (Owi et al., 2017).

Así mismo, de acuerdo con la investigación de Zadeh et al. (2017), en la que se utilizó una mezcla de poliolefinas recicladas como matriz polimérica y fibras de raquis de palma como agente de refuerzo en la fabricación del bio-composite, el aumento en la proporción de fibra provoca una disminución en el porcentaje de elongación a la rotura, ya que la fibra confiere una menor elasticidad al material y provoca un incremento en la rigidez.

La bibliografía consultada menciona que existe una relación entre la orientación de las fibras y la elongación a la rotura de bio-composites reforzados con fibras naturales. Cuando las fibras se orientan en una misma dirección paralela a la de la aplicación de las cargas, el bio-composite puede soportar cargas mayores sin fracturarse. Esto se debe a que la orientación adecuada evita la formación de zonas de concentración de esfuerzos y favorece una distribución uniforme del esfuerzo aplicado en todo el material (Lasikun et al., 2018). En el presente trabajo, no se tomó en cuenta la orientación de las fibras al momento de distribuir las fibras de raquis en el composite, por lo que la disposición aleatoria en las fibras pudo favorecer la disminución en la elongación de la rotura al aumentar la concentración de fibra en el refuerzo.

Respecto a los valores que se obtuvieron para la tenacidad del composite, se puede analizar estos resultados desde el punto de vista matemático ingenieril al considerar que la tenacidad es el área bajo la curva esfuerzo-deformación. Por lo tanto, un incremento en el valor de la tenacidad está asociado con el aumento de la elongación a la rotura, la resistencia a la tracción y el módulo de elasticidad (Askeland & Wright, 2017). Al analizar los resultados de la Tabla 3.1, se observa que con la Formulación 2 se obtuvo un valor de tenacidad menor en comparación a la Formulación 1. Este resultado se corresponde con

los obtenidos para las propiedades mecánicas de módulo de tracción, resistencia a la tracción y porcentaje de elongación a la rotura.

Con la formulación 2 se obtuvo una menor elongación a la rotura y un mayor módulo de elasticidad en comparación a la formulación 1, por lo que el resultado de la tenacidad se vio mayormente influenciado por la disminución de la elongación a la rotura, ya que esta reducción generó que el área bajo la curva fuera menor, a pesar de que el valor del módulo fuera superior. En cuanto a la resistencia a la tracción, los valores promedio obtenidos para cada formulación no tuvieron una variación estadísticamente significativa. Por lo tanto, la resistencia a la tracción tuvo un efecto menor en cuanto al valor de tenacidad calculado, en comparación con la elongación a la rotura.

3.1.3 Caracterización del bio-composite mediante espectroscopía ATR-FTIR

En la Figura 3.6 se presenta el espectro infrarrojo obtenido mediante espectroscopía ATR-FTIR de una muestra de bio-composite elaborado con la Formulación 1. Se empleó un refuerzo vegetal compuesto por fibra de raquis y cuesco de palma (*Elaeis guineensis*) en una proporción 10:90. A través del espectro se pueden observar los grupos funcionales que componen la estructura química del bio-composite, el cual presenta una matriz polimérica formada por una mezcla de almidón termoplástico y acetato de polivinilo, un refuerzo lignocelulósico, además de glicerol añadido como agente plastificante.

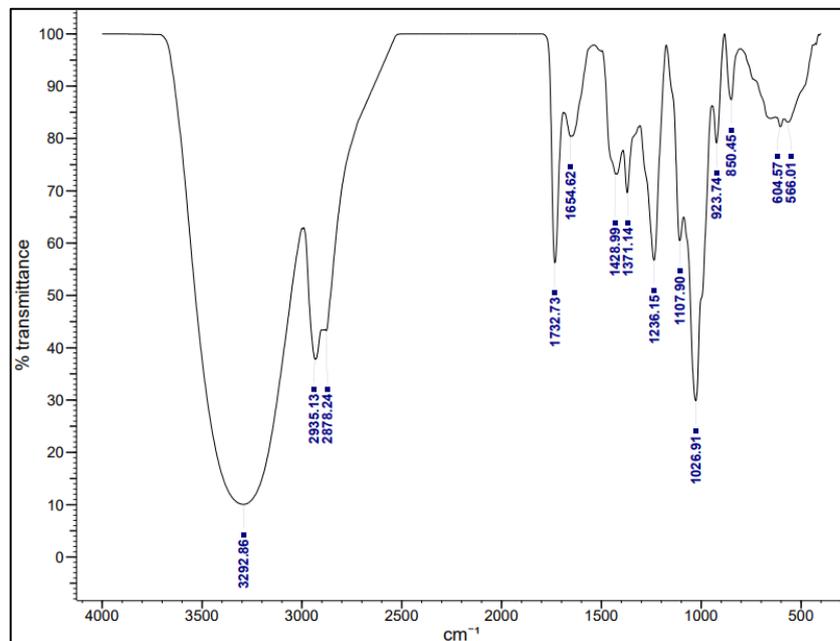


Figura 3.6. Espectro infrarrojo del bio-composite elaborado con una proporción de fibra:cuesco de 10:90 en el refuerzo.

En el espectro se presentan bandas de absorción en las zonas del infrarrojo cuyo número de onda se resumen en la Tabla 3.4. Se puede observar la presencia de bandas de absorción en 1428,99, 1236,15, 2935,13 y 1732,73 cm^{-1} , que de acuerdo con Jaganathan et al. (2018) corresponderían a las vibraciones de estiramiento de los enlaces O-H, C-O-C, C-H y C=O que están presentes en la estructura química de las unidades fenilpropanoides que conforman la lignina.

La banda de absorción de alta intensidad que se localiza en torno a 3296,86 cm^{-1} se asigna a las vibraciones de estiramiento del enlace O-H de los grupos hidroxilo que se pueden encontrar en polisacáridos como la celulosa, hemicelulosa, el almidón y también en alcoholes como el glicerol, así como también enlaces de hidrógeno intermoleculares entre la celulosa y la lignina, al igual que las moléculas de agua que las fibras son capaces de absorber por su carácter hidrofílico (Moraes et al., 2017). De la misma manera, las bandas de absorción de 2935,13 y 2878,24 cm^{-1} se corresponden con las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H de los grupos $-\text{CH}_2$ y $-\text{CH}_3$ presentes en los polisacáridos, el glicerol y PVAc usados como componentes del bio-composite. La banda de absorción localizada en 1654,62 cm^{-1} está asociada a las vibraciones de los enlaces C=O presente en los grupos carbonilo de la lignina y el PVAc. Así mismo la banda de absorción de 1107,90 cm^{-1} se asigna a las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-O presente en los enlaces glucosídicos del almidón, celulosa y hemicelulosa (Goliszek & Podkościelna, 2019). Las vibraciones de estiramiento del enlace C-C, propios del anillo aromático de la lignina, se evidencia a través de la banda de absorción que aparece en 850,45 cm^{-1} , mientras que la banda de absorción en torno a 1654,62 cm^{-1} corresponde a las vibraciones de flexión del enlace O-H que está presente en el agua absorbida por el bio-composite (Balaji et al., 2020).

Tabla 3.4. Valores de frecuencia e intensidad de las bandas de absorción infrarroja en el espectro ATR-FTIR del bio-composite con relación fibra/cuesco igual a 10:90 en el refuerzo.

Número de onda [cm^{-1}]	Intensidad
566,01	8,04
604,57	8,49
850,45	5,85
923,74	10,18

1026,91	52,61
1107,90	21,91
1236,15	24,68
1371,14	15,76
1428,99	13,59
1654,62	9,49
1732,73	25,07
2878,24	36,47
2935,13	42,36
3296,86	100,00

La banda de absorción que se presenta en $1732,73\text{ cm}^{-1}$ se atribuye a los grupos acetilo y éster de la hemicelulosa presente en los refuerzos lignocelulósicos empleados, aunque también se puede relacionar con la vibración de estiramiento del enlace C=O presente en el ácido carboxílico de la lignina. Mientras que la banda de $1236,15\text{ cm}^{-1}$ corresponde a la vibración de estiramiento del enlace C-O fuera del plano generada por el grupo arilo de la lignina (Owi et al., 2017).

La banda de absorción de $1428,99\text{ cm}^{-1}$ indica la presencia de las vibraciones de estiramiento generado por los anillos aromáticos que forman parte de la estructura química de la lignina. Por otro lado, la banda de $1026,91\text{ cm}^{-1}$ se asocia a las vibraciones de flexión originadas por el enlace C-O presente en los grupos alcohol de la lignina, de la misma manera, también se observa una banda de absorción correspondiente a las vibraciones de flexión fuera del plano de este mismo grupo en $923,74\text{ cm}^{-1}$ (Smoca, 2020).

Por otro lado, la hemicelulosa presenta ácidos urónicos, como el ácido glucurónico y galacturónico que forman parte de heteropolisacáridos que componen la macromolécula. Estos ácidos se caracterizan por poseer enlaces que forman los grupos funcionales éster. La presencia de estos grupos produce la aparición de bandas en la zona entre 1700 cm^{-1} y 1800 cm^{-1} , lo cual se ve reflejado en la Figura 3.6, ya que se observan bandas en la zona de $1732,73\text{ cm}^{-1}$, que corresponderían a los ácidos urónicos de la hemicelulosa presente en el refuerzo lignocelulósico del bio-composite. Aunque también puede deberse a la presencia del grupo funcional éster que encuentra presente en el acetato de polivinilo.

Por otra parte, en la Figura 3.7 se puede observar el espectro infrarrojo del material compuesto elaborado utilizando la Formulación 2, en la que se empleó un refuerzo vegetal

compuesto por fibra de raquis y cuesco de palma en una proporción 20:80. A través del espectro se pueden observar los grupos funcionales que componen la estructura química del bio-composite.

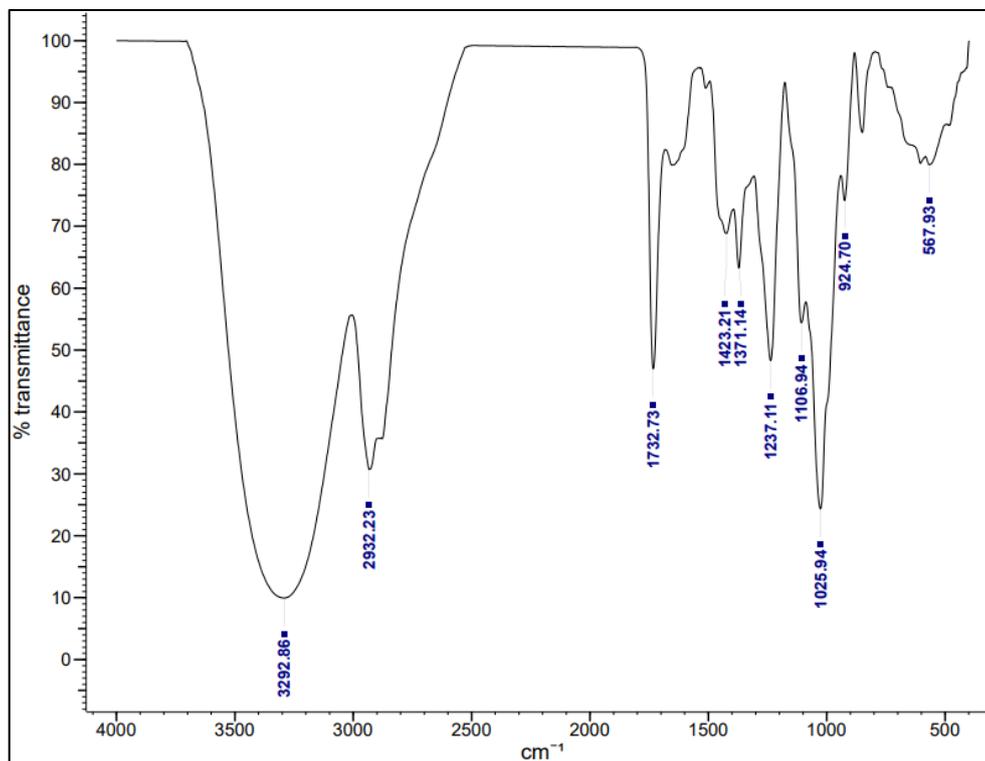


Figura 3.7. Espectro infrarrojo del bio-composite elaborado con una proporción de fibra:cuesco de 20:80 en el refuerzo.

De la misma manera en la Tabla 3.5 se presenta el número de onda de las principales bandas de absorción que se pueden encontrar en el espectro infrarrojo del bio-composite, junto con su respectiva intensidad. Si se comparan las frecuencias e intensidades de las bandas de absorción de los espectros infrarrojos obtenidos para la formulación 1 y 2 se puede notar que prácticamente la ubicación de las bandas de absorción se mantiene en ambos casos, ya que la mayor diferencia en el número de onda de las bandas de absorción es la que se presenta en torno a los 1420 cm^{-1} ya que en el espectro de la formulación 1 la banda se localiza en $1428,99\text{ cm}^{-1}$ mientras que en el espectro de la formulación 2 la misma banda se localiza en $1423,21\text{ cm}^{-1}$, existiendo una diferencia de $5,78\text{ cm}^{-1}$.

Esta similitud en los resultados ocurre debido a que en ambas formulaciones se utilizaron los mismos componentes, por lo que se espera que no exista un cambio significativo en la presencia de los grupo funcionales de cada componente empleado, aunque la interacción entre componentes si puede generar variaciones en la intensidad de las bandas, ya que en la interacción entre fibra y matriz se produce la formación y desaparición de enlaces entre

los componentes de la matriz, por lo que la disminución en el número de enlaces o el aumento de un tipo de enlaces puede generar que se produzca una mayor o menor absorción de la radiación infrarroja en la región del espectro correspondiente a esos enlaces nuevos (Smoca, 2020).

Si se analiza la diferencia de intensidad entre ambos espectros se puede notar que no se presentó una diferencia considerable en la intensidad de las bandas de absorción, ya que la mayor diferencia en la intensidad de las bandas ocurre entre las bandas localizadas alrededor de 2930 cm^{-1} , ya que en la formulación 1 la banda se localiza en $2935,13\text{ cm}^{-1}$ y presenta una intensidad de 42,36, mientras que en el espectro de la formulación 2 la banda se localiza en $2932,23\text{ cm}^{-1}$ con una intensidad de 50,99, siendo la diferencia de intensidad entre ambos picos igual a 8,63. Sin embargo, en todas las bandas de absorción ocurrió un aumento en la intensidad, este aumento en la intensidad puede estar asociado con la existencia de una mayor interacción entre la fibra y la matriz, ya que en la formulación 2 se aumentó la cantidad de fibra añadida y se redujo la cantidad de cuesco, como se mencionó anteriormente, las ceras y grasas presentes en el cuesco impiden una correcta unión entre el refuerzo y la matriz, además de que las partículas de cuesco tienden a aglomerarse en torno a las fibras, impidiendo que estas se unan apropiadamente a la matriz (Srikanth et al., 2021). Además, debido al contenido de celulosa elevado presente en las fibras de raquis, se favorece la generación de enlaces hidrógeno debido a la presencia de grupos OH presentes en la celulosa, y que pueden interactuar con los grupos hidrofílicos de los otros componentes del bio-composite, además de que estos enlaces también aparecen debido a la absorción de humedad del ambiente.

Tabla 3.5. Valores de frecuencia e intensidad de las bandas de absorción infrarroja en el espectro ATR-FTIR del bio-composite con relación fibra/cuesco igual a 20:80 en el refuerzo.

Número de onda [cm^{-1}]	Intensidad
567,93	8.89
924,70	12.24
1025,94	60.63
1106,94	25.74
1237,11	30.94
1371,14	19.26

1423,21	15.59
1732,73	32.28
2932,23	50.99
3292,86	100

3.2 Conclusiones

Se elaboraron 2 tipos de bio-composites a partir de distintas proporciones de fibra de raquis y cuesco de palma en el refuerzo, 10:90 y 20:80. Las condiciones de procesamiento del bio-composite se eligieron a través de ensayos experimentales en los que se obtuvo que una temperatura de procesamiento adecuado es 130 °C y se debía utilizar fibra de raquis de palma de tamaño malla 45-50, ya que se buscó priorizar la obtención de un material con una sinergia efectiva entre la matriz y el refuerzo.

A través del ensayo mecánico de tracción se definieron los valores de las propiedades mecánicas de resistencia a la tracción, módulo de elasticidad, porcentaje de elongación a la rotura y tenacidad, y se determinó la influencia que el cambio en la proporción de fibra de raquis y cuesco de palma ejerce sobre cada una de las propiedades antes mencionadas. Se estableció que un aumento en la cantidad de fibra de raquis en el refuerzo produce un incremento en el módulo de elasticidad y resistencia a la tracción, pero una disminución en el porcentaje de elongación a la rotura y tenacidad del material. Este fenómeno podría estar asociado con el aumento de la rigidez del material como resultado de la adición de fibra.

El aumentar la proporción de fibra en el refuerzo permitió conseguir un incremento en el módulo de elasticidad de 80,187 MPa a 110,397, al igual que la resistencia a la tracción que pasó de 1,147 MPa a 1,177 MPa. Este aumento se relacionó con el incremento en la rigidez del composite y con la mejora en la dispersión del refuerzo en la matriz polimérica.

La tenacidad disminuyó de 0,05642 MPa a 0,04456 MPa con el cambio de composición del refuerzo, mientras que el porcentaje de elongación a la rotura se redujo de 5,977 % a 4,605 %. Esta reducción se relacionó con el aumento de la rigidez del bio-composite y con una inadecuada interacción entre el refuerzo y la matriz debido a una cantidad excesiva de cuesco de palma que produjo aglomeraciones del material de refuerzo.

Se identificaron los grupos funcionales característicos de los componentes lignocelulósicos del refuerzo del bio-composite, al igual que del almidón, acetato de polivinilo y glicerol que integraron la matriz polimérica. Estos grupos funcionales se asociaron a las bandas de absorción presentes en el espectro infrarrojo obtenido mediante espectroscopía FTIR.

Al analizar el efecto que el cambio en la composición del refuerzo tuvo sobre la caracterización FT-IR de los composites elaborados, se encontró que la ubicación de las bandas de absorción asociados a los grupos funcionales de los componentes del bio-composite se mantuvieron, pero se produjeron aumentos en la intensidad de estas bandas al adicionar un mayor contenido de fibra de raquis de palma. Este resultado se explica debido a que se favoreció la generación de enlaces intermoleculares entre el refuerzo y la matriz, principalmente enlaces hidrógeno, debido a la compatibilidad que existía entre la celulosa y almidón presentes en el refuerzo y matriz respectivamente.

3.3 Recomendaciones

Resulta recomendable evaluar un intervalo más amplio de cambios en la composición de fibras de raquis y cuesco de palma presentes en el refuerzo, para así mejorar el análisis de la influencia del cambio de la composición del refuerzo en las propiedades mecánicas del bio-composite.

Realizar un pretratamiento de las fibras de raquis y cuesco de palma para optimizar la compatibilidad entre la matriz polimérica de naturaleza hidrofóbica y lo refuerzos vegetales de naturaleza hidrofílica. Además de eliminar compuestos químicos no deseados como ceras y grasas que interfieren en la compatibilidad entre refuerzo y matriz.

Complementar el análisis de espectroscopía FTIR y ensayos mecánicos de tracción con un análisis de microscopía electrónica, con la finalidad de observar la distribución de la fibra de raquis y cuesco de palma en la matriz, así como también analizar la formación de aglomeraciones y espacios huecos en la estructura interna del bio-composite.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdullah, M. Z., & Aslan, N. H. C. (2019). Performance evaluation of composite from recycled polypropylene reinforced with mengkuang leaf fiber. *Resources*, 8(2), 97. <https://doi.org/10.3390/resources8020097>
- Adnan, S. A., Ranjandin, A. N., Osman, A. F., Ibrahim, I., Di Sheng, L., Zaidi, N. H. A., & Leman, M. H. (2021). Mechanical properties of thermoplastic starch/oil palm empty fruit bunch biocomposite film. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/5.0044668>
- Alias, N. F., Ismail, H., Wahab, M. K. A., Santiagoo, R., Ardhyanta, H., & Ting, S. S. (2018). Development of new material based on polyvinyl Alcohol/Palm kernel shell powder biocomposites. *Advances In Environmental Studies*, 2(2). <https://doi.org/10.36959/742/208>
- AL-Oqla, F., & Salit, M. (2017). *Materials Selection for Natural Fiber Composites* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04877-8>
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7.^a ed.).
- Awais, H., Nawab, Y., Amjad, A., Anjang, A., Akil, H. M., & Abidin, M. J. Z. (2021). Environmental benign natural fibre reinforced thermoplastic composites: A review. *Composites Part C: Open Access*, 4, 100082. <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2020.100082>
- Baffour-Awuah, E., Akinlabi, S. A., Jen, T., Hassan, S. B., Okokpujie, I. P., & Ishola, F. (2021). Characteristics of palm kernel shell and palm kernel Shell-Polymer composites: a review. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1107(1), 012090. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1107/1/012090>
- Bahrami, M., Abenójar, J., & MartíNez, M. Á. (2020). Recent progress in hybrid biocomposites: mechanical properties, water absorption, and flame retardancy. *Materials*, 13(22), 5145. <https://doi.org/10.3390/ma13225145>
- Baillie, C., & Jayasinghe, R. (Eds.). (2017). *Green Composites: Waste and Nature-based Materials for a Sustainable Future* (2.^a ed.). <https://www.sciencedirect.com/book/9780081007839/green-composites>
- Balaji, A., Udhayasankar, R., Karthikeyan, B., Swaminathan, J., & Purushothaman, R. (2020). Mechanical and thermal characterization of bagasse fiber/coconut shell particle hybrid biocomposites reinforced with cardanol resin. *Results In Chemistry*, 2, 100056. <https://doi.org/10.1016/j.rechem.2020.100056>

- Bangar, S. P., & Whiteside, W. S. (2021). Nano-cellulose Reinforced Starch Bio Composite Films- A review on Green Composites. *International Journal Of Biological Macromolecules*, 185, 849-860. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.017>
- Benkhelladi, A., Laouici, H., & Bouchoucha, A. (2020). Tensile and flexural properties of polymer composites reinforced by flax, jute and sisal fibres. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 108(3), 895-916. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05427-2>
- Biswas, E., Silva, J. A. C., Khan, M. R., & Quirino, R. L. (2022). Synthesis and properties of Bio-Based composites from vegetable oils and starch. *Coatings*, 12(8), 1119. <https://doi.org/10.3390/coatings12081119>
- Catto, A. L., Júnior, M. A. D., Hansen, B., Francisquetti, E. L., & Borsoi, C. (2019). Characterization of polypropylene composites using yerba mate fibers as reinforcing filler. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106935. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106935>
- Chang, S. H. (2014). An overview of empty fruit bunch from oil palm as feedstock for bio-oil production. *Biomass And Bioenergy*, 62, 174-181. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.002>
- Cheng, T. S., Lan, D. N. U., Phillips, S., & Tran, L. Q. N. (2018). Characteristics of oil palm empty fruit bunch fiber and mechanical properties of its unidirectional composites. *Polymer Composites*, 40(3), 1158-1164. <https://doi.org/10.1002/pc.24824>
- Corporación Financiera Nacional. (2023, noviembre). *Ficha Sectorial Palma Africana*. Corporación Financiera Nacional. Recuperado 11 de febrero de 2024, de <https://www.cfn.fin.ec/wp-content/uploads/downloads/biblioteca/2023/fichas-sectoriales-4-trimestre/Ficha-Sectorial-Palma-Africana.pdf>
- Da Silva, F. S., Luna, C. B. B., Siqueira, D. D., Da Silva Barbosa Ferreira, E., & Araújo, E. M. (2021). From Waste to Reuse: Manufacture of Ecological Composites Based on Biopolyethylene/wood Powder with PE-g-MA and Macaíba Oil. *Journal Of Polymers And The Environment*, 30(3), 1028-1044. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02256-6>
- Dhawale, P. V., Vineeth, S. K., Gadhave, R. V., & Mahanwar, P. A. (2021). Cellulose Stabilized Polyvinyl Acetate Emulsion: review. *Open Journal Of Organic Polymer Materials*, 11(02), 51-66. <https://doi.org/10.4236/ojopm.2021.112002>
- Díaz, M. O., Rojas, D. S. R., Rosales, E. G., Meza, J. K. S., & Yepes, D. O. (2022). Materiales compuestos de fibras naturales y polímero reciclados: mezclas, pretratamientos, agentes de acople y propiedades mecánicas. - Una revisión. *Avances*, 19(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.7579>

- Dong, Y., Ghataura, A., Takagi, H., Haroosh, H., Nakagaito, A. N., & Lau, K. (2014). Polylactic acid (PLA) biocomposites reinforced with Coir fibres: Evaluation of mechanical performance and multifunctional properties. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 63, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2014.04.003>
- Edebali, S. (2021). Methods of engineering of biopolymers and biocomposites. En *Elsevier eBooks* (pp. 351-357). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819988-6.00015-x>
- Farahani, G. N., Ahmad, I., & Mosadeghzad, Z. (2012). Effect of fiber content, fiber length and alkali treatment on properties of KENAF Fiber/UPR composites based on recycled PET wastes. *Polymer-plastics Technology And Engineering*, 51(6), 634-639. <https://doi.org/10.1080/03602559.2012.659314>
- Gesteiro, E., Guijarro, L., Sánchez-Muniz, F. J., Del Carmen Vidal-Carou, M., Troncoso, A. M., Venanci, L., Jimeno, V., Quílez, J., Anadón, A., & González-Gross, M. (2019). Palm Oil on the Edge. *Nutrients*, 11(9), 2008. <https://doi.org/10.3390/nu11092008>
- Girimurugan, R., Saravanan, K., Manickavasagam, P., Gurunathan, G., & Vairavel, M. (2021). *Experimental Studies on Water Absorption Behaviour of Treated and Untreated Hybrid Bio-Composites* (Vol. 1059). <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1059/1/012017>
- Goh, K., Thomas, S., De Silva, R., & Aswathi, M. K. (Eds.). (2020). *Interfaces in Particle and Fibre Reinforced Composites. Current Perspectives on Polymer, Ceramic, Metal and Extracellular Matrices* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/C2017-0-03930-7>
- Goliszek, M., & Podkościelna, B. (2019). Synthesis and characterization of polymer biocomposites with lignin. *Physicochemical Problems Of Mineral Processing*, 55(6), 1375-1381. <https://doi.org/10.5277/ppmp19055>
- Gutiérrez, H., & Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos* (3.^a ed.).
- Hameed, M., Abdul, M., Mohd, M., Azmi, A., & Saba, N. (Eds.). (2021). *Biocomposite Materials: Design and Mechanical Properties Characterization* (1.^a ed.).
- Ike-Eze, I. C. E., Uyor, U. O., Aigbodion, V., Omah, A. D., Ude, S., & Daniel-Nkpume, C. C. (2019). Tensile and compressive strength of palm kernel shell particle reinforced polyester composites. *Materials Research Express*, 6(11), 115335. <https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab4afa>
- Inamuddin, & Tariq Altalhi (Eds.). (2022). *Handbook of Bioplastics and Biocomposites Engineering Applications* (2.^a ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119160182>
- Jaganathan, G., Manivannan, K., Lakshmanan, S., & Sithique, M. A. (2018). Fabrication and characterization of Artocarpus heterophyllus waste derived lignin added

- chitosan biocomposites for wound dressing application. *Sustainable Chemistry And Pharmacy*, 10, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2018.08.002>
- Jawaid, M., Tahir, P., & Saba, N. (Eds.). (2017). *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials. Processing, Properties and Applications* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04050-3>
- Jawaid, M., Thariq, M., & Saba, N. (Eds.). (2019). *Mechanical and Physical Testing of Biocomposites, Fibre-Reinforced Composites and Hybrid Composites* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/C2016-0-04437-6>
- Kandemir, A., Longana, M. L., Panzera, T. H., Del Pino, G. G., Hamerton, I., & Eichhorn, S. J. (2021). Natural fibres as a sustainable reinforcement constituent in aligned discontinuous polymer composites produced by the HIPERDIF method. *Materials*, 14(8), 1885. <https://doi.org/10.3390/ma14081885>
- Krishnasamy, S., Nagarajan, R., Kumar Thiagamani, S., & Siengchin, S. (Eds.). (2021). *Mechanical and Dynamic Properties of Biocomposites* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1002/9783527822331>
- Kumar, S., Prasad, L., Patel, V. K., Kumar, V., Kumar, A., Yadav, A., & Winczek, J. (2021). Physical and Mechanical Properties of Natural Leaf Fiber-Reinforced Epoxy Polyester Composites. *Polymers*, 13(9), 1369. <https://doi.org/10.3390/polym13091369>
- Lai, O., Tan, C., & Akoh, C. (Eds.). (2012). *Palm Oil: Production, Processing, Characterization, and Uses* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/c2015-0-02411-x>
- Lasikun, Ariawan, D., Surojo, E., & Triyono, J. (2018). Effect of fiber orientation on tensile and impact properties of Zalacca Midrib fiber-HDPE composites by compression molding. *AIP Conference Proceedings*. <https://doi.org/10.1063/1.5024119>
- Latif, R., Wakeel, S., Khan, N. Z., Siddiquee, A. N., Verma, S. L., & Khan, Z. A. (2018). Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal Of Reinforced Plastics And Composites*, 38(1), 15-30. <https://doi.org/10.1177/0731684418802022>
- Mahdi, E., Ochoa, D. R. H., Vaziri, A., Dean, A., & Küçükvar, M. (2021). Khalasa date palm leaf fiber as a potential reinforcement for polymeric composite materials. *Composite Structures*, 265, 113501. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113501>
- Mahlia, T., Ismail, N., Hossain, N., Silitonga, A., & Shamsuddin, A. H. (2019). Palm oil and its wastes as bioenergy sources: a comprehensive review. *Environmental Science And Pollution Research*, 26(15), 14849-14866. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-04563-x>

- Misra, M., Pandey, J., & Mohanty, A. (Eds.). (2015). *Biocomposites: Design and Mechanical Performance* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1016/c2014-0-02693-7>
- Moraes, A. R. F. E., Pola, C. C., Bilck, A. P., Yamashita, F., Tronto, J., Medeiros, É. A. A., & De Fátima Ferreira Soares, N. (2017). Starch, cellulose acetate and polyester biodegradable sheets: Effect of composition and processing conditions. *Materials Science And Engineering: C*, 78, 932-941. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2017.04.093>
- Muthuraj, R., Misra, M., Defersha, F. M., & Mohanty, A. K. (2016). Influence of processing parameters on the impact strength of biocomposites: A statistical approach. *Composites Part A: Applied Science And Manufacturing*, 83, 120-129. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.09.003>
- Nayak, S. K., Dixit, G., & Kuttan, K. K. A. (2013). Mechanical properties of eco-friendly recycled polymer composites: A comparative study of theoretical and experimental results. *International Journal Of Plastics Technology*, 17(1), 75-93. <https://doi.org/10.1007/s12588-013-9050-z>
- Ninduangdee, P., Kuprianov, V. I., Young, E., Kaewrath, R., Youngyuen, P., & Atthawethworawuth, W. (2015). Thermogravimetric Studies of Oil Palm Empty Fruit Bunch and Palm Kernel Shell: TG/DTG Analysis and Modeling. *Energy Procedia*, 79, 453-458. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.518>
- Noah, A. S. (2022). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB) – Alternative Fibre Source for Papermaking. En *IntechOpen eBooks*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.98256>
- Owi, W. T., Ong, H. L., Sam, S. T., Villagracia, A. R., & Santos, G. N. C. (2017). Tapioca Starch Based Green Nanocomposites with Environmental Friendly Cross-linker. *DOAJ (DOAJ: Directory Of Open Access Journals)*. <https://doi.org/10.3303/cet1756078>
- Prasad, L., Kumar, S., Patel, R. V., Yadav, A., Kumar, V., & Winczek, J. (2020). Physical and mechanical behaviour of sugarcane bagasse Fibre-Reinforced Epoxy Bio-Composites. *Materials*, 13(23), 5387. <https://doi.org/10.3390/ma13235387>
- Praveena, B. A., Lakshmikanthan, A., Chandrashekarappa, M. P. G., Selvan, C. P., Pimenov, D. Y., & Giasin, K. (2022). Experimental Investigation of Effect of Fiber Length on Mechanical, Wear, and Morphological Behavior of Silane-Treated Pineapple Leaf Fiber Reinforced Polymer Composites. *Fibers*, 10(7), 56. <https://doi.org/10.3390/fib10070056>
- Rieger, B., Künkel, A., Coates, G., Reichardt, R., Dinjus, E., & Zevaco, T. (Eds.). (2012). *Synthetic Biodegradable Polymers* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-642-27154-0>

- Robledo-Ortíz, J. R., González-López, M. E., Rodrigue, D., Gutiérrez-Ruiz, J. F., Prezas-Lara, F., & Pérez-Fonseca, A. A. (2020). Improving the Compatibility and Mechanical Properties of Natural Fibers/Green Polyethylene Biocomposites Produced by Rotational Molding. *Journal Of Polymers And The Environment*, 28(3), 1040-1049. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01667-1>
- Romero-Ocaña, I., & Molina, S. I. (2022). Cork photocurable resin composite for stereolithography (SLA): Influence of cork particle size on mechanical and thermal properties. *Additive Manufacturing*, 51, 102586. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102586>
- Sapuan, S. M., Sahari, J., Ishak, M. Y., & Sanyang, M. L. (2018). Sugar palm biofibers, biopolymers, and biocomposites. En *CRC Press eBooks*. <https://doi.org/10.1201/9780429443923>
- Sarjadi, M. S., Aziz, S. A., & Rahman, M. L. (2018). Effect of seawater treatment on the mechanical properties of oil palm empty fruit bunch fibre/Poly(vinyl alcohol) composites. *ASM Science Journal*, 11(2), 87-94.
- Skoog, D., Holler, F. J., & Crouch, S. (2018). *Principios de análisis instrumental* (7.^a ed.).
- Smoca, A. (2020). FTIR spectroscopy analysis of PLA biocomposites reinforced with hemp fibers. *Key Engineering Materials*, 850, 112-117. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.850.112>
- Solano, A. C. V., & De Gante, C. R. (2014). Development of biodegradable films based on blue corn flour with potential applications in food packaging. Effects of plasticizers on mechanical, thermal, and microstructural properties of flour films. *Journal Of Cereal Science*, 60(1), 60-66. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2014.01.015>
- Srikanth, V., Reddy, K. R. N., & Rao, D. K. (2021). Bio-Composites: A Study On Behavior Of Oil Palm Mesocarp Fiber Reinforced Kgg. *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 1123(1), 012005. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1123/1/012005>
- Thomas, S., Joseph, K., Malhotra, S., Goda, K., & Sreekala, M. S. (2013). *Polymer composites* (Vol. 3). <https://doi.org/10.1002/9783527674220>
- Torres, L., Vasilievna, O., & Ildusovich, B. (Eds.). (2019). *Handbook of Ecomaterials* (1.^a ed.). <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68255-6>
- United States Department of Agriculture's. (2024, febrero). *Palm Oil 2023 World Production*. USDA Foreign Agricultural Service. Recuperado 11 de febrero de 2024, de https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?startrow=1&cropid=4243000&sel_year=2023&rankby=Production

- Uyor, U. O., Omah, A. D., Aigbodion, V., Ezema, I. C., & Nwoke, O. A. (2019). Effects of carbonized particles on microstructure and mechanical properties of epoxy resin. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 103(9-12), 4283-4292. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03869-x>
- Wang, S., Zhang, P., Li, Y., Li, J., Li, X., Yang, J., Ji, M., Li, F., & Zhang, C. (2023). Recent advances and future challenges of the starch-based bio-composites for engineering applications. *Carbohydrate Polymers*, 307, 120627. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120627>
- Yaghoobi, H., & Fereidoon, A. (2019). Preparation and characterization of short KENAF fiber-based biocomposites reinforced with multi-walled carbon nanotubes. *Composites Part B: Engineering*, 162, 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.015>
- Yahayu, M., Abas, F. Z., Zulkifli, S. E., & Ani, F. N. (2017). Utilization of oil palm fiber and palm kernel shell in various applications. En *Springer eBooks* (pp. 45-56). https://doi.org/10.1007/978-981-10-5062-6_4
- Zadeh, K. M., Inuwa, I. M., Arjmandi, R., Hassan, A., Al-Maadeed, S., Mohamad, Z., & Khanam, P. N. (2017). Effects of date palm leaf fiber on the thermal and tensile properties of recycled Ternary polyolefin blend composites. *Fibers And Polymers*, 18(7), 1330-1335. <https://doi.org/10.1007/s12221-017-1106-9>
- Zadeh, K. M., Ponnamma, D., & Al-Maadeed, S. (2017). Date Palm Fibre filled recycled Ternary polymer blend composites with enhanced flame retardancy. *Polymer Testing*, 61, 341-348. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2017.05.006>
- Zahan, K. A., & Kano, M. (2018). Biodiesel Production from Palm Oil, Its By-Products, and Mill Effluent: A Review. *Energies*, 11(8), 2132. <https://doi.org/10.3390/en11082132>
- Zuccarello, B., Marannano, G. V., & Mancino, A. (2018). Optimal manufacturing and mechanical characterization of high performance biocomposites reinforced by sisal fibers. *Composite Structures*, 194, 575-583. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.04.007>
- Zwick Roell Group. (s. f.). *ASTM D638: Tensile Properties Plastics*. ZwickRoell. <https://www.zwickroell.com/industries/plastics/thermoplastics-and-thermosetting-molding-materials/tensile-properties-astm-d638/>

5 ANEXOS

ANEXO I. PROPIEDADES MECÁNICAS EVALUADAS PARA LOS 2 TIPOS DE BIO-COMPOSITES ELABORADOS

Tabla 5.1. Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas mediante un ensayo de tracción del composite elaborado con una relación de fibra/cuesco igual a 10:90 en el refuerzo

Probeta	Módulo de elasticidad [Mpa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Tenacidad [MPa]
1	66.310	1.040	6.840	0.05943
2	78.910	1.140	5.960	0.05536
3	87.850	1.150	5.350	0.04990
4	71.170	1.060	5.670	0.04872
5	96.430	1.190	5.510	0.05418
6	82.540	1.130	5.940	0.05586
7	71.120	1.170	5.350	0.05017
8	79.870	1.140	6.170	0.05869
9	93.640	1.250	5.930	0.06154
10	69.610	1.210	6.610	0.06593
11	102.890	1.180	5.120	0.04951
12	69.480	1.180	7.090	0.06957
13	77.870	1.120	6.140	0.05691
14	78.420	1.110	5.730	0.05200
15	76.690	1.130	6.250	0.05846
Mean	80.187	1.147	5.977	0.05642
S.D	10.788732	0.054072262	0.56191594	0.00611084

Tabla 5.2. Resultados de las propiedades mecánicas evaluadas mediante un ensayo de tracción del composite elaborado con una relación de fibra/cuesco igual a 20:80 en el refuerzo

Probeta	Módulo de elasticidad [Mpa]	Resistencia a la tracción [MPa]	Elongación a la rotura [%]	Tenacidad [Mpa]
1	101.26	1.17	4.66	0.04524
2	80.320	0.970	3.780	0.02849
3	126.320	1.260	5.080	0.05373
4	144.810	1.230	4.430	0.04563
5	104.570	1.100	3.500	0.03010
6	112.090	1.150	4.930	0.04719
7	93.490	1.230	4.980	0.05008
8	111.430	1.100	4.250	0.03798
9	119.550	1.110	4.480	0.04117
10	100.130	1.230	5.000	0.05014
11	127.010	1.180	3.970	0.03785
12	108.180	1.260	5.130	0.05105
13	103.470	1.180	5.650	0.05623
14	112.970	1.270	4.400	0.04533
15	110.35	1.22	4.83	0.04812
Mean	110.397	1.177	4.605	0.04456
S.D	15.29318834	0.081369235	0.57123759	0.00807529