

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de platos de un solo uso a partir de fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) residual a escala laboratorio

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

José Salvador Cordón Girón

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2024

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería



Producción de platos de un solo uso a partir de fibra de palma africana (*Elaeis guineensis*) residual a escala laboratorio

Trabajo de graduación en modalidad de tesis presentado por

José Salvador Cordón Girón

para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Química Industrial

Guatemala,

2024

Vo. Bo.

(f) 
Ing. María José Ramos Valdés

Tribunal examinador

(f) 
Ing. María José Ramos Valdés

(f) 
Ing. Carmen Alicia Ortiz Pineda

(f) 
Ing. Gamaliel Giovanni Zambrano Ruano

Fecha de aprobación del examen de graduación:

Guatemala, diciembre 12 del 2024.

PREFACIO

Mi mayor honra y agradecimiento a Dios, el motor de mi vida y la razón para cada día dar lo mejor de mí en todas mis actividades. Sin Él, este trabajo de graduación no se habría completado.

Mis padres, Manuel Salvador y Ana Ileana, y mi hermano, Diego José, que me duren para siempre porque por ellos estoy a pocos pasos de ser ingeniero y para ellos estoy esforzándome para ser el mejor.

Mis mejores amigos de la Universidad, María Celeste, Dary Michelle, Isabella, Lucía María, Jose Carlo, Diego Roberto y Reynaldo Gaspar Raymundo, que me apoyaron en cada semestre con cada curso en ámbitos académicos como de ocio, para que hoy, con mucha felicidad, pueda entregar mi trabajo de graduación.

Mis mejores amigas de la vida, Paula Cristina, Sofía Abigail y Daniela, que me oyeron y abrazaron cuando más lo necesitaba y me aconsejaron con amor para que no desistiera. Por eso y más, les agradezco su amistad incondicional.

Agradezco a la asesora de este trabajo de graduación, MSc. Ing. María José Ramos Valdés, por su apoyo técnico y emocional para que esta entrega esté al nivel académico que se merece. Gracias por la paciencia y comprensión.

Finalmente, pero no menos apreciado, le agradezco a personas que conocí en mi travesía universitaria, profesional y social, Luis Fernando y María José. No se aparten de mí aunque nuestros caminos se dirijan a direcciones contrarias.

ÍNDICE

PREFACIO.....	V
LISTA DE CUADROS.....	IX
LISTA DE FIGURAS.....	X
LISTA DE CÁLCULOS.....	XI
RESUMEN.....	XII
I. INTRODUCCIÓN	1
II. JUSTIFICACIÓN	3
III. OBJETIVOS	4
A. GENERAL	4
B. ESPECÍFICOS	4
IV. MARCO TEÓRICO.....	5
A. ACEITE DE PALMA AFRICANA.....	5
1. SUBPRODUCTOS DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA.....	6
B. FIBRA DE PALMA AFRICANA	7
1. CELULOSA	8
2. HEMICELULOSA	9
3. LIGNINA.....	9
C. ECONOMÍA CIRCULAR	10
1. CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS	11
2. REVALORIZACIÓN DE MATERIALES.....	12
D. PLATOS DE UN SOLO USO.....	13
E. FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA PLATOS.....	16
F. POLÍMEROS	17
G. PARAFINA COMO CAPA HIDROFÓBICA DEL PLATO DE UN SOLO USO	19
H. PROCESOS DE PRODUCCIÓN	20
1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO.....	20
2. DIGESTIÓN QUÍMICA.....	22
3. HIDRÓLISIS	23
4. PRENSADO HIDRÁULICO	24
5. SECADO	24
6. MOLDEO	25
I. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA	27

J.	DIAGRAMA DE PROCESOS	34
V.	ANTECEDENTES.....	36
VI.	METODOLOGÍA	39
A.	PRIMERA FASE: CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA.....	39
1.	RECEPCIÓN DE MATERIA PRIMA.....	39
2.	CONTENIDO DE HUMEDAD	40
3.	PORCENTAJE DE CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA	40
4.	TAMAÑO DE PARTÍCULA	40
B.	SEGUNDA FASE: ELABORACIÓN DE PLATOS.....	41
1.	TRATAMIENTO MECÁNICO	41
2.	TRATAMIENTO QUÍMICO.....	42
3.	ELABORACIÓN DE MOLDE	42
4.	ELABORACIÓN DE MEZCLA	42
5.	MOLDEO DEL PLATO	42
6.	RECUBRIMIENTO DE PARAFINA.....	43
C.	TERCERA FASE: CARACTERIZACIÓN DEL PLATO.....	43
1.	COLOR DEL PLATO.....	44
2.	DIMENSIONES DEL PLATO	44
3.	MASA POR PLATO.....	44
4.	pH DEL PLATO.....	44
5.	DENSIDAD.....	44
6.	ABSORCIÓN DE AGUA EN EL PLATO (PRUEBA DE HUMECTACIÓN).....	44
7.	TEMPERATURA MÁXIMA DE UTILIZACIÓN.....	44
8.	RESISTENCIA MECÁNICA.....	44
D.	CUARTA FASE: DIAGRAMA DEL PROCESO	45
1.	DEFINICIÓN DE BLOQUES.....	45
2.	BALANCE DE MASA.....	45
3.	BALANCE DE ENERGÍA.....	45
4.	DIAGRAMA DEL PROCESO	45
E.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO	45
VII.	RESULTADOS	47
VIII.	ANÁLISIS DE RESULTADOS	51
IX.	CONCLUSIONES	56
X.	RECOMENDACIONES	58
XI.	BIBLIOGRAFÍA.....	60

XII.	ANEXOS	64
A.	DATOS ORIGINALES	64
B.	CÁLCULOS DE MUESTRA	70
C.	DATOS CALCULADOS	73
D.	ANÁLISIS DE ERROR.....	76
E.	BITÁCORA	77
XIII.	GLOSARIO.....	93

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Características físicas de la fibra residual de palma africana	47
Cuadro 2. Características químicas de la fibra residual de palma africana.....	47
Cuadro 3. Características físicas del plato de un solo uso	48
Cuadro 4. Características físicoquímicas del plato de un solo uso	48
Cuadro 5. Absorción de agua del plato de un solo uso a distintos tiempos	48
Cuadro 6. Elongación del plato de un solo uso bajo carga en el centro con apoyo en dos extremos opuestos.....	49
Cuadro 7. Elongación del plato de un solo uso bajo carga en un extremo con apoyo en el extremo opuesto	49
Cuadro 8. Largo de fibra residual de palma africana fina y de raquis	64
Cuadro 9. Porcentaje de humedad de fibra residual de palma africana fina y de raquis.....	65
Cuadro 10. Masas A, B, C para la prueba de porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina de fibra residual de palma africana fina y de raquis	66
Cuadro 11. Características físicas del plato de un solo uso elaborado.....	67
Cuadro 12. Datos para densidad (masa y volúmenes de agua), pH y temperatura máxima de utilización de los platos realizados.....	68
Cuadro 13. Datos para la prueba de humectación de distintas muestras.....	68
Cuadro 14. Elongación mecánica del plato elaborado por contener peso en su centro	69
Cuadro 15. Elongación mecánica del plato elaborado por contener peso en un extremo.....	69
Cuadro 16. Elongación mecánica de platos comerciales plásticos por contener peso en un extremo	70
Cuadro 17. Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina de fibra residual de palma africana fina y de raquis	73
Cuadro 18. Datos calculados para obtener la densidad de las diferentes muestras de plato	74
Cuadro 19. Porcentaje de absorción de agua (prueba de humectación) de las diferentes muestras de plato.....	74
Cuadro 20. Balance de masa de las operaciones necesarias para elaborar 1000 platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana	75
Cuadro 21. Energía y masa necesaria de combustible o vapor de agua para calentar y evaporar una masa de agua o parafina para los balances de masa y energía	75
Cuadro 22. Bitácora de la metodología.....	77
Cuadro 23. Costo de un plato de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana elaborado a escala laboratorio	91
Cuadro 24. Costo alternativo de un plato de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana elaborado a escala laboratorio	92

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Molécula de celulosa	9
Figura 2. Molécula de hemicelulosa	9
Figura 3. Molécula de lignina	10
Figura 4. Principio de moldeo por compresión.....	26
Figura 5. Balance de masa y energía del proceso de elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana	33
Figura 6. Diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana	35
Figura 7. Prototipo plato de un solo uso elaborado a partir de fibra residual de palma africana	47
Figura 8. Diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana para producir 1000 platos en 1 día de operación	50
Figura 9. Balance de masa y energía del proceso de elaboración de platos de un solo uso a partir de palma africana a escala laboratorio	90

LISTA DE CÁLCULOS

Cálculo 1. Porcentaje de celulosa en la fibra residual de palma africana	70
Cálculo 2. Porcentaje de hemicelulosa en la fibra residual de palma africana	70
Cálculo 3. Porcentaje de lignina en la fibra residual de palma africana	71
Cálculo 4. Volumen de agua desplazado por la introducción de una muestra del plato	71
Cálculo 5. Densidad del plato	71
Cálculo 6. Absorción de agua del plato	71
Cálculo 7. Balance de masa	72
Cálculo 8. Energía necesaria para calentar y evaporar para el balance de energía basado en la producción de 1000 platos al día.....	72
Cálculo 9. Masa de combustible o vapor necesaria para calentar y evaporar para el balance de masa basado en la producción de 1000 platos al día	72
Cálculo 10. Cálculo de muestra de propagación de error de sumas y restas para el volumen desplazado por una masa del plato de un solo uso para obtener la densidad de este	76
Cálculo 11. Cálculo de muestra de propagación de error de multiplicaciones y divisiones para la densidad del plato de un solo uso.....	76

RESUMEN

La cantidad de fibra residual de palma africana ha aumentado debido al crecimiento de cultivo de palma africana por la alta demanda de aceite de palma a nivel mundial. Por eso, esta investigación tiene como fin producir platos de un solo uso a partir de la fibra residual de palma africana a escala laboratorio, como sustituto de productos plásticos, para transformar un residuo industrial en un producto de valor. Primeramente, se determinaron propiedades de la fibra residual de palma africana fina y de raquis. Para la fibra residual fina se obtuvo $4.0 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$ de largo de la fibra, $10.480\% \pm 0.002\%$ de porcentaje de humedad, $40.74\% \pm 2.21\%$ de celulosa, $20.75\% \pm 3.05\%$ de hemicelulosa, y $38.51\% \pm 1.62\%$ de lignina. Para la fibra residual de raquis se obtuvo $6.9 \text{ cm} \pm 1.6 \text{ cm}$ de largo de la fibra, $10.690\% \pm 0.004\%$ de porcentaje de humedad, $38.35\% \pm 2.77\%$ de celulosa, $16.85\% \pm 0.49\%$ de hemicelulosa, y $44.80\% \pm 2.72\%$ de lignina. El plato de un solo uso elaborado presentó un Pantone promedio de 406 C, masa de $27.9 \text{ g} \pm 3.1 \text{ g}$, diámetro de $14.1 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$, altura de $4.4 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ y grosor de $0.35 \text{ cm} \pm 0.06 \text{ cm}$, 5.73 ± 0.07 de pH, $0.235 \text{ g/mL} \pm 0.027 \text{ g/mL}$ de densidad, 50°C de temperatura máxima de utilización, $0.334\% \pm 0.003\%$ de absorción de agua en 15 minutos de contacto, $1.33\% \pm 0.40\%$ en 30 minutos, $2.60\% \pm 0.35\%$ en 1 hora, $10.1\% \pm 0.8\%$ en 3 horas, y $17.7\% \pm 0.7\%$ en 6 horas. Al colocar 1, 2 y 3 libras en el centro del prototipo sosteniendo dos extremos opuestos, se obtuvo 0 cm , 0 cm y $0.08 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$ de elongación, respectivamente. Al colocar 1, 2, y 3 libras en un extremo del prototipo sosteniendo el extremo opuesto, se obtuvo $2.7 \text{ cm} \pm 0.2 \text{ cm}$, $4.0 \text{ cm} \pm 0.3 \text{ cm}$, y $5.2 \text{ cm} \pm 0.4 \text{ cm}$ de elongación, respectivamente. Finalmente, se propuso el diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana, el cual produce 1000 platos de un solo uso en un día a partir de 4.845 kg de fibra residual de palma africana, 0.580 kg de hidróxido de sodio, 57.436 kg de agua potable, 3.501 kg de fécula de maíz, 0.175 kg de ácido acético, 0.875 kg de glicerina y 4.100 kg de parafina. Además, se necesita de 6.865 kg de vapor de agua y 1.907 kg de diésel para suministrar el calor necesario en las distintas operaciones (101,344 kJ).

I. INTRODUCCIÓN

La palma africana (*Elaeis guineensis*) fue introducida en Guatemala en la década de 1980 como parte de los esfuerzos para diversificar la agricultura y aprovechar las condiciones climáticas favorables del país. Inicialmente, el cultivo se concentró en la región de Petén y la Costa Sur, áreas con suelos y climas adecuados para el crecimiento de esta planta. En la década de 1990, el cultivo de la palma africana comenzó a expandirse rápidamente. Esto fue impulsado por la inversión de empresas nacionales e internacionales en plantaciones y en la construcción de infraestructuras para el procesamiento del aceite de palma. Las políticas gubernamentales favorables y los incentivos económicos también jugaron un papel crucial en esta expansión (Castellanos y Tobar, 2014).

El crecimiento del cultivo de palma africana en Guatemala se vio favorecido por la alta demanda mundial de aceite de palma, utilizado tanto en la industria alimentaria como en la fabricación de productos de cuidado personal y biocombustibles. Como resultado, el área cultivada con palma africana en el país ha aumentado significativamente, convirtiéndose en una de las principales exportaciones agrícolas de Guatemala. El cultivo de la palma africana ha tenido un impacto económico considerable en Guatemala, ha generado empleo y ha contribuido al desarrollo económico de las regiones donde se cultiva. La industria del aceite de palma ha proporcionado ingresos a miles de trabajadores agrícolas y ha impulsado el crecimiento de comunidades rurales (Castellanos y Tobar, 2014).

La fibra de palma africana posee una estructura robusta y resistente debido a la celulosa, hemicelulosa y lignina que la componen. La celulosa constituye una gran parte de la fibra y proporciona rigidez y resistencia, mientras que la hemicelulosa contribuye a la estabilidad estructural. La lignina actúa como un aglutinante natural, dando rigidez adicional y resistencia a la degradación biológica. En términos de propiedades físicas, la fibra destaca por su resistencia mecánica, lo que la hace adecuada para aplicaciones que requieren materiales duraderos. A pesar de su rigidez, también posee cierta flexibilidad, permitiendo su procesamiento y conformado en diversas formas. Además, la fibra tiene una capacidad moderada para absorber agua, lo cual es crucial en aplicaciones donde la resistencia al agua es importante (Xitumul, 2020).

Las propiedades térmicas de la fibra de palma africana son también notables. Tiene una buena estabilidad térmica, soportando temperaturas moderadamente altas antes de degradarse, lo cual es importante en procesos de fabricación que involucran calor. Además, la fibra posee propiedades de aislamiento térmico, lo que la hace útil en aplicaciones donde se requiere control de temperatura. Estas propiedades, hacen que la fibra sea una opción para productos de un solo uso (Xitumul, 2020).

La fibra residual de palma africana, generada tras la extracción de aceite, tiene aplicaciones comunes como combustible sólido en calderas industriales para la producción de vapor y electricidad, así como en compostaje, donde actúa como enmienda orgánica para mejorar la fertilidad y estructura del suelo. No obstante, su elevado contenido de lignina presenta desafíos para ciertos procesos de transformación. Adicionalmente, los aceites residuales y otros contaminantes pueden limitar su uso directo. Estas limitaciones técnicas y económicas conllevan a un subaprovechamiento de este residuo, lo que subraya la necesidad de explorar alternativas que maximicen su valor agregado y contribuyan a una gestión más sostenible de este recurso (Paucar y Rubio, 2022).

La economía circular es un modelo de producción y consumo que busca reducir al máximo los residuos y aprovechar los recursos existentes de manera sostenible. Su importancia radica en la transformación de los desechos en nuevos recursos, contribuyendo a disminuir la presión sobre el medio ambiente, mitigar el cambio climático y fomentar una economía más resiliente y eficiente. En este contexto, explorar alternativas que maximicen el valor agregado de la fibra residual de palma africana está directamente relacionado con los principios de la economía circular. En lugar de desechar este residuo o utilizarlo únicamente en aplicaciones de bajo valor, como combustible o composta, la creación de productos innovadores y de mayor valor, no solo da un nuevo propósito a un subproducto industrial, sino que también reduce la dependencia de nuevos materiales (Cerdá y Khalilova, 2020).

II. JUSTIFICACIÓN

La producción de aceite crudo de palma africana en Guatemala en 2019 alcanzó las 863,252.66 toneladas, lo cual requirió 171,451.81 hectáreas de cultivo sembrado y generó 392,970,000 USD en divisas, 28,575 empleos directos, 143,000 empleos indirectos y un aporte del 1.09% al PIB nacional (GREPALMA, 2020). Este sector agroindustrial no solo es económicamente significativo, sino que también tiene el potencial de alinearse con los principios de la economía circular.

El aceite extraído representa aproximadamente el 10% de la biomasa total de una palma, mientras que el 90% restante corresponde a residuos como fibra y frutos. En 2019, esto equivalió a cerca de 8 millones de toneladas de biomasa residual acumulada en Guatemala. Si bien estos residuos se utilizan en la generación de energía, fertilizantes, papel, cartón y otros productos, las actividades comerciales derivadas de su aprovechamiento no han mostrado un crecimiento significativo en el país (Kong et al., 2014). Este panorama revela una oportunidad de adoptar estrategias de economía circular que permitan maximizar el valor agregado de estos subproductos.

La transformación de la fibra residual de palma africana en productos de un solo uso, como se plantea en esta investigación, no solo aprovecha un recurso subutilizado, sino que también reduce la dependencia de materiales plásticos, fomenta la sostenibilidad y contribuye a un modelo de producción regenerativo. De esta manera, se busca no solo dar un nuevo propósito a este residuo industrial, sino también posicionar a la agroindustria de la palma en Guatemala como un referente de prácticas alineadas con la economía circular.

III. OBJETIVOS

A. GENERAL

Producir platos de un solo uso a partir de la fibra residual de palma africana a escala laboratorio como sustituto a productos plásticos.

B. ESPECÍFICOS

Determinar características físicas y químicas de la fibra residual de palma africana para determinar su potencial utilización como materia prima para elaborar platos de un solo uso.

Obtener platos de un solo uso por métodos físicos y químicos para determinar el prototipo.

Determinar características físicas y químicas del plato de un solo uso a través de pruebas físicas y fisicoquímicas para compararlo con otros existentes.

Proponer el diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana a partir de la metodología a escala laboratorio.

IV. MARCO TEÓRICO

A. ACEITE DE PALMA AFRICANA

El aceite de palma africana es un aceite vegetal extraído del mesocarpio (la pulpa) del fruto de la palma de aceite (*Elaeis guineensis*), originaria de África Occidental. Este aceite es conocido por su alta productividad y versatilidad, convirtiéndose en uno de los aceites más utilizados a nivel global. Su producción se ha extendido a regiones tropicales como Asia, América Latina y África, donde el clima favorece su cultivo (Velayuthan, 1986).

Desde una perspectiva química, el aceite de palma se compone principalmente de ácidos grasos saturados, como el ácido palmítico, y una proporción significativa de ácido oleico y linoleico. En su estado crudo, presenta un color rojizo debido a su alto contenido en carotenoides, aunque este color desaparece tras los procesos de refinado. Además, contiene antioxidantes naturales como vitamina E y compuestos fenólicos, que aumentan su estabilidad y durabilidad (Velayuthan, 1986).

Sus aplicaciones abarcan diversas industrias. En el sector alimenticio, se utiliza para la elaboración de margarinas, aceites para freír y productos horneados debido a su estabilidad a altas temperaturas. En la cosmética, se emplea en jabones y cremas, mientras que en la industria energética se usa como base para biodiésel. Sin embargo, estas ventajas deben equilibrarse con los desafíos ambientales asociados con su producción masiva, como la deforestación y la pérdida de biodiversidad en zonas tropicales (Velayuthan, 1986).

El cultivo de palma africana es altamente eficiente en términos de rendimiento, ya que produce más aceite por hectárea que otros cultivos como la soya o el girasol. No obstante, la sostenibilidad de esta industria depende de la implementación de prácticas responsables, como las promovidas por la Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible (RSPO), que busca minimizar los impactos ambientales y sociales negativos del sector (Velayuthan, 1986).

A nivel mundial, la producción de aceite de palma en 2023 alcanzó aproximadamente 78 millones de toneladas, consolidándose como el aceite vegetal más producido en el mundo. Este mercado está liderado por Indonesia y Malasia, que juntos representan cerca del 85% de la producción global. Estos países exportan la mayor parte de su producción, con mercados clave como India, China y la Unión Europea, debido a la creciente demanda de aceite vegetal para alimentos, cosméticos y biocombustibles (Grand View Research, 2023).

El aceite de palma es un cultivo muy eficiente en términos de rendimiento: produce alrededor de 4 a 10 veces más aceite por hectárea que otras fuentes de aceites vegetales como la soya, el girasol

o el coco. Esto lo convierte en una opción económica y viable para satisfacer la creciente demanda mundial de aceites comestibles y no comestibles, aunque su expansión ha generado preocupaciones ambientales relacionadas con la deforestación y pérdida de biodiversidad (Grand View Research, 2023).

1. SUBPRODUCTOS DE LA EXTRACCIÓN DE ACEITE DE PALMA AFRICANA

La extracción de aceite de palma africana produce una variedad de subproductos, muchos de los cuales pueden ser aprovechados en diversas industrias. Uno de los principales subproductos es la fibra residual, que proviene de los frutos después de la extracción del aceite. Esta fibra se utiliza comúnmente como biomasa en calderas industriales para la generación de energía y vapor, y también se emplea en la fabricación de productos como cartón y papel. Además, es una fuente importante de composta, mejorando la estructura del suelo y su fertilidad (Velayuthan, 1986).

Otro subproducto relevante es el raquis o racimos vacíos, que son los restos de los racimos de fruta una vez que los frutos han sido procesados. Estos pueden ser empleados como biomasa para generación de energía o utilizados como abono orgánico, aunque su uso requiere ciertos tratamientos para evitar problemas de acidez en los suelos. Además, los huesos y carozos de fruta resultantes del procesamiento también son utilizados para la producción de aceite de palmiste y la torta de palmiste, que sirve como alimento para ganado (Velayuthan, 1986).

Además de estos subproductos, la extracción de aceite de palma genera efluentes líquidos conocidos como POME (Palm Oil Mill Effluent), que contienen materia orgánica y pueden ser tratados para generar biogás o utilizados como fertilizante líquido. También se produce glicerina, un subproducto de la producción de biodiésel, que tiene aplicaciones en las industrias farmacéutica, cosmética y alimentaria (Velayuthan, 1986).

Finalmente, la ceniza y el carbón resultantes de la quema de residuos como la fibra y los racimos vacíos en calderas son utilizados como enriquecedores de suelos, mientras que las cáscaras de fruta pueden servir como sustrato para la producción de hongos o como combustible en forma de briquetas (Velayuthan, 1986).

A pesar de la diversidad de subproductos útiles, en muchos casos, especialmente en países productores como Guatemala, una gran cantidad de estos residuos aún no se aprovecha de manera eficiente. Esto subraya la importancia de adoptar prácticas de economía circular para maximizar el valor agregado de estos residuos y minimizar su impacto ambiental. La falta de infraestructura

adecuada y la necesidad de innovación tecnológica limitan el aprovechamiento óptimo de estos subproductos (Grand View Research, 2023).

B. FIBRA DE PALMA AFRICANA

La palma africana (*Elaeis guineensis*) es un árbol perenne originario de África occidental, específicamente de regiones como Guinea, Sierra Leona, Liberia y Costa de Marfil. Este árbol puede alcanzar alturas de hasta 20 metros y tiene hojas pinnadas dispuestas a ambos lados de un raquis central. Esta especie es conocida por producir racimos de frutas, cada uno conteniendo miles de frutos de palma. Estos frutos tienen pulpa y una nuez llamada palmiste, de la cual se extrae el aceite. El aceite extraído de la pulpa es conocido como aceite de palma, siendo uno de los aceites vegetales más utilizados en el mundo para la alimentación y la industria (Rosli y Law, 2011).

La palma africana se cultiva extensamente en todo el mundo, especialmente en el sudeste asiático y América Latina, debido a la creciente demanda de aceite de palma. Este aceite se utiliza en la industria alimentaria para la fabricación de productos como aceites para cocinar, margarina, productos de panadería y alimentos procesados. Además, se encuentra presente en la industria cosmética y en la producción de biodiesel. Sin embargo, la expansión de las plantaciones de palma ha generado controversias. La deforestación asociada con esta expansión ha suscitado preocupaciones ambientales y la pérdida de hábitats naturales. Además, la industria del aceite de palma ha enfrentado críticas por su impacto social, incluyendo cuestiones relacionadas con los derechos de las comunidades locales y las condiciones laborales (Rosli y Law, 2011).

Para abordar los desafíos ambientales, se han establecido iniciativas de sostenibilidad. Tal es la certificación RSPO (Mesa Redonda sobre Aceite de Palma Sostenible), que busca promover prácticas más sostenibles en la industria. La investigación continua también se centra en el desarrollo de variedades de palma más productivas y sostenibles, así como en la mejora de las prácticas agrícolas para minimizar el impacto ambiental y social de la producción de aceite de palma (Rosli y Law, 2011).

La extracción de aceite de palma africana es un proceso clave en la producción de uno de los aceites vegetales más utilizados en el mundo. El aceite de palma se obtiene de la fruta de la palma africana (*Elaeis guineensis*), principalmente de sus frutos conocidos como racimos de frutas de palma. Estos racimos son recolectados de los árboles de palma y posteriormente se desgranán para separar las frutas individuales del raquis principal. Las frutas desgranadas son sometidas a un control de calidad para asegurar que estén en condiciones óptimas para la extracción. Luego, la pulpa se lleva a

una prensa para la extracción del aceite; este proceso implica aplicar presión para liberar el aceite de la pulpa. El resultado es el aceite crudo de palma (Rosli y Law, 2011).

La fibra de palma africana es un subproducto de la producción de aceite de palma. Este se obtiene después de extraer el aceite de la pulpa de los frutos y desgarrar los racimos. Físicamente, la fibra puede tener longitudes variables y su grosor depende del procesamiento específico. En cuanto a aplicaciones, la fibra de palma africana se utiliza en la industria textil para la fabricación de tejidos y cuerdas debido a su resistencia y durabilidad. También se utiliza en la construcción, para la fabricación de tableros de partículas y otros materiales de construcción. Además, se emplea en la producción de productos artesanales como cestas y tejidos (Rosli y Law, 2011).

La fibra de palma africana puede clasificarse en dos tipos principales según su origen en la planta: fibra fina y fibra de raquis. La fibra fina se obtiene principalmente del mesocarpio del fruto de la palma africana; es la parte carnosa del fruto que rodea la semilla. Estas fibras son más delgadas, suaves y flexibles, tienen un alto contenido de celulosa, con cantidades moderadas de lignina y hemicelulosa. La fibra de raquis proviene de la parte central de la hoja de la palma, que se conoce comúnmente como el "tallo" o eje principal de la hoja. Las fibras de raquis son más gruesas, rígidas y duras; contienen una mayor proporción de lignina en comparación con la fibra fina (Rosli y Law, 2011).

1. CELULOSA

La celulosa es el biopolímero más abundante en la Tierra y forma la estructura principal de la pared celular de las plantas. Está compuesta de cadenas largas de glucosa (un azúcar simple) unidas mediante enlaces $\beta(1\rightarrow4)$ glucosídicos, lo que le confiere una estructura lineal y rígida. Estas cadenas de glucosa se organizan en microfibrillas, que a su vez se agrupan para formar una estructura altamente resistente. La celulosa es insoluble en agua y la mayoría de los solventes orgánicos, lo que le otorga propiedades de resistencia mecánica, que son fundamentales para la estabilidad estructural de las plantas. Debido a su abundancia y resistencia, la celulosa se utiliza ampliamente en la industria para producir papel, textiles (algodón), y más recientemente, biocombustibles y bioplásticos (Pabón, 2004).

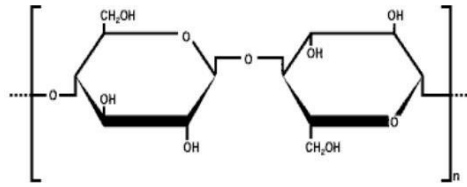


Figura 1. Molécula de celulosa

Fuente: Cesare (2019)

2. HEMICELULOSA

A diferencia de la celulosa, la hemicelulosa no es un polímero puro de glucosa. Está formada por varios tipos de azúcares como xilosa, manosa, galactosa y otros monosacáridos, organizados en cadenas ramificadas y más cortas. Aunque la hemicelulosa es menos estructural que la celulosa, juega un papel crucial en la estabilidad de la pared celular vegetal, actuando como una matriz que une las microfibrillas de celulosa. Debido a su estructura más amorfa y menos organizada, es más fácil de descomponer que la celulosa, lo que la convierte en un componente clave en los procesos de digestión y fermentación para la producción de bioetanol (Pabón, 2004).

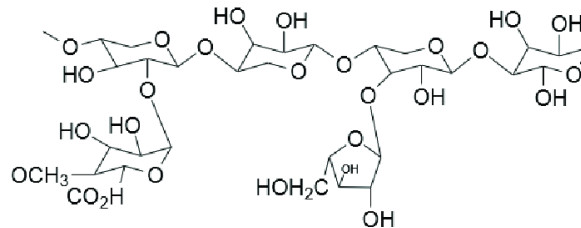


Figura 2. Molécula de hemicelulosa

Fuente: Cesare (2019)

3. LIGNINA

La lignina es un polímero complejo y tridimensional que está compuesto por unidades fenólicas, específicamente alcoholes aromáticos como el alcohol coniferílico, sinapílico y paracumárico. La lignina es responsable de la rigidez y resistencia a la descomposición de la pared celular, particularmente en tejidos leñosos. Su función principal es dar soporte estructural adicional a las plantas y protegerlas contra el ataque de microorganismos, ya que su composición es más difícil de degradar. En las industrias del papel y la bioenergía, la eliminación de lignina (proceso de

deslignificación) es un paso crucial para permitir el acceso a las fibras de celulosa. Sin embargo, la lignina también tiene un potencial enorme para la producción de productos químicos y combustibles a partir de biomasa (Pabón, 2004).

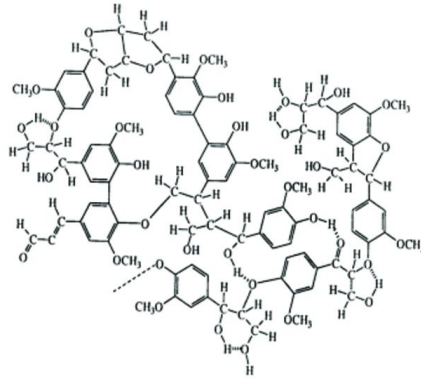


Figura 3. Molécula de lignina

Fuente: Cesare (2019)

C. ECONOMÍA CIRCULAR

La economía circular es un modelo de producción y consumo que se basa en la reutilización, reparación, renovación y reciclaje de los productos y materiales para crear un ciclo continuo, a diferencia del modelo lineal tradicional de "tomar, hacer, desechar". Este modelo busca minimizar el desperdicio y la utilización de recursos naturales, y al mismo tiempo fomentar el uso eficiente de los recursos existentes. En lugar de que los productos se conviertan en desechos al final de su vida útil, se les da una nueva vida, ya sea como un producto renovado o como materia prima para otros procesos industriales. De esta forma, se reduce la extracción de recursos y la cantidad de residuos generados (Cerdá y Khalilova, 2020).

Una forma de aplicar la economía circular es en el diseño de productos desde el inicio para facilitar su reciclaje o reutilización. Esto incluye la selección de materiales reciclables, la modularidad de los productos para su reparación fácil, y la creación de modelos de negocio que fomenten la reutilización, como los de alquiler o leasing. Por ejemplo, empresas como Patagonia y IKEA han adoptado prácticas de economía circular al ofrecer programas de reciclaje de productos o permitir la reparación de los mismos, reduciendo así la necesidad de recursos nuevos. Además, el modelo puede aplicarse en la simbiosis industrial, donde las empresas intercambian subproductos para ser utilizados

como materia prima por otras, promoviendo la eficiencia y reduciendo el desperdicio (Cerdá y Khalilova, 2020).

El reciclaje es uno de los pilares de la economía circular, ya que permite recuperar materiales de productos al final de su vida útil, lo que no solo reduce los residuos sino que también minimiza la extracción de nuevos recursos. El reciclaje de aluminio, por ejemplo, es un proceso que puede realizarse de manera repetitiva sin que el material pierda su calidad. Además, el modelo de economía circular también promueve una economía basada en el servicio, como el alquiler de electrodomésticos o vehículos, lo cual fomenta la reutilización de productos y permite su reparación y actualización constante, en lugar de desecharlos (Cerdá y Khalilova, 2020).

Este enfoque genera múltiples beneficios, tanto ambientales como económicos. No solo se reduce el impacto ambiental mediante la conservación de recursos naturales y la disminución de residuos, sino que también se abren nuevas oportunidades económicas, estimulando la innovación y la creación de mercados para productos reciclados. Esto, a su vez, puede crear empleos en sectores como el reciclaje, la reparación y la remanufactura (Cerdá y Khalilova, 2020).

1. CICLO DE VIDA DE LOS PRODUCTOS

El ciclo de vida de los productos (LCA, por sus siglas en inglés) es una metodología que evalúa los impactos ambientales de un producto durante todas las etapas de su vida, desde la extracción de recursos hasta su disposición final. Este enfoque integral busca identificar, medir y minimizar los efectos negativos que un producto genera sobre el medio ambiente a lo largo de su ciclo de vida. Cada fase del ciclo tiene implicaciones importantes que pueden contribuir a la huella ecológica del producto y su sostenibilidad. Las etapas clave incluyen la extracción de recursos, que abarca la obtención de materias primas a través de la minería, la agricultura o la recolección, siendo una de las etapas más impactantes en términos de uso de energía y destrucción de ecosistemas naturales. La fabricación es la siguiente etapa, donde los recursos extraídos se transforman en productos, lo cual requiere energía y genera emisiones, residuos y otros impactos (Cerdá y Khalilova, 2020).

Después, el producto pasa por la fase de distribución y transporte, donde se transporta desde las fábricas hasta los consumidores, una etapa que implica emisiones de gases de efecto invernadero debido al uso de combustibles fósiles en el transporte, y a su vez, contribuye al consumo de recursos naturales. Durante la fase de uso, el producto es consumido por el usuario final, y puede generar un

consumo adicional de energía o recursos, como ocurre con los electrodomésticos, cuyos procesos de operación implican el uso de electricidad. Finalmente, el fin de vida del producto puede llevar a su disposición en vertederos, reciclaje, reutilización o incineración. Cómo se maneja esta fase tiene un impacto significativo en los efectos ambientales totales del producto, ya que la disposición adecuada o el reciclaje puede reducir la cantidad de residuos y la necesidad de recursos nuevos (Cerdá y Khalilova, 2020).

El análisis del ciclo de vida permite a las empresas y consumidores tomar decisiones más informadas sobre la sostenibilidad de los productos, ayudando a identificar oportunidades para optimizar el uso de recursos, reducir la huella de carbono y mejorar la eficiencia energética. Este análisis es fundamental en el contexto de la economía circular, que promueve la reutilización, el reciclaje y la extensión de la vida útil de los productos. Al diseñar productos con un ciclo de vida más largo y fácilmente reciclables, las empresas pueden contribuir significativamente a la reducción del desperdicio y la explotación de recursos naturales, alineándose con los principios de sostenibilidad (Cerdá y Khalilova, 2020).

2. REVALORIZACIÓN DE MATERIALES

La revalorización de materiales es uno de los principios fundamentales de la economía circular. Este concepto se refiere al proceso de transformar residuos, subproductos o materiales descartados en nuevos productos o recursos útiles, en lugar de simplemente desecharlos. El objetivo principal es reducir la cantidad de desechos generados y maximizar el uso de los recursos naturales, promoviendo un modelo económico más eficiente y sostenible (Cerdá y Khalilova, 2020).

En la economía circular, la revalorización se logra a través de diversas estrategias, como el reciclaje, la reutilización y la upcycling (o reciclaje creativo). A través de estos procesos, se busca no solo reducir el impacto ambiental asociado a la extracción de recursos, sino también crear valor económico y social. Por ejemplo, los materiales reciclados pueden ser utilizados para fabricar nuevos productos de alta calidad, reduciendo la necesidad de materias primas vírgenes y, al mismo tiempo, evitando la acumulación de residuos en vertederos (Cerdá y Khalilova, 2020).

Un aspecto clave de la revalorización de materiales es que no se trata simplemente de recuperar materiales para su uso en su forma original, sino de rediseñar los productos y procesos para que los materiales sean fáciles de recuperar, reutilizar y reciclar. Esto implica una mejora en el diseño de productos, la selección de materiales más sostenibles y el uso de tecnologías innovadoras que

permitan una mayor eficiencia en el uso de recursos. A largo plazo, la revalorización de materiales contribuye a la creación de una economía más resiliente y menos dependiente de recursos finitos (Cerdá y Khalilova, 2020).

Por ejemplo, en el sector de la construcción, los materiales reciclados como el vidrio, plástico o metal pueden ser utilizados para fabricar nuevos materiales de construcción, reduciendo así la extracción de recursos naturales y el impacto ambiental de la industria. De manera similar, en la industria textil, el reciclaje de fibras y tejidos permite crear nuevos productos, evitando la sobreproducción y reduciendo la huella de carbono (Cerdá y Khalilova, 2020).

Este enfoque también está vinculado a la creación de una economía regenerativa, donde los procesos productivos no solo son más sostenibles, sino que también devuelven valor al medio ambiente y la sociedad. En este sentido, la revalorización de materiales juega un papel clave en la creación de un ciclo continuo de producción y consumo, donde los recursos no se desperdician, sino que se mantienen en uso el mayor tiempo posible (Cerdá y Khalilova, 2020).

D. PLATOS DE UN SOLO USO

Un plato es un utensilio o recipiente generalmente de forma plana, circular y con bordes elevados, diseñado para contener y servir alimentos. Los platos pueden estar hechos de una variedad de materiales, como cerámica, porcelana, vidrio, acero inoxidable o plástico, y se utilizan comúnmente en la presentación y el consumo de alimentos en la mesa. Un plato se coloca sobre la mesa y se utiliza para contener porciones individuales de comida, lo que facilita su manipulación y consumo (Malambo, *et al.*, 2022).

Un plato de un solo uso es un tipo de plato desechable diseñado para ser utilizado una sola vez y luego ser eliminado. Estos platos están hechos de materiales como papel, cartón, plástico o materiales biodegradables, y son muy comunes en situaciones en las que se necesita servir comida a muchas personas, como fiestas, eventos al aire libre, comida para llevar o comidas rápidas. La principal ventaja de los platos de un solo uso es la conveniencia, ya que eliminan la necesidad de lavar la vajilla después de su uso, lo que puede ser especialmente útil en eventos con grandes cantidades de personas. Sin embargo, su uso excesivo puede tener impactos ambientales negativos debido a la generación de residuos, especialmente cuando se utilizan platos de plástico no biodegradables (Malambo, *et al.*, 2022).

Las dimensiones comunes de un plato de un solo uso pueden variar según el tipo y el propósito del plato. En general, los platos suelen tener un diámetro promedio que oscila entre 20 y 30 centímetros (8 a 12 pulgadas) en la mayoría de los casos. Esto es aplicable a platos de cena o almuerzo que se utilizan para servir comidas principales. Sin embargo, también existen otros tamaños de platos que son comunes en la mesa, como los platos para postre, que por lo general son más pequeños, con un diámetro de alrededor de 15 a 20 centímetros. Por otra parte, los platos hondos suelen ser más profundos (2 a 6 cm) y se utilizan para servir sopas, guisos, cereales o alimentos líquidos; tienen diámetro similar al de un plato de cena o almuerzo. El grosor promedio varía según el material y diseño; los platos de un solo uso de plástico pueden tener un grosor de 0.1 cm, y los de papel hasta 0.5 cm. De igual manera, la masa del plato puede variar desde 15 g hasta 40 g para que sea fácilmente manipulable (Malambo, *et. al*, 2022).

Los utensilios de cocina deben tener un pH que sea seguro para el contacto con alimentos y que no presente riesgos para la salud humana. La neutralidad en términos de pH está alrededor de 7. Sin embargo, para utensilios de cocina, no hay una regla estricta sobre el pH específico, ya que diferentes materiales pueden tener valores ligeramente diferentes. Por lo general, los platos de un solo uso tienen un pH cercano a la neutralidad, alrededor de 5 a 6. Sin embargo, este valor puede variar dependiendo de los procesos de fabricación y los recubrimientos aplicados para mejorar la resistencia a la humedad (Oliva, 2011).

La densidad de un plato de un solo uso puede variar significativamente dependiendo del material utilizado en su fabricación. La densidad de los platos de papel o cartón puede variar, pero generalmente se encuentra en el rango de 0.2 a 0.6 g/mL. Este rango puede depender de la cantidad de fibras utilizadas, el grosor del material y cualquier recubrimiento aplicado. La densidad de los platos de plástico también varía según el tipo de plástico utilizado. Puede oscilar entre 0.9 a 1.5 g/mL o más, dependiendo del tipo específico de plástico. Los platos fabricados con materiales biodegradables, como almidón de maíz o caña de azúcar, pueden tener densidades similares a las de los platos de papel, generalmente en el rango de 0.2 a 0.6 g/mL (Corbella, 2018).

El porcentaje de absorción de agua en platos de un solo uso puede variar considerablemente según el tipo de material utilizado en su fabricación. Los platos fabricados de papel o cartón sin recubrimiento son altamente susceptibles a la absorción de agua, pudiendo absorber entre un 50% y 100% de su peso en agua. Esto se debe a la porosidad de estos materiales, lo que los hace menos resistentes a la humedad, a menos que estén recubiertos. Sin embargo, cuando se les aplica un recubrimiento, como una capa de cera o plástico, el porcentaje de absorción disminuye drásticamente,

acercándose al 0%, ya que estos recubrimientos crean una barrera impermeable. El polipropileno tiene una absorción de agua cercana al 0.01% y el poliestireno expandido suele estar entre 0.1 y 1% (Corbella, 2018).

En contraste, los platos fabricados a partir de bagazo de caña de azúcar presentan una menor absorción de agua, generalmente entre 15% y 30%. Esto se debe a la estructura más densa del bagazo y a los tratamientos que se les aplican para aumentar su resistencia a los líquidos. De manera similar, los platos de bambú tienden a absorber menos agua, con un porcentaje de entre 5% y 15%, ya que este material es naturalmente más resistente y, a menudo, recibe tratamientos adicionales para mejorar su impermeabilidad. Por otro lado, los platos fabricados a partir de fécula de maíz tienen una absorción de agua significativamente más baja, generalmente entre 1% y 10% (Corbella, 2018).

La temperatura máxima de utilización de un plato de un solo uso depende del material con el que esté fabricado. Cada tipo de material tiene un rango de temperatura en el cual experimenta cambios físicos, como la fusión o la deformación. Es importante considerar que los platos de un solo uso no están diseñados para soportar altas temperaturas y no deben utilizarse en situaciones donde puedan estar expuestos directamente a fuentes de calor intenso, como hornos o estufas. Los platos de poliestireno pueden soportar temperaturas de hasta 60°C. Sin embargo, no son aptos para microondas y tienden a deformarse cuando contienen líquidos calientes. Por otro lado, los platos de polipropileno son más resistentes al calor, soportando temperaturas de hasta 110°C. En cuanto a los platos de papel con recubrimiento de cera o plástico, estos pueden resistir temperaturas de entre 70°C y 80°C. Aunque son capaces de contener alimentos calientes, no se recomienda su uso para líquidos extremadamente calientes o para calentarlos en microondas, ya que el recubrimiento podría deteriorarse bajo estas condiciones (Corbella, 2018).

La resistencia mecánica de un plato de un solo uso se puede medir a través de pruebas específicas diseñadas para evaluar su capacidad para soportar cargas, impactos u otras fuerzas mecánicas. La prueba de compresión evalúa la capacidad del plato para soportar fuerzas de compresión. El plato se coloca entre dos placas y se aplica gradualmente una fuerza hacia abajo hasta que se produce la deformación o falla. La resistencia se mide en función de la carga máxima que puede soportar y la elongación que presenta (Corbella, 2018).

El peso promedio de una comida varía según las costumbres alimenticias, preferencias personales, hábitos de cada persona, y si se trata de un desayuno, almuerzo o cena. Un desayuno típico suele pesar entre 0.7 y 1.1 libras (300 a 500 gramos), e incluye alimentos como cereales con leche, huevos, pan y frutas. Por su parte, el almuerzo, que tiende a ser la comida más pesada del día,

puede oscilar entre 1.1 y 1.8 libras (500 a 800 gramos), compuesto por una porción de proteínas como carne, pollo o pescado, acompañamientos como arroz, papas o pasta, vegetales y ensaladas. En cuanto a la cena, suele ser un poco más ligera, con un peso generalmente de 0.9 a 1.6 libras (400 a 700 gramos) (Hall, 2019).

El color en un plato de un solo uso indica la percepción estética y la imagen de la marca. Los colores son potentes indicadores visuales que influyen en cómo los consumidores perciben la calidad y el propósito del producto. Por ejemplo, un plato de color blanco brillante puede transmitir limpieza, pureza y una mayor sensación de seguridad alimentaria. En cambio, colores naturales o tonos suaves pueden estar asociados con sostenibilidad y productos ecológicos. La elección del color puede ser un diferenciador clave en el mercado, ayudando a posicionar el producto dentro de una categoría específica y atraer a un público objetivo (Corbella, 2018).

E. FIBRA DE PALMA AFRICANA PARA PLATOS

Se puede utilizar la fibra de palma africana para fabricar platos de un solo uso debido a sus propiedades naturales y sostenibles. Sin embargo, debe asegurarse que las propiedades de las fibras no perjudiquen la fabricación de estos platos. El contenido de humedad es un factor crítico que puede afectar el proceso de fabricación y las propiedades finales de los platos. El contenido de humedad se refiere a la cantidad de agua presente en la fibra y se expresa como un porcentaje sobre el peso total de la materia prima. Se esperan valores menores del 31% ya que el contenido de humedad minimiza la rápida degradación de los platos de un solo uso (Neyra, *et al.*, 2022).

La composición química de la fibra de palma africana incluye celulosa, hemicelulosa y lignina, que son componentes principales de las fibras vegetales. Estos porcentajes pueden depender de varios factores, incluyendo la parte específica de la planta de palma de la que se obtiene la fibra y el proceso de extracción. Los valores químicos de celulosa ideales en la fibra del fruto de la palma aceitera deben ser mayores al 30%, cercanos a los valores provenientes de las fuentes maderables (entre 40 a 50 %). La lignina proporciona rigidez que promueve la resistencia a la descomposición y a la absorción de agua; lo cual impide la conversión de la fibra a pulpa útil. Valores mayores a 15% de lignina en las fibras determinará la necesidad de deslignificar la fibra antes del proceso de producción de platos de un solo uso (Neyra, *et al.*, 2022).

El tamaño de partícula puede influir en propiedades físicas, como la absorción de agua. El control del tamaño de partícula de la fibra como materia prima permite la consistencia en los procesos

de fabricación. Su control y comprensión adecuados son esenciales para asegurar los estándares de calidad en la fabricación de los platos de un solo uso (Neyra, *et al.*, 2022).

F. POLÍMEROS

Los polímeros son macromoléculas esenciales que se forman mediante la repetición de unidades estructurales más pequeñas conocidas como monómeros. Esta repetición de unidades se lleva a cabo mediante enlaces químicos, típicamente enlaces covalentes, dando lugar a cadenas largas y complejas. La diversidad de estructuras y propiedades de los polímeros proviene de esta capacidad para variar las unidades monoméricas y la secuencia en la que están dispuestas (Meira y Gugliotta, 2019).

Se encuentran polímeros en la naturaleza como proteínas, ácidos nucleicos y carbohidratos, mientras que, en el ámbito sintético, los polímeros incluyen materiales ampliamente utilizados como plásticos, fibras sintéticas y elastómeros. Estas macromoléculas exhiben una flexibilidad inherente en su estructura, permitiendo una variedad de propiedades físicas y aplicaciones. La formación de polímeros implica procesos de polimerización, que pueden ser de dos tipos principales: polimerización por adición, común en plásticos como el polietileno, y polimerización por condensación, utilizada en la síntesis de polímeros como el nylon (Meira y Gugliotta, 2019).

El campo de la ingeniería de polímeros se ocupa del estudio y la aplicación de estos materiales, explorando tanto su síntesis y procesamiento como sus numerosas aplicaciones prácticas. Los polímeros desempeñan un papel fundamental en la fabricación de productos cotidianos, desde envases plásticos hasta textiles y dispositivos médicos, y su estudio continúa siendo esencial en la ciencia de materiales y la química moderna (Meira y Gugliotta, 2019).

La fécula de maíz, derivada del almidón presente en los granos de maíz, ha emergido como una matriz versátil en la fabricación de polímeros biodegradables. Este material renovable y abundante se utiliza como base para desarrollar bioplásticos y materiales compuestos que presentan propiedades similares a los plásticos tradicionales, pero con la ventaja de ser más sostenibles y amigables con el medio ambiente. En el proceso de elaboración de bioplásticos a partir de fécula de maíz, se suele modificar químicamente para mejorar sus propiedades mecánicas y térmicas. La adición de otros componentes, como plastificantes y reforzadores, permite ajustar las características del polímero resultante para cumplir con requisitos específicos de resistencia, flexibilidad y durabilidad (Isroi, *et al.*, 2017).

Una de las ventajas clave de la fécula de maíz como matriz de polímeros es su biodegradabilidad. A diferencia de los plásticos convencionales derivados de recursos no renovables, los bioplásticos basados en fécula de maíz pueden descomponerse en condiciones ambientales favorables, contribuyendo así a la reducción de residuos plásticos persistentes. Además, la fécula de maíz ofrece una alternativa viable en aplicaciones donde la degradación del material es deseable, como envases desechables y productos de un solo uso. Su versatilidad y capacidad para adaptarse a diferentes procesos de fabricación hacen que la fécula de maíz sea una opción atractiva en la búsqueda de soluciones más sostenibles en la industria de los materiales (Isroi, *et al.*, 2017).

El ácido acético transforma cadenas ramificadas de polímeros en cadenas lineales para modificar sus propiedades y características. Cuando el ácido acético se emplea en la hidrólisis de polímeros, actúa como un agente desramificante al romper las uniones químicas en las cadenas laterales de los polímeros ramificados. Este proceso conduce a la formación de cadenas lineales, simplificando la estructura del polímero (Nora, *et al.*, 2023).

La hidrólisis puede mejorar la biodegradabilidad del material, convirtiéndolo en una opción más sostenible. Además, este proceso puede alterar la solubilidad y la capacidad de procesamiento de los polímeros, ofreciendo nuevas oportunidades en la fabricación de materiales con propiedades específicas. Es importante destacar que la hidrólisis con ácido acético es un proceso químico delicado y debe llevarse a cabo con precisión para evitar la degradación excesiva del polímero. La temperatura, la concentración de ácido acético y el tiempo de reacción son factores críticos que deben controlarse cuidadosamente para lograr la modificación deseada sin comprometer las propiedades fundamentales del polímero (Nora, *et al.*, 2023).

La glicerina, también conocida como glicerol, es un compuesto químico que desempeña un papel crucial como plastificante en diversas aplicaciones industriales, especialmente en la fabricación de polímeros y productos plásticos. Su capacidad para actuar como plastificante radica en su naturaleza higroscópica y su interacción con las cadenas poliméricas, lo que contribuye a mejorar la flexibilidad y maleabilidad de los materiales plásticos. Cuando se incorpora glicerina a polímeros, actúa como agente plastificante al intercalarse entre las cadenas poliméricas, reduciendo las fuerzas de atracción entre ellas. Esto resulta en una disminución de la rigidez y una mayor movilidad molecular, lo que mejora significativamente la flexibilidad y la capacidad de deformación del material (Nora, *et al.*, 2023).

Un aspecto destacado de la glicerina como plastificante es su biocompatibilidad y su origen natural. Se obtiene comúnmente como subproducto en la producción de biodiésel o a partir de grasas

y aceites vegetales. Esta característica lo hace atractivo para aplicaciones en las que la biodegradabilidad y la sostenibilidad son consideraciones importantes (Nora, *et al.*, 2023).

En la creación de polímeros utilizando fécula de maíz, ácido acético y glicerina, el agua cumple un papel crucial. Primero, actúa como solvente, facilitando la disolución de la fécula de maíz y los demás reactivos en la mezcla. Esto asegura una distribución uniforme de los componentes y permite que participen de manera efectiva en las reacciones químicas necesarias para la formación del polímero. Además, el agua es esencial para la hidratación de la fécula de maíz. Cuando se mezcla con agua, la fécula, que está compuesta principalmente de almidón, se hincha y se convierte en una masa o gel. Esta hidratación es fundamental para la transformación de la fécula en un polímero, ya que permite que se formen enlaces entre las moléculas de almidón, ácido acético y glicerina (Nora, *et al.*, 2023).

El agua también juega un papel en el control de la viscosidad de la mezcla. Una viscosidad adecuada es esencial para moldear el polímero y para asegurar que el proceso de formación sea eficiente. El agua ajusta la viscosidad de la mezcla, permitiendo que sea manipulable y adecuada para el proceso de formación del polímero. Finalmente, el agua ayuda a prevenir la agregación excesiva de las partículas de fécula. Sin suficiente agua, las partículas pueden agruparse, lo que afectaría negativamente la calidad y la consistencia del polímero final (Nora, *et al.*, 2023).

El calor específico representa la cantidad de energía necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa en un grado Celsius. Este valor es aproximadamente $4.18 \text{ J/g}^\circ\text{C}$ para el agua. El agua tiene un calor latente de vaporización elevado, aproximadamente 2260 J/g , lo que significa que requiere una cantidad considerable de energía para pasar del estado líquido al estado gaseoso, y viceversa, sin un cambio en la temperatura. Estas características hacen que el agua sea eficaz en procesos que involucran grandes cantidades de calor, como la evaporación o la calefacción (Perry y Chilton, 1989).

G. PARAFINA COMO CAPA HIDROFÓBICA DEL PLATO DE UN SOLO USO

La parafina es una mezcla de hidrocarburos sólidos, específicamente alcanos, que se obtienen principalmente del petróleo. Es un sólido en su estado natural generalmente translúcida o blanca, inolora, insípida, inerte e hidrofóbica. Por esto, la parafina puede usarse como una capa hidrofóbica en platos de un solo uso, ya que posee repela el agua, no aporta sabor ni olor, y no interactúa fácilmente con los alimentos (Sánchez, 2003).

La parafina crea una barrera que impide que los líquidos penetren en el material base del plato. Esto previene que el plato se ablande o pierda integridad cuando se utiliza para alimentos con alto contenido de humedad. En su aplicación física, la parafina puede aplicarse en una capa delgada, asegurando que el recubrimiento no agregue mucho peso ni altere significativamente el aspecto o la textura del plato. Además, la parafina se funde a temperaturas relativamente bajas (alrededor de 46-68 °C), lo que permite su aplicación a través de métodos como la inmersión o el rociado sin requerir equipos altamente especializados. Por otra parte, la parafina se considera un material relativamente económico (Sánchez, 2003).

El calor específico de la parafina es de aproximadamente 2.1 J/g°C, lo que indica que la parafina requiere menos energía que el agua para aumentar su temperatura en un grado Celsius. Debido a su bajo calor específico, la parafina se calienta y se enfría más rápidamente en comparación con otros materiales con un calor específico mayor, como el agua. Estas características hacen que la parafina sea útil en aplicaciones donde se necesita un cambio de temperatura eficiente, como en la fabricación de recubrimientos impermeables (Sánchez, 2003).

H. PROCESOS DE PRODUCCIÓN

Un proceso de producción es un conjunto de actividades y operaciones planificadas y coordinadas que se realizan para transformar materias primas, componentes o recursos en productos o servicios finales. Los procesos de producción incluyen las etapas de adquisición de materia prima, transformación, control de calidad, empaque, almacenamiento y distribución. Esta investigación cubrirá el proceso de producción desde la adquisición de materia prima hasta el control de calidad final del producto (Perry y Chilton, 1984).

1. REDUCCIÓN DE TAMAÑO

La molienda es un proceso industrial que consiste en reducir el tamaño de partículas sólidas grandes o fragmentar sólidos en partículas más pequeñas. Este proceso se realiza mediante el uso de fuerza mecánica y, en ocasiones, también puede implicar otros métodos como el calor, la fricción o la abrasión. Un molino de cuchillas es un tipo de equipo utilizado en la industria para la reducción de tamaño de materiales sólidos. Estos molinos utilizan cuchillas afiladas o martillos para cortar, triturar o desgarrar los materiales, reduciéndolos a tamaños más pequeños. Uno de los beneficios de los

molinos de cuchillas es que permiten un control preciso del tamaño de partícula del material triturado (McCabe y Smith, 1985).

Las operaciones de molienda son fundamentales en muchas industrias, como la minería, el cemento, la alimentación, la agricultura, la farmacéutica y la química. Durante el procesamiento de materiales sólidos, es común que se requiera la reducción de tamaño en algún punto. El equipo de molienda no solo reduce el tamaño del material, sino que también puede mezclarlo íntimamente, lo que es esencial para producir dispersiones sólido-líquido en operaciones de molienda húmeda (Perry y Chilton, 1984).

Entre las razones más comunes para la reducción de tamaño están la liberación de un componente deseado para su separación posterior (como ocurre al separar minerales de su ganga), la preparación del material para una reacción química posterior al aumentar el área superficial específica (como en la producción de cemento), o cumplir con los requisitos de tamaño para mejorar la calidad del producto final, como en el caso de pigmentos para pinturas, plásticos y productos agrícolas. Además, la molienda también se utiliza para preparar desechos para su reciclaje (Perry y Chilton, 1984).

En términos de los tipos de reducción de tamaño, se distinguen dos procesos principales: la desaglomeración y la fractura de partículas. La desaglomeración consiste en romper los grupos de partículas que forman un agregado, sin destruir las partículas individuales que lo componen. En contraste, la fractura de partículas implica la ruptura de las partículas individuales en lugar de solo separarlas. La fractura de partículas suele ocurrir cuando se trabaja con materiales mayores a $10\ \mu\text{m}$, mientras que la desaglomeración es más común en procesos de molienda fina (Perry y Chilton, 1984).

La molienda puede ser tanto húmeda como seca. En general, la molienda húmeda permite alcanzar tamaños de partícula más finos en comparación con la molienda en seco. En la molienda húmeda con molinos de bolas, es posible obtener tamaños de partícula de hasta $0.5\ \mu\text{m}$ con el uso adecuado de surfactantes, mientras que en la molienda seca con molinos de bolas, el tamaño está limitado a aproximadamente $15\ \mu\text{m}$ debido al recubrimiento de las bolas. Otros tipos de molienda seca, como los molinos de martillos o de rodillos, alcanzan tamaños de entre 10 y $20\ \mu\text{m}$, mientras que los molinos de chorro pueden reducir partículas densas hasta 2 o $3\ \mu\text{m}$ debido a la mayor proporción de inercia respecto a la resistencia aerodinámica (Perry y Chilton, 1984).

La teoría de la reducción de tamaño se basa en la fractura de partículas. Es relativamente sencillo formular un balance de fuerzas alrededor de una partícula y hacer predicciones sobre cómo

podría romperse. Sin embargo, ha resultado complicado vincular las teorías de la fractura de partículas con propiedades prácticas útiles para quienes trabajan con molienda. Esto se debe, en parte, a que las máquinas de prueba de partículas individuales, aunque existen, son costosas y consumen mucho tiempo. Para obtener información útil, es necesario probar muchas partículas, y no está claro si estas pruebas reflejan las fuerzas que realmente enfrentan las partículas en un equipo de molienda específico. Incluso si se obtienen datos representativos sobre la fractura de partículas, esta información debe combinarse con los datos de la distribución de fuerzas y la mecánica de partículas dentro de un dispositivo de molienda particular para que sea útil en la ampliación de escala o en la predicción de la efectividad de un equipo (Perry y Chilton, 1984).

2. DIGESTIÓN QUÍMICA

La digestión es el proceso mediante el cual se extrae una fracción soluble, en forma de solución, de una fase sólida insoluble, normalmente permeable, con la que está asociada. Este procedimiento generalmente implica la disolución selectiva, con o sin difusión. Un ejemplo simple sería el lavado, que desplaza un líquido por otro miscible, provocando una mezcla parcial. El componente soluble puede estar en estado sólido o líquido y puede estar incorporado dentro de la estructura porosa de la fase insoluble, ya sea mediante una combinación química, adsorción, o fijación mecánica (Perry y Chilton, 1984).

Este proceso puede verse influenciado por factores como la solubilidad de la sustancia en el líquido o la reacción química que facilita su disolución. La cinética de la digestión, es decir, la rapidez con la que ocurre, también depende del transporte del solvente hacia la masa a digerir, o de la salida de la fracción soluble del sólido, entre otros factores. Además, resistencias interfaciales o tasas de reacción química pueden jugar un papel importante en la velocidad global del proceso (Perry y Chilton, 1984).

En cuanto al equilibrio en la digestión, este no se refiere a fases inmiscibles como en otras separaciones de transferencia de masa. Aquí, el estado de equilibrio se alcanza cuando todo el soluto está disuelto uniformemente en el solvente. Sin embargo, en la práctica, se considera que el equilibrio ocurre cuando los líquidos de las corrientes de salida tienen la misma composición. El éxito del proceso de digestión se ve favorecido cuando el sólido a digerir tiene una alta superficie por unidad de volumen y menores trayectorias de difusión, lo cual se logra disminuyendo el tamaño de partícula. No obstante, partículas excesivamente finas pueden generar problemas en la separación sólido-líquido y afectar la calidad del producto final debido a un lavado ineficiente (Perry y Chilton, 1984).

El tratamiento o digestión químico es un proceso utilizado en la industria papelera, particularmente en la producción de pulpa de celulosa a partir de materiales fibrosos como la madera. El objetivo principal de este proceso es separar la celulosa de la lignina y las hemicelulosas, para obtener pulpa de celulosa pura, que se utiliza en la fabricación de papel. Este proceso emplea productos químicos específicos y calor para disolver y eliminar selectivamente las sustancias no celulósicas; uno de los métodos más comunes es el proceso de pulpeo Kraft, que involucra la utilización de hidróxido de sodio (McCabe y Smith, 1985).

3. HIDRÓLISIS

La hidrólisis es una reacción química fundamental que involucra la ruptura de enlaces en una molécula mediante la interacción con el agua. Este proceso es crucial tanto en sistemas biológicos como en aplicaciones industriales. La palabra "hidrólisis" proviene de los términos griegos *hydro* (agua) y *lysis* (ruptura), lo que describe adecuadamente cómo el agua participa en la descomposición de moléculas complejas en componentes más simples. Durante la reacción, el agua se divide en iones de hidrógeno (H^+) y de hidroxilo (OH^-), los cuales intervienen en la ruptura de enlaces covalentes en la molécula objetivo (Vásquez, 2003).

Existen varios tipos de hidrólisis, dependiendo del contexto. En la hidrólisis ácida, el ácido actúa como catalizador, facilitando la ruptura de enlaces como los ésteres y amidas. Por otro lado, en la hidrólisis básica, el ion hidroxilo (OH^-) juega un papel clave en la ruptura de enlaces, como en el caso de la saponificación de grasas para la producción de jabón. En los organismos vivos, la hidrólisis enzimática es indispensable para el metabolismo. En este proceso, las enzimas catalizan la ruptura de enlaces químicos en carbohidratos, lípidos y proteínas, transformándolos en azúcares, ácidos grasos y aminoácidos, respectivamente (Vásquez, 2003).

Desde un punto de vista estructural, la hidrólisis implica la ruptura de enlaces covalentes. Por ejemplo, en la hidrólisis de un éster, el enlace entre un grupo carboxilo y un grupo alcohólico se rompe, formando un ácido carboxílico y un alcohol. Este proceso involucra varias etapas, que incluyen la formación de un estado de transición donde el agua interactúa con la molécula, lo que finalmente facilita su descomposición (Vásquez, 2003).

La hidrólisis tiene amplias aplicaciones en la industria, como en la producción de biocombustibles a partir de biomasa. En este caso, se hidrolizan polímeros complejos como la celulosa para producir azúcares simples que luego se pueden fermentar en biocombustibles. En la

fabricación de productos farmacéuticos, la hidrólisis se utiliza para descomponer compuestos en sus ingredientes activos o intermediarios esenciales (Vásquez, 2003).

4. PRENSADO HIDRÁULICO

El prensado hidráulico es un proceso de conformado en el que se utiliza la presión generada por un sistema hidráulico para comprimir o moldear materiales. El cilindro hidráulico es el componente principal del sistema y es responsable de generar la fuerza de prensado. Consiste en un cilindro con un pistón móvil que se desplaza hacia arriba o hacia abajo. Las prensas hidráulicas se utilizan en una amplia gama de industrias para fabricar piezas y productos con alta precisión y control de calidad. Este proceso se basa en el Principio de Pascal. Según este principio, cuando se aplica presión a un fluido confinado, dicha presión se distribuye de manera uniforme en todas las direcciones. En una prensa hidráulica, esto significa que una pequeña cantidad de fuerza aplicada a un pistón pequeño puede amplificarse y generar una fuerza mucho mayor en un pistón más grande (McCabe y Smith, 1985).

Un ejemplo destacado del prensado hidráulico es su uso en la industria automotriz para moldear piezas de gran tamaño, como paneles de carrocería. También se utiliza en la industria minera, donde se emplean para separar minerales útiles de las materias primas. Además, en la industria alimentaria, las prensas hidráulicas se utilizan para la extracción de aceites de semillas o zumos de frutas, aplicando grandes presiones de forma controlada. Otro ejemplo son las prensas utilizadas en el reciclaje para compactar materiales, reduciendo su volumen y facilitando su transporte. En cuanto a los aspectos técnicos, las prensas hidráulicas pueden generar fuerzas de compresión desde unas pocas toneladas hasta más de mil toneladas, dependiendo de la aplicación. Las prensas de 1000 toneladas se utilizan en sectores como la fabricación de componentes aeronáuticos o la producción de grandes estructuras metálicas. La capacidad de controlar con precisión la fuerza aplicada es una de las ventajas clave del prensado hidráulico, lo que lo convierte en un proceso altamente eficiente y versátil (McCabe y Smith, 1985).

5. SECADO

El secado es el proceso mediante el cual se eliminan los materiales volátiles, generalmente agua, de un material para obtener un producto sólido. Este proceso involucra tanto la transferencia de

calor como la de masa. Paralelamente, el material evaporado debe abandonar el sólido mediante mecanismos de difusión y/o convección (Perry y Chilton, 1984).

Uno de los mayores retos en el control de los secadores es la dificultad para medir en tiempo real la tasa de alimentación y la composición tanto del material de entrada como del producto final. Generalmente, los secadores funcionan transfiriendo la humedad del material húmedo al aire seco y caliente en una sola pasada. El proceso tiende a autorregularse, ya que a medida que el material se seca, la eliminación de la humedad se vuelve más difícil, lo que se conoce como la fase de "tasa decreciente de secado". El control de la temperatura del aire que sale de un secador con corriente suele regular la humedad del producto, siempre que el flujo y la humedad del aire y del material de entrada se mantengan constantes. Sin embargo, cuando la temperatura del aire de salida se mantiene constante, la humedad del producto aumenta si cualquiera de estas variables se ve alterada (Perry y Chilton, 1984).

En ausencia de analizadores de humedad, la regulación de la calidad del producto puede mejorarse aumentando la temperatura del aire de escape en proporción a la carga evaporativa. Esta carga puede estimarse observando la caída de temperatura del aire mientras pasa por el secador en estado estable. Cualquier cambio en la carga primero se refleja en variaciones en la temperatura del aire de escape, lo que permite al controlador ajustar la temperatura del aire de entrada para estabilizar el proceso. Este tipo de control es fundamental para asegurar la uniformidad en el secado de productos en sectores como el alimentario, químico o de materiales de construcción, donde la variabilidad en la humedad puede afectar gravemente la calidad final del producto (Perry y Chilton, 1984).

6. MOLDEO

Existen varias técnicas de moldeo para trabajar con materiales viscosos, cada una con aplicaciones específicas dependiendo de las propiedades del material, la finalidad del producto y los recursos disponibles. El moldeo por compresión consiste en colocar el material en un molde y aplicar presión para darle forma. Esta técnica se utiliza ampliamente en la industria de plásticos y cerámica, además de ser adecuada para bioproductos. Una vez comprimido, el material puede necesitar curado térmico o químico para solidificar. Esta técnica es ideal para productos densos y uniformes, como placas, baldosas y compuestos estructurales. Su principal ventaja radica en su capacidad de producir piezas con una alta precisión dimensional y una densidad uniforme (Nin, 2014).

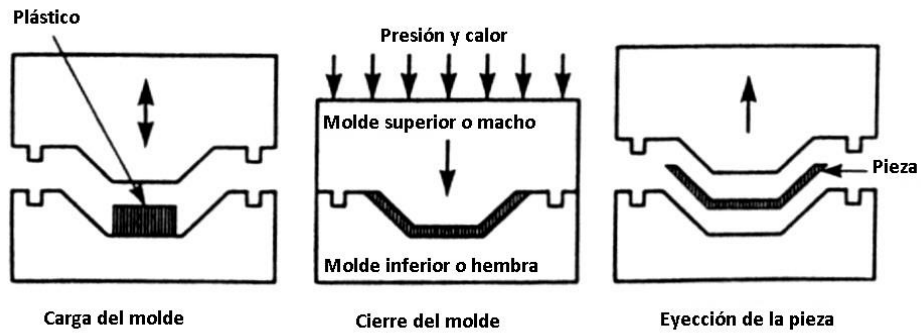


Figura 4. Principio de moldeo por compresión

Fuente: Nin (2014)

El moldeo por extrusión es un método continuo donde el material se fuerza a pasar por una boquilla que le da forma a una sección transversal específica. Este proceso es común en la fabricación de ladrillos, tubos, perfiles plásticos y materiales de construcción. La extrusión permite un control preciso de la forma, y su naturaleza continua la hace eficiente para producciones de gran escala. Una vez extruido, el material se corta a las dimensiones deseadas y se seca o endurece según sea necesario. Por otro lado, aunque más conocido en plásticos, el moldeo por inyección también se aplica en materiales viscosos bajo ciertas condiciones. El material se calienta (si es necesario), se inyecta en un molde cerrado y toma forma al enfriarse o solidificarse. Este método es particularmente útil para productos con formas complejas y detalles intrincados. Es ampliamente utilizado en la producción de piezas técnicas, juguetes y envases biodegradables (Nin, 2014).

En el moldeo por deslizamiento se vierte una suspensión líquida de material (slip) en un molde poroso, generalmente de yeso. El molde absorbe el exceso de agua, formando una capa sólida en las paredes internas. Este método es común en la industria cerámica, especialmente para la producción de piezas huecas como vajillas, jarrones y figuras decorativas. Es ideal para diseños delicados, pero requiere control cuidadoso de la consistencia del slip y el tiempo de permanencia en el molde. El moldeo por vaciado implica verter el material en un molde abierto o cerrado. A medida que el material se seca o solidifica, toma la forma del molde. Esta técnica se emplea en la creación de figuras ornamentales, bioproductos y utensilios. Es una opción económica y sencilla, pero puede requerir mucho tiempo dependiendo del tipo de material. El laminado implica extender el material en capas finas que se prensan o moldean para obtener productos finales. Es común en la fabricación de películas delgadas, laminados plásticos y productos biocompuestos. Este método permite controlar el

grosor y las propiedades superficiales, siendo esencial en aplicaciones donde la uniformidad es clave (Nin, 2014).

La elección de la técnica depende de varios factores, como las propiedades del material (viscosidad, plasticidad), el tamaño y la complejidad del producto, y las condiciones de fabricación (recursos y escalabilidad). En el contexto de la economía circular, estas técnicas pueden adaptarse para optimizar el uso de materiales reciclados o renovables, contribuyendo a la sostenibilidad (Nin, 2014).

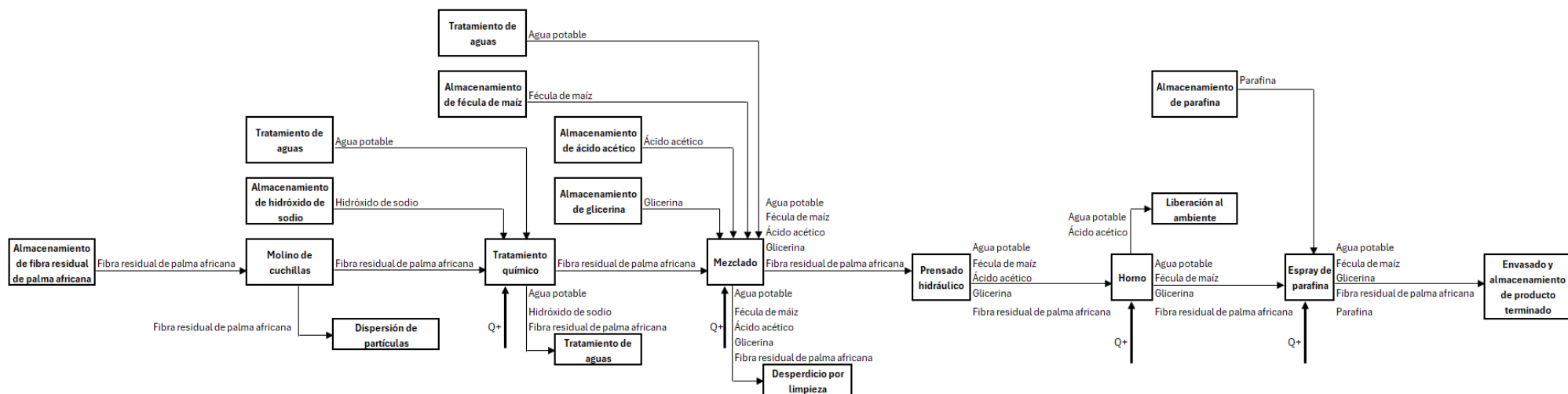
I. BALANCE DE MASA Y ENERGÍA

El balance de masa se refiere a la conservación de la masa en un sistema dado. Este principio establece que la cantidad total de masa en un sistema cerrado permanece constante con el tiempo, lo que implica que la masa que entra en el sistema es igual a la masa que sale, más cualquier cambio en la acumulación interna o reacciones. La importancia del balance de masa radica en entender y cuantificar los flujos de materiales en procesos industriales para analizar y diseñar sistemas de producción (Felder y Rousseau, 2004).

El balance de energía se centra en la conservación de la energía en un sistema dado. Este principio establece que la cantidad total de energía en un sistema cerrado se mantiene constante con el tiempo. La importancia del balance de energía radica en su capacidad para cuantificar y comprender los flujos y cambios de energía en un sistema. En un sistema cerrado, la energía puede transferirse entre diferentes formas, permitiendo evaluar cómo estas formas de energía interactúan y cómo se conserva la energía en el sistema. El balance de energía es crucial para evaluar y mejorar la eficiencia energética de los procesos industriales y para abordar la sostenibilidad y el impacto ambiental; también permite identificar oportunidades para la recuperación de calor, el uso eficiente de fuentes de energía y la reducción de pérdidas en los sistemas (Felder y Rousseau, 2004).

La aplicación del balance de masa y energía en las etapas de planificación y diseño de procesos es esencial. La identificación de ineficiencias, pérdidas innecesarias o desviaciones en los flujos de materiales y energía brinda la oportunidad de ajustar el diseño y las operaciones para mejorar la eficiencia y reducir costos. Además, permite anticipar desafíos potenciales y tomar decisiones informadas desde el principio, evitando problemas operativos futuros (Felder y Rousseau, 2004).

Figura 5. Balance de masa y energía del proceso de elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana



Fuente: Elaboración propia

J. DIAGRAMA DE PROCESOS

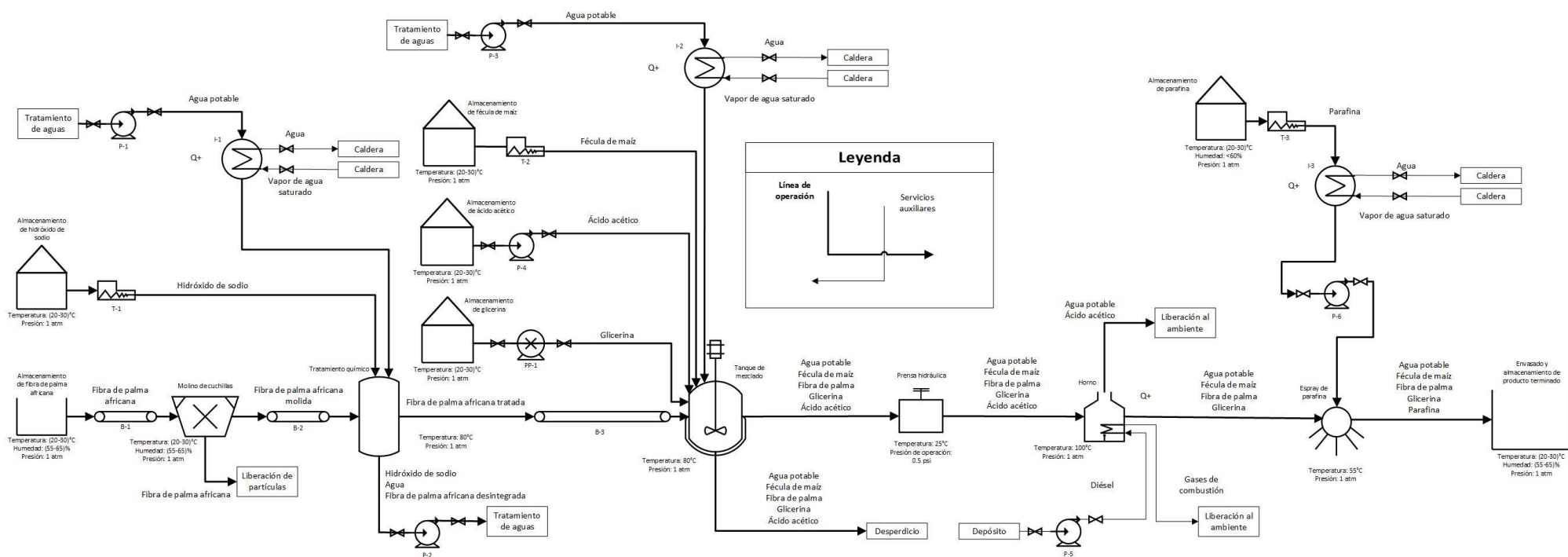
Un diagrama de procesos (PFD) es una representación visual que ilustra las principales operaciones de un proceso industrial, destacando los equipos involucrados, los flujos de materiales y las condiciones operativas claves. Es una herramienta crucial en la ingeniería de procesos. Su propósito es mostrar el recorrido que siguen las materias primas desde su entrada hasta la obtención del producto final, permitiendo a los ingenieros y operadores visualizar el proceso completo (Peters, Timmerhaus y West, 2003).

El PFD suele incluir componentes esenciales como los equipos principales (reactores, intercambiadores de calor, bombas, entre otros), los flujos de materiales (líquidos, gases o sólidos), y las corrientes de entrada y salida. Estos elementos están representados con símbolos estandarizados, lo que facilita su interpretación. Además, se proporcionan datos técnicos como caudales, temperaturas y presiones en las corrientes de materiales. La simplicidad del diagrama permite centrarse en las operaciones clave sin sobrecargar de detalles (Peters, Timmerhaus y West, 2003).

Los PFD son fundamentales en varias etapas del diseño y operación de un proceso. En el diseño conceptual, permiten evaluar diferentes configuraciones de proceso y tomar decisiones sobre la selección de equipos. En la operación y control, ayudan a identificar posibles problemas y optimizar el rendimiento de las plantas industriales. También son utilizados en la simulación de procesos, donde los datos se integran en software especializado para realizar simulaciones y predicciones de comportamiento bajo diferentes condiciones. Además, es útil para realizar análisis de seguridad, ya que muestra las rutas de los materiales y posibles puntos críticos donde pueden ocurrir incidentes (Peters, Timmerhaus y West, 2003).

El PFD permite realizar balances de masa y energía dentro de un proceso. Los flujos de material que se representan son clave para entender cómo se distribuyen los componentes en el proceso, lo que facilita el diseño y la operación efectiva. El balance de masa asegura que todos los materiales que entran en el sistema están contabilizados en las salidas (Peters, Timmerhaus y West, 2003).

Figura 6. Diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana



Fuente: Elaboración propia

V. ANTECEDENTES

Se realizaron toallas sanitarias biodegradables a partir del tallo de la planta de banano. Primero se caracterizó y trató el pinzote de banano para determinar si era posible utilizarlo como pasta celulósica para producir las toallas sanitarias. La fibra presentó un contenido de celulosa de 71% en promedio y un contenido de lignina de 6% en promedio. Esto indicó que la fibra era favorable para la producción de las toallas sanitarias. Se trató la fibra con un proceso de soda modificada y se produjeron pliegos de papel de 19 x 14 pulgadas para realizar las toallas sanitarias. Las toallas sanitarias presentaron una absorción de 12 mL y degradabilidad del 78% de pérdida de peso en 80 días (Velásquez, *et al.*, 2016).

Según Isroi, *et al.* (2017), la biomasa residual de los racimos vacíos de fruta (EFB, por sus siglas en inglés) se genera en grandes cantidades como subproducto de la producción de aceite de palma crudo (CPO) en Indonesia. En 2015, la producción de EFB en Indonesia alcanzó los 28.65 millones de toneladas. Estos residuos están compuestos por un 36.67% de celulosa, un 13.50% de hemicelulosa y un 31.16% de lignina. Mediante cálculos, se estima que el potencial de celulosa extraíble de los EFB asciende a 11.50 millones de toneladas, lo que sugiere una oportunidad significativa para su aprovechamiento en la producción de bioplásticos. La celulosa extraída de los EFB podría ser utilizada como materia prima para la producción de bioplásticos, añadiendo valor a estos residuos agrícolas. Sin embargo, la fibra de celulosa por sí misma no posee propiedades plásticas, lo que implica la necesidad de modificaciones moleculares y la incorporación de plastificantes y compatibilizadores para hacerla viable en la producción de bioplásticos.

Investigaciones previas han delineado los principales pasos para la producción de bioplásticos a partir de EFB. Estos incluyen la extracción y purificación de celulosa utilizando métodos con hidróxido de sodio y blanqueo con hipoclorito de sodio, alcanzando una pureza del 97%. Dependiendo del contenido de celulosa en los EFB, el rendimiento de la celulosa puede llegar al 30%. Para mejorar las propiedades plásticas, las cadenas laterales de celulosa se oxidaron, reduciendo los grupos hidroxilo e incrementando los grupos carboxilo. La síntesis de bioplásticos empleó glicerol como plastificante y almidón de yuca como matriz. Los resultados de esta investigación no solo demuestran la viabilidad de convertir los EFB en bioplásticos, sino que también sugieren un potencial significativo para el desarrollo futuro de bolsas de plástico y empaques de alimentos a partir de celulosa de EFB (Isroi, *et al.*, 2017).

El objetivo de la investigación de Nora, *et al.* (2023), es producir plástico a partir de cáscaras de papa y evaluar cómo diferentes condiciones operativas afectan sus características, incluyendo el

comportamiento de biodegradación, la resistencia a la tracción y la absorción de agua. En los experimentos, se utilizó ácido acético en concentraciones de 4, 6 y 8 ml, demostrando que una concentración de 8 ml era la más eficaz desde el punto de vista de la biodegradación. Además, se empleó glicerina en cantidades de 2, 4 y 6 ml, observándose una relación directa entre la cantidad de glicerina y la degradación, así como una relación inversa entre la absorción de agua y la cantidad de glicerina. También se probaron diferentes temperaturas de reacción y secado, mostrando que las temperaturas bajas mejoran las propiedades del plástico producido. Estos estudios son cruciales para comprender cómo las variaciones en las condiciones de procesamiento pueden influir en las propiedades finales de los bioplásticos. La investigación no solo aporta soluciones prácticas para reducir la contaminación plástica mediante el uso de materiales biodegradables, sino que también busca optimizar las condiciones de producción para asegurar que los bioplásticos sean viables tanto económica como ambientalmente.

El objetivo del estudio de Gonzalo, *et al.* (2007), es la utilización de los residuos de la producción de aceite de palma, conocidos como racimos vacíos de fruto (EFB), para la producción de papel. La pulpa de EFB se produjo utilizando un proceso semiquímico patentado por la empresa Straw Pulping Engineering S.L., empleando hidróxido de sodio en una planta a escala de laboratorio. Se produjeron diferentes tipos de papel mezclando esta pulpa con pulpa de Contenedores de Cartón Viejo (OCC), en porcentajes en peso de 100% EFB, 75% EFB, 50% EFB y 25% EFB, logrando resultados bastante similares a los del papel fabricado con 100% OCC. Una parte de esta pulpa se limpió utilizando un hidrociclón y un limpiador de tamiz, lo que resultó en una mejora sustancial en las propiedades del papel producido. Por otro lado, una porción del papel hecho de 100% pulpa de EFB se volvió a repulpar después de cuatro semanas para la producción de nuevo papel. Las pruebas físicas no mostraron un cambio significativo en la mayoría de las propiedades del papel después del repulpado, con la excepción de una disminución significativa en el índice de aplastamiento de columna (CMT 30).

Gopalan (2019) y Kumar (2020) han explorado el potencial de la fibra de coco como una alternativa ecológica a los plásticos convencionales. En un estudio realizado por investigadores en India, se logró desarrollar platos biodegradables a partir de la cáscara de coco y otros residuos derivados de la palma de coco. Estos platos fueron evaluados en términos de propiedades mecánicas, durabilidad y resistencia al agua, demostrando que la fibra de coco no solo es un recurso renovable y abundante, sino que también presenta un buen desempeño en la fabricación de productos desechables. El proceso de fabricación de estos platos implicó técnicas de prensado y secado, similar a otros materiales vegetales, y se encontró que la adición de glicerina y almidón mejoraba la resistencia y

flexibilidad de los productos finales. Este tipo de investigaciones subraya el potencial de los subproductos agrícolas en la fabricación de artículos de un solo uso, promoviendo así el concepto de economía circular y reducción del impacto ambiental de los residuos agrícolas.

VI. METODOLOGÍA

A. PRIMERA FASE: CARACTERIZACIÓN DE LA FIBRA

Cristalería:

- Agitador magnético
- Beaker Kimax de 100 mL (± 10 mL)
- Beaker Kimax de 50 mL (± 5 mL)
- Bulbo para pipeta
- Espátula
- Pipeta de 25 mL
- Probeta Isolab de 100 mL (± 0.5 mL)
- Varilla de agitación

Equipos:

- Balanza OHAUS modelo V31XH2 (0 g – 2000 g; ± 0.1 g)
- Balanza analítica OHAUS modelo PA114 (0 g – 110 g; ± 0.0001 g)
- Balanza de humedad OHAUS modelo MB120 (0 g – 120 g; ± 0.0001 g)
- Estufa eléctrica Vevor
- Horno eléctrico Indurama (máx. 270°C)
- Metro Milwaukee (2 cm – 500 cm; ± 0.1 cm).

Materiales y reactivos:

- Ácido sulfúrico al 95% (19 mL)
- Agua destilada para lavar
- Etanol (150 mL)
- Fibra de palma residual fina (10.82 kg) y de raquis (6.42 kg)
- Hidróxido de sodio al 99.5% (7.9 g)
- Papel aluminio

Procedimiento:

1. RECEPCIÓN DE MATERIA PRIMA

- a. Recibir fibra de palma fina (10.82 kg) y de raquis (6.42 kg) residual.

2. CONTENIDO DE HUMEDAD
 - a. Introducir fibra cruda a una balanza de humedad.
 - b. Programar la balanza de humedad a 140°C estándar A60 (1 mg/60 s) para determinar el porcentaje de humedad en la muestra.

3. PORCENTAJE DE CELULOSA, HEMICELULOSA Y LIGNINA
 - a. Pesar 2 g de fibra cruda con una balanza analítica.
 - b. Hervir la fibra cruda pesada en un beaker de 100 mL con 50 mL de etanol medidos con una probeta de 100 mL por 15 minutos a 70°C (buscando ebullición) en una estufa eléctrica.
 - c. Lavar la fibra cruda con agua destilada y desechar el etanol.
 - d. Repetir los incisos b y c tres veces más.
 - e. Secar la muestra en un horno eléctrico a 40°C por 4 horas.
 - f. Dividir la muestra en dos partes iguales, nombrar una parte A y pesarla con una balanza analítica.
 - g. Pesar 7.9 g de hidróxido de sodio al 99.5% con una balanza y disolver en 25 mL de agua destilada en un beaker de 50 mL.
 - h. Sumergir la otra parte de la muestra en la una solución de hidróxido de sodio por 4 horas con ayuda de una varilla de agitación.
 - i. Lavar la fibra y secarla en un horno eléctrico a 80°C por 4 horas.
 - j. Pesar la fibra con una balanza analítica y nombrarla B.
 - k. Verter 19 mL de ácido sulfúrico al 95% con ayuda de una probeta de 100 mL en un beaker de 50 mL con 7 mL de agua destilada y mezclar.
 - l. Tratar la fibra B con la solución de ácido sulfúrico por 3 horas con ayuda de una varilla de agitación.
 - m. Lavar la fibra B con agua destilada y secarla en un horno eléctrico a 80°C por 4 horas.
 - n. Pesar la fibra con una balanza analítica y nombrarla C.

4. TAMAÑO DE PARTÍCULA
 - a. Medir el largo de 10 fibras individuales con un metro.

B. SEGUNDA FASE: ELABORACIÓN DE PLATOS

Cristalería:

- Beaker Kimax de 1 L (± 100 mL)
- Cubeta plástica de 10 L
- Molde de madera para platos
- Olla de acero inoxidable de 1 L
- Probeta Kimax de 1 L (± 1 mL)
- Varilla de agitación

Equipos:

- Balanza OHAUS modelo V31XH2 (0 g – 2000 g; ± 0.1 g)
- Estufa eléctrica Vevor
- Horno eléctrico Indurama (máx. 270°C)
- Molino de cuchillas Clit Mill modelo CPMFM con tamiz de Mesh 100
- Prensa hidráulica Carver modelo 3912

Materiales y reactivo:

- Bolsa de basura de 15 galones
- Ácido acético al 99.9% (2 g)
- Agua potable
- Fécula de maíz (40 g)
- Fibra cruda (100 g)
- Glicerina al 99.9% (10 g)
- Hidróxido de sodio al 99.5% (12.6 g)
- Papel filme
- Parafina al 99.9% (3.8 g)
- Tape

Procedimiento:

1. TRATAMIENTO MECÁNICO

- a. Colocar una bolsa de basura en la descarga del molino de cuchillas y pegarla con tape para capturar la fibra.
- b. Colocar el tamiz de Mesh 100 en el molino de cuchillas.

- c. Encender el equipo con el botón de inicio.
 - d. Introducir la fibra al molino de cuchillas y operar a 35 rpm.
2. TRATAMIENTO QUÍMICO
- a. Preparar 500 g de una solución de hidróxido de sodio al 2.5% m/m al verter 12.6 g de hidróxido de sodio al 99.5%, medido con una balanza, en un beaker de 1 L con 487 g de agua potable.
 - b. Introducir 100 g de fibra cruda, medida con una balanza, en la solución preparada.
 - c. Calentar el beaker a 80°C con una estufa eléctrica por tres horas.
 - d. Lavar la fibra con agua potable por 3 minutos.
3. ELABORACIÓN DE MOLDE
- a. Diseñar un molde con forma de plato considerando alturas, diámetros, grosores y engravados.
 - b. Cotizar un molde de madera con las dimensiones deseadas.
4. ELABORACIÓN DE MEZCLA
- a. Pesar 40 g de fécula de maíz con una balanza y mezclar con 400 mL de agua potable, medida con una probeta de 1 L, en una olla de acero inoxidable por 10 minutos a 60°C en una estufa eléctrica y con varilla de agitación.
 - b. Pesar 50 g de fibra con una balanza y agregar a la mezcla hasta homogenizar con la varilla de agitación a 80°C por 5 minutos.
 - c. Pesar 2 g de ácido acético y 10 g de glicerina con una balanza y agregar a la mezcla.
 - d. Mezclar con una varilla de agitación hasta homogenizar a 80°C por 15 minutos.
 - e. Cubrir la mezcla con una hoja superior e inferior de papel filme y esperar a que se enfríe la mezcla.
5. MOLDEO DEL PLATO
- a. Colocar la parte inferior del molde en la prensa hidráulica.
 - b. Colocar la mezcla, con el papel filme, encima del molde inferior.
 - c. Colocar la parte superior del molde encima.
 - d. Prensar el molde con la mezcla en su interior con la prensa hidráulica hasta 0.5 psi.
 - e. Quitar la parte superior del molde e introducir la parte inferior del molde, con la mezcla, al horno eléctrico a 100°C por 30 minutos.
 - f. Quitar el plato del molde e introducir el plato al horno eléctrico a 100°C otros 30 minutos.

6. RECUBRIMIENTO DE PARAFINA

- a. Derretir parafina en una olla de acero inoxidable con una estufa eléctrica a 55°C.
- b. Verter parafina con ayuda de un pincel al plato de un solo uso y distribuir hasta formar una capa uniforme y delgada.

C. TERCERA FASE: CARACTERIZACIÓN DEL PLATO

Cristalería:

- Beaker Kimax de 100 mL (± 10 mL)
- Masas estándares de 100 g (10)
- Probeta Isolab de 100 mL (± 0.5 mL)
- Varilla de agitación

Equipos:

- Balanza OHAUS modelo V31XH2 (0 g – 2000 g; ± 0.1 g)
- Balanza analítica OHAUS modelo PA114 (0 g – 110 g; ± 0.0001 g)
- Estufa eléctrica Vevor
- Horno eléctrico Indurama (máx. 270°C)
- Metro Milwaukee (2 cm – 500 cm; ± 0.1 cm)
- Potenciómetro AB15 Plus (0.000 – 14.000; ± 0.001)
- Sargentos (2)

Materiales y reactivos:

- Agua destilada (100 mL)

Programas:

- Adobe Illustrator

Procedimiento:

1. COLOR DEL PLATO

- a. Tomar una imagen del plato y subirla al software de Adobe Illustrator en <https://color.adobe.com/es/create/image> para obtener el color Pantone medio, máximo y promedio.

2. DIMENSIONES DEL PLATO

- a. Medir el diámetro y grosor del plato con un metro.

3. MASA POR PLATO

- a. Pesar el plato obtenido con una balanza.

4. pH DEL PLATO

- a. Introducir una muestra del plato en un beaker de 100 mL con 50 mL de agua destilada y agitar por 1 minuto con una varilla de agitación.
- b. Luego de reposar por 10 minutos, medir el pH con el potenciómetro.

5. DENSIDAD

- a. Pesar una muestra del plato con una balanza de humedad.
- b. Medir 50 mL de agua destilada en una probeta de 100 mL.
- c. Introducir la muestra a la probeta y volver a medir el volumen.

6. ABSORCIÓN DE AGUA EN EL PLATO (PRUEBA DE HUMECTACIÓN)

- a. Pesar una masa de agua suficiente para llenar el plato elaborado, con una balanza.
- b. Verter la masa de agua en el plato elaborado.
- c. Esperar 15 minutos y volver a pesar la masa de agua.
- d. Repetir el paso anterior para 30 minutos, 1 hora, 3 horas y 6 horas.

7. TEMPERATURA MÁXIMA DE UTILIZACIÓN

- a. Meter una muestra del plato al horno eléctrico a 40°C por 1 hora.
- b. Meter una muestra del plato al horno eléctrico a 50°C por 1 hora.
- c. Meter una muestra del plato al horno eléctrico a 60°C por 1 hora.

8. RESISTENCIA MECÁNICA

- a. Colocar el plato con dos puntos de las orillas sostenidas por sargentos y el centro sin soporte.

- b. Agregar masas conocidas de 1, 2 y 3 lb en el centro y medir la altura de la depresión provocada por las masas con un metro.
- c. Colocar otro plato en el sargento con solo un punto de la orilla sostenida.
- d. Agregar masas conocidas de 1, 2 y 3 lb en el otro extremo y medir la altura que desciende el extremo no sostenido con un metro.

D. CUARTA FASE: DIAGRAMA DEL PROCESO

Programas:

- Visio

Procedimiento:

1. DEFINICIÓN DE BLOQUES
 - a. Definir las operaciones unitarias del proceso.
 - b. Ordenar las operaciones unitarias del proceso.
 - c. Conectar cada operación unitaria por medio de flechas unidireccionales.
2. BALANCE DE MASA
 - a. Definir el material y su masa utilizada en cada operación unitaria.
 - b. Realizar el balance de masa para cada operación unitaria y de todo el proceso.
3. BALANCE DE ENERGÍA
 - a. Definir la energía suministrada al proceso en cada operación unitaria.
 - b. Realizar el balance de energía para cada operación unitaria y de todo el proceso.
4. DIAGRAMA DEL PROCESO
 - a. Realizar el diagrama del proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana con el programa VISIO.

E. DISEÑO DEL EXPERIMENTO

Se recibió una muestra homogénea de fibra residual de palma africana fina y de raquis, por lo que se decidió realizar cuatro experimentos para cada tipo (cuadruplicado). El uso de cuadruplicado en muestras homogéneas es una práctica común en experimentos para garantizar la precisión de los resultados; este permite reducir la variabilidad que puede surgir por errores

experimentales o fluctuaciones menores en las condiciones de prueba. Además, el cuadruplicado ofrece una base suficiente para calcular promedios y desviaciones estándar, permitiendo evaluar la reproducibilidad del experimento. Esto optimiza el uso de recursos, ya que más réplicas suelen ser innecesarias cuando la muestra es homogénea y los resultados son consistentes. Se realizó diez pruebas para el largo de las fibras debido a la naturaleza del largo de fibra de palma africana, la cual es altamente variante.

Se realizó cuadruplicado en la elaboración del prototipo, al igual que para las pruebas realizadas.

VII. RESULTADOS

Cuadro 1. Características físicas de la fibra residual de palma africana

Fibra residual de palma africana	Largo de fibra (cm)	Porcentaje de humedad (%)
Fina	4.0 ± 1.5	10.480 ± 0.002
De raquis	6.9 ± 1.6	10.690 ± 0.004

El cuadro anterior presenta las características físicas medidas a la fibra residual de palma africana fina y de raquis (largo de fibra y porcentaje de humedad), los datos se encuentran en el Cuadro 8 y 9.

Cuadro 2. Características químicas de la fibra residual de palma africana

Fibra residual de palma africana	Porcentaje de celulosa (%)	Porcentaje de hemicelulosa (%)	Porcentaje de lignina (%)
Fina	40.74 ± 2.21	20.75 ± 3.05	38.51 ± 1.62
De raquis	38.35 ± 2.77	16.85 ± 0.49	44.80 ± 2.72

El cuadro anterior presenta las características químicas medidas a la fibra residual de palma africana fina y de raquis (porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina), los datos se encuentran en el Cuadro 17.

Figura 7. Prototipo plato de un solo uso elaborado a partir de fibra residual de palma africana



Cuadro 3. Características físicas del plato de un solo uso

	Pantone promedio	Masa (g)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Grosor (cm)
Plato de un solo uso	406 C	27.9 ± 3.1	14.1 ± 0.1	4.4 ± 0.1	0.35 ± 0.06

El cuadro anterior presenta las características físicas medidas al plato de un solo uso elaborado (Pantone promedio, masa, diámetro, altura y grosor), los datos se encuentran en el Cuadro 11.

Cuadro 4. Características fisicoquímicas del plato de un solo uso

	pH	Densidad (g/mL)	Temperatura máxima de utilización (°C)
Plato de un solo uso	5.73 ± 0.07	0.235 ± 0.027	50

El cuadro anterior presenta las características fisicoquímicas medidas al plato de un solo uso elaborado (pH, densidad a 25°C y temperatura máxima de utilización), los datos se encuentran en el Cuadro 12 y 18.

Cuadro 5. Absorción de agua del plato de un solo uso a distintos tiempos

	Absorción de agua en 15 min (%)	Absorción de agua en 30 min (%)	Absorción de agua en 1 h (%)	Absorción de agua en 3 h (%)	Absorción de agua en 6 h (%)
Plato de un solo uso	0.334 ± 0.003	1.33 ± 0.40	2.60 ± 0.35	10.1 ± 0.8	17.7 ± 0.7

El cuadro anterior presenta la absorción de agua a 25°C medida al plato de un solo uso elaborado para distintos tiempos de contacto (15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas y 6 horas), los datos se encuentran en el Cuadro 19.

Cuadro 6. Elongación del plato de un solo uso bajo carga en el centro con apoyo en dos extremos opuestos

	Elongación por 1 libra (cm)	Elongación por 2 libras (cm)	Elongación por 3 libras (cm)
Plato de un solo uso elaborado	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.08 ± 0.05

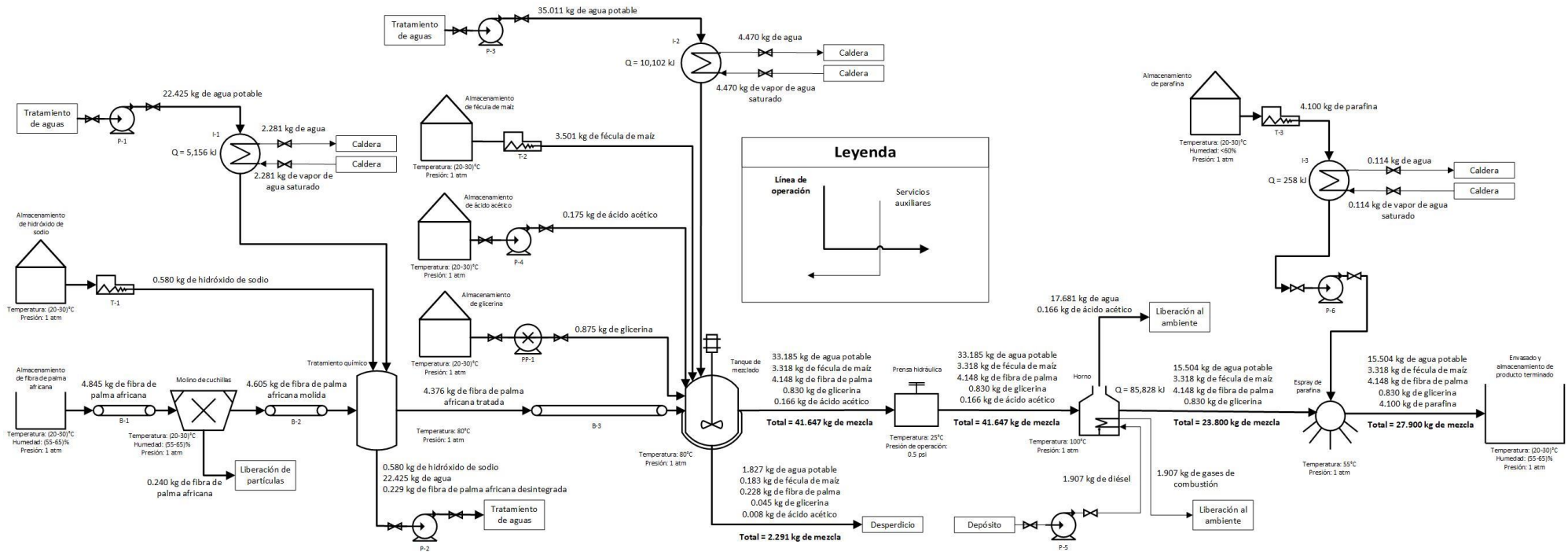
El cuadro anterior presenta la elongación medida al plato de un solo uso elaborado bajo carga de distintas masas (1 libra, 2 libras y 3 libras) en el centro del plato, sosteniéndose por dos extremos opuestos, los datos se encuentran en el Cuadro 14.

Cuadro 7. Elongación del plato de un solo uso bajo carga en un extremo con apoyo en el extremo opuesto

Plato de un solo uso	Elongación por 1 libra (cm)	Elongación por 2 libras (cm)	Elongación por 3 libras (cm)
Elaborado	2.7 ± 0.2	4.0 ± 0.3	5.2 ± 0.4
Poliestireno expandido	7.0 ± 0.1	14.0 ± 0.1	-
Polipropileno	14.0 ± 0.1	-	-

El cuadro anterior presenta la elongación medida al plato de un solo uso elaborado bajo carga de distintas masas (1 libra, 2 libras y 3 libras) en un extremo del plato, sosteniéndose por el extremo opuesto, los datos se encuentran en el Cuadro 15.

Figura 8. Diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana para producir 1000 platos en 1 día de operación



VIII. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La fibra de palma africana después de haberle extraído el aceite no es de interés para esta industria, por lo que se recibió dicha fibra residual (fina y de raquis) para producir platos de un solo uso. Se observó inicialmente que la fibra residual fina presenta un largo de $4.0 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$ y la de raquis de $6.9 \text{ cm} \pm 1.6 \text{ cm}$; siendo esta última más larga en promedio. Esto se debe a que la fibra de raquis es más rígida, presentando mayor resistencia al corte durante el proceso de extracción de aceite de la fibra de palma africana. Una fibra de mayor largo y rigidez presentará mayor esfuerzo del molino de cuchillas en el proceso de molienda, implicando mayor energía eléctrica y tiempo para obtener el tamaño de partícula deseado, pero aportará resistencia a las deformaciones mecánicas.

El porcentaje de humedad de la fibra residual de palma africana fina y de raquis fue similar, $10.480\% \pm 0.002\%$ y $10.690\% \pm 0.004\%$, respectivamente. Un porcentaje de humedad relativamente bajo es beneficioso para la elaboración de platos de un solo uso debido a la facilidad para manipular la fibra; un porcentaje de humedad relativamente alto ($> 60\%$) implicaría mezclas heterogéneas, grumos y pérdidas significativas de fibra en las paredes de los equipos. Se sustentó que ambos tipos de fibras residuales (fina y de raquis) son aptos como materia prima en la elaboración de platos de un solo uso, en función del porcentaje de humedad.

Se midió el porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina a la fibra residual de palma africana fina y de raquis para evaluar si cumplían con la composición propuesta según la literatura para elaborar algún tipo de utensilio (celulosa $> 30\%$, hemicelulosa $> 15\%$, lignina $< 15\%$) (Neyra, et. al., 2022). Se determinó que en promedio la fibra fina tiene $40.74\% \pm 2.21\%$ celulosa, $20.75\% \pm 3.05\%$ hemicelulosa y $38.51\% \pm 1.62\%$ lignina. Por otro lado, la fibra de raquis obtuvo en promedio $38.35\% \pm 2.77\%$ celulosa, $16.85\% \pm 0.49\%$ hemicelulosa y $44.80\% \pm 2.72\%$ lignina. Ambas fibras cumplieron con el requerimiento de celulosa y hemicelulosa, pero presentaron mayor contenido de lignina que la composición propuesta según la literatura. Esto pudo suceder debido al método para determinar el porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina, donde se determinaba la celulosa y hemicelulosa, y el peso restante se asumía como lignina; aunque es una buena aproximación a la cantidad de lignina presente, pueden existir otros componentes orgánicos. Por ende, se sustentó ambos tipos de fibras residuales aptos como materia prima en la elaboración de platos de un solo uso. Sin embargo, se debe incluir un proceso de eliminación de lignina, como tratamiento químico con hidróxido de sodio y calor. Eliminar la lignina de la fibra residual de palma africana es esencial para producir platos de un solo uso, ya que mejora la flexibilidad y maniobrabilidad del material y aumenta la pureza de la celulosa, facilitando la absorción de aditivos (Rosli y Law, 2011).

Se realizó la eliminación de lignina como un tratamiento químico con hidróxido de sodio y calor a la fibra fina y de raquis. La fibra residual fina se deshizo, perdiendo masa en el proceso por el tamaño de partícula. Además, presentó una coloración negra profunda -color no deseado para un plato-. La fibra residual de raquis soportó el tratamiento químico y conservó su color inicial. Por lo que se decidió seguir el proceso de elaboración del plato de un solo uso con la fibra residual de raquis.

Se elaboraron platos de un solo uso a partir de literatura y experimentaciones (ver Anexo E) para obtener el prototipo final. El Pantone mínimo del plato elaborado se mantuvo mayormente en 4655 C, el cual es un tono marrón claro con matices cálidos; esto indica que este el color más claro a esperar en el plato de un solo uso elaborado. Igualmente, el Pantone máximo y promedio a esperar en el plato elaborado es entre 4745 C – 4755 C (tonos marrones claros con matices rosados o beige suave), y 410 C – 411 C (tonos marrones oscuros con matices grisáceos), respectivamente. Los colores mencionados anteriormente reflejan el color natural de la fibra residual de palma africana de raquis. Además, los tonos claros producen sensación de limpieza y pureza (Corbella, 2018). Así, el color del plato resultó satisfactorio para el prototipo final.

Las dimensiones del plato se ajustaron a las limitaciones del equipo y el presupuesto disponibles para la experimentación. Sin embargo, sería posible crear diferentes moldes para adaptar el prototipo a las dimensiones de otros platos plásticos y así comparar sus características físicas. El prototipo final presentó una masa promedio de $27.9 \text{ g} \pm 3.1 \text{ g}$ para un plato de $14.1 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ de diámetro, $0.35 \text{ cm} \pm 0.06$ de grosor y $4.4 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ de altura. Para un plato de un solo uso, la masa obtenida a partir de sus dimensiones es razonable, ya que resulta fácil de manipular tanto en peso como en tamaño.

El moldeo del prototipo fue el mayor obstáculo para su creación. Se utilizó la técnica de compresión, pero no se contaba con la maquinaria necesaria para presentar un plato con las características físicas deseadas. Esto implicó distintos grosores del plato en varias corridas, lo cual también fue positivo para la investigación, ya que se avistó que, dependiendo del grosor del prototipo, la flexibilidad variaba proporcionalmente: a mayor grosor, menor flexibilidad. Se crearon platos delgados que eran bastante flexibles, y platos gruesos que no sufrían deformación con facilidad. En conclusión, dependiendo de la técnica de moldeo y el grosor deseado, se puede crear distintos productos útiles para distintas aplicaciones. Por lo tanto, la mezcla creada es versátil en dependencia de su moldeo, y se puede utilizar para diversas aplicaciones; tales como aislantes, contenedores de huevos, cajas, entre otros.

Se esperaba que el pH del prototipo se acercara a 7 para garantizar su neutralidad, considerando su uso en contacto directo con alimentos. No obstante, el pH promedio del plato de un solo uso elaborado fue de 5.73 ± 0.07 . Sin embargo, se razona este valor para un plato de un solo uso, ya que el rango de pH de muchos alimentos ácidos, como jugo de manzana, vino blanco, y diversas salsas y aderezos, varía entre 3 y 6; lo que demuestra que un pH de 5.73 es seguro y funcional para el uso previsto del plato (Casaubon, *et al.*, 2018).

La densidad del plato de un solo uso elaborado fue de $0.235 \text{ g/mL} \pm 0.027$, lo cual se encuentra dentro del rango típico de densidades para este tipo de productos. Este nivel de densidad es beneficioso, ya que permite que el plato sea ligero y fácil de manipular y trasladar, optimizando así su usabilidad para el usuario final. Además, esta densidad contribuye a la reducción de los costos de producción, ya que se requiere menos material para fabricar el plato, permitiendo un mayor volumen con menor masa. Dado que el plato está diseñado para un solo uso, no es necesario emplear materiales con alta densidad que sean más resistentes al desgaste, lo que resulta en una solución económica y funcional para aplicaciones de un solo uso.

La temperatura máxima de uso del plato de un solo uso se estableció en 50°C . Aunque la estructura del plato mantuvo sus propiedades físicas, la capa de parafina, utilizada como barrera hidrofóbica, se derritió tras someter el plato a 60°C durante una hora. Este efecto no se observó al exponerlo a 40°C ni a 50°C durante el mismo período, ya que el punto de fusión de la parafina es superior a los 50°C , pero cercano a los 60°C . Por esta razón, la temperatura máxima recomendada para garantizar una experiencia agradable del usuario es de 50°C . Esta temperatura es adecuada en comparación con los productos plásticos, que no se recomiendan para uso en microondas y tienden a deformarse cuando contienen líquidos a temperaturas cercanas a los 60°C .

El porcentaje de absorción de agua a los 25°C en los primeros 15 minutos fue $0.334\% \pm 0.003\%$ de la masa de agua vertida dentro del plato elaborado, indicando que en los primeros 15 minutos de utilización, el plato de un solo uso elaborado absorberá una masa de agua del alimento despreciable. A los 30 minutos de contacto con el agua, se observó que el plato elaborado empezó a absorber agua ($1.33\% \pm 0.40\%$) en pequeñas cantidades que tampoco representan una absorción significativa, pues se acerca bastante a la absorción de agua del poliestireno expandido (1%). A la hora, el porcentaje de absorción de agua se duplicó a $2.60\% \pm 0.35\%$, lo cual se sale del rango de productos plásticos, pero permanece muy por debajo de otras materias primas utilizadas para realizar platos de un solo uso: los platos fabricados a partir de bagazo de caña de azúcar presentan una absorción de agua generalmente entre 15% y 30% (Corbella, 2018).

Dado el objetivo de esta investigación, se sugiere que el prototipo elaborado se utilice por no más de 30 minutos para ser un sustituto a un producto plástico; pero el prototipo no presentará insatisfacción en los usuarios si se utiliza por más tiempo. De hecho, a las 3 y 6 horas, el porcentaje de absorción de agua aumenta a $10.1\% \pm 0.8\%$ y $17.7\% \pm 0.7\%$. Estos porcentajes son altos para sustituir un producto plástico, pero satisfactorios para competir en el mercado de platos de un solo uso (Corbella, 2018).

El plato de un solo uso elaborado no presentó elongación cuando se colocaron 1 y 2 libras en el centro del plato y este se sostiene de dos extremos opuestos. Además, al colocar 3 libras en esta misma condición, únicamente hubo una elongación de $0.08 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$. Por lo tanto, el prototipo elaborado soporta el peso promedio de una porción de alimentación (1 a 2 libras), y hasta una holgura extra (3 libras) (Hall, 2019).

Por otro lado, cuando se sostuvo el plato elaborado por un solo lado y se colocó 1, 2 y 3 libras en el extremo opuesto, el plato se elongó $2.7 \text{ cm} \pm 0.2 \text{ cm}$, $4.0 \text{ cm} \pm 0.3 \text{ cm}$, y $5.2 \text{ cm} \pm 0.4 \text{ cm}$ hacia abajo, respectivamente. Esto sugirió realizar la misma prueba con platos de un solo uso plásticos para evaluar si la elongación era satisfactoria para el prototipo elaborado. La elongación del plato de un solo uso de poliestireno expandido y polipropileno, sostenidos por un solo lado y colocando 1 libra en el extremo opuesto, resultó en $7.0 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$, y $14.0 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$; al colocar 2 libras en el plato de poliestireno expandido se obtuvo una elongación de $14.0 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$. Únicamente se logró medir la elongación del plato de polipropileno y poliestireno expandido con 1 y 2 libras de carga, ya que mayor masa doblaba por completo el plato y se caía el contenido. Esto indica que el prototipo elaborado cuenta con mayor resistencia mecánica por carga, lo cual es una característica positiva en función de la experiencia del usuario, debido a una mejor maniobrabilidad en la utilización del plato de un solo uso elaborado.

El diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana detalla las operaciones principales que se deben efectuar para la realización del producto terminado. La base de cálculo fue para producir 1000 platos en un día. En principio, se cuenta con un almacenamiento de fibra residual de palma africana que puede ser abierto al ambiente debido a la naturaleza de la materia prima, pero se debe controlar una temperatura entre 20°C a 30°C y humedad relativa entre 55% a 65%. Al ser un sólido, su movimiento puede ser por bandas transportadoras que llevarán 4.845 kg de fibra residual de palma africana hacia un molino de cuchillas con tamiz de Mesh 100 para garantizar el tamaño de partícula deseado; respetando las condiciones de temperatura y humedad mencionadas anteriormente. Es inevitable la liberación de partículas al

ambiente que se traduce en desperdicio, pues un porcentaje de fibra residual de palma africana se reducirá a polvo. Así, se espera que 4.605 kg de fibra residual de palma africana molida se transporte por otra banda transportadora hacia el tratamiento químico.

El tratamiento químico consta de un reactor que opera a 80°C, llenándose de agua, hidróxido de sodio al 99.5% y la fibra resultante del molino de cuchillas. Se calienta 22.425 kg de agua potable, proveniente de un tratamiento de agua con una bomba centrífuga, con 2.281 kg de vapor, que provendría de una caldera, que aporta 5,156 kJ, como calor, al proceso. Se propone utilizar vapor de agua como fluido caliente para calentar debido a sus costos reducidos y fácil manipulación (Perry y Chilton, 1984). Además, se agrega, por medio de un tornillo sin fin, 0.580 kg del hidróxido de sodio que debió almacenarse en un tanque cerrado y con condiciones de temperatura y humedad específicas. Así, el tratamiento químico se realiza para preparar la fibra molida. El agua, hidróxido de sodio y una cantidad de fibra molida desintegrada (0.229 kg) se envían al tratamiento de aguas por una bomba centrífuga; el objetivo del tratamiento químico es eliminar la lignina, pero algunas fibras son desintegradas en el proceso.

Luego, 4.376 kg de fibra tratada se traslada al tanque de mezclado por una banda transportadora. Se combina en el tanque de mezclado, 0.875 kg de glicerina por una bomba de desplazamiento positivo debido a su alta viscosidad (945 cP) (Perry y Chilton, 1984), 0.175 kg de ácido acético por una bomba centrífuga y 3.501 kg de fécula de maíz por un transportador de tornillo sin fin; las tres materias provenientes de un almacenamiento cerrado con condiciones de temperatura y humedad específicas. Asimismo, se agrega 35.011 kg de agua potable proveniente de un tratamiento de aguas con una bomba centrífuga, que se calienta a 80°C con 4.470 kg de vapor de agua (de la caldera); el vapor entrega 10,102 kJ de calor. El tanque de mezclado también genera desperdicio debido a mezclas que se pegan a las palas mezcladoras o las paredes del tanque: se espera 2.291 kg de mezcla como merma.

Manualmente se trasladan 41.647 kg de mezcla a una prensa hidráulica que moldea la mezcla en los platos de un solo uso a una presión de 0.5 psi. Posteriormente, se trasladan los platos en los moldes a un horno que opera a 100°C gracias a 85,828 kJ de calor que provienen de la combustión de 1.907 kg de diésel. Se libera 17.681 kg de agua y 0.166 kg de ácido acético como vapores al ambiente. Así, un total de 23.800 kg de platos de un solo uso se trasladan a un espray de parafina para que 4.100 kg de parafina, calentada a 55°C por 258 kJ, provenientes de 0.114 kg de vapor, se viertan sobre los platos. Finalmente, se obtiene 27.900 kg de platos de un solo uso que equivalen a 1000 platos, los cuales se envían a envasado y almacenamiento.

IX. CONCLUSIONES

- Se midió el largo, porcentaje de humedad, de celulosa, de hemicelulosa y de lignina de la fibra residual de palma africana. Se obtuvo $4.0 \text{ cm} \pm 1.5 \text{ cm}$ de largo, $10.480\% \pm 0.002\%$ de porcentaje de humedad, $40.74\% \pm 2.21\%$ de celulosa, $20.75\% \pm 3.05\%$ de hemicelulosa, y $38.51\% \pm 1.62\%$ de lignina, para fibra residual fina; para fibra residual de raquis se obtuvo $6.9 \text{ cm} \pm 1.6 \text{ cm}$ de largo, $10.690\% \pm 0.004\%$ de porcentaje de humedad, $38.35\% \pm 2.77\%$ de celulosa, $16.85\% \pm 0.49\%$ de hemicelulosa, y $44.80\% \pm 2.72\%$ de lignina. Se determinó que la fibra residual de palma africana tiene una potencial utilización como materia prima para elaborar platos de un solo uso.
- Se obtuvo platos de un solo uso por métodos físicos y químicos a partir de fibra residual de palma africana de raquis. El prototipo final presentó un Pantone promedio de 406 C, masa de $27.9 \text{ g} \pm 3.1 \text{ g}$, diámetro de $14.1 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$, altura de $4.4 \text{ cm} \pm 0.1 \text{ cm}$ y grosor de $0.35 \text{ cm} \pm 0.06 \text{ cm}$.
- Se midió el pH, densidad, temperatura máxima de utilización, absorción de agua y elongación por carga, del prototipo elaborado. Se obtuvo 5.73 ± 0.07 de pH; $0.235 \text{ g/mL} \pm 0.027 \text{ g/mL}$ de densidad; 50°C de temperatura máxima de utilización; $0.334\% \pm 0.003\%$ de absorción de agua en 15 minutos de contacto; $1.33\% \pm 0.40\%$ de absorción de agua en 30 minutos de contacto; $2.60\% \pm 0.35\%$ de absorción de agua en 1 hora de contacto; $10.1\% \pm 0.8\%$ de absorción de agua en 3 horas de contacto; $17.7\% \pm 0.7\%$ de absorción de agua en 6 horas de contacto; al colocar 1 y 2 libras en el centro del prototipo sosteniendo dos extremos opuestos, nula elongación, y $0.08 \text{ cm} \pm 0.05 \text{ cm}$ de elongación colocando 3 libras; al colocar 1, 2, y 3 libras en un extremo del prototipo sosteniendo el extremo opuesto se obtuvo $2.7 \text{ cm} \pm 0.2 \text{ cm}$, $4.0 \text{ cm} \pm 0.3 \text{ cm}$, y $5.2 \text{ cm} \pm 0.4 \text{ cm}$, respectivamente. Se determinó que el prototipo elaborado sí tiene las propiedades necesarias para sustituir un plato plástico de un solo uso.
- Se propuso el diagrama de proceso de la elaboración de platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana a partir de la metodología a escala laboratorio, el cual produce 1000 platos de un solo uso en un día a partir de 4.845 kg de fibra residual de palma africana, 0.580 kg de hidróxido de sodio, 57.436 kg de agua potable, 3.501 kg de fécula de maíz, 0.175 kg de ácido acético, 0.875 kg de glicerina y 4.100 kg de parafina. Además, se necesita de

6.865 kg de vapor de agua y 1.907 kg de diésel para suministrar el calor necesario en las distintas operaciones (101,344 kJ).

X. RECOMENDACIONES

- Realizar pruebas con diferentes concentraciones y tiempos de exposición al hidróxido de sodio en el tratamiento químico para la eliminación de lignina, o experimentar con otros agentes químicos más suaves o técnicas de deslignificación biológica (como el uso de enzimas) para preservar mejor las características físicas de la fibra residual de palma africana. Encontrar una condición de eliminación de lignina menos agresiva que el hidróxido de sodio permitiría utilizar fibra residual de palma africana fina en el proceso de elaboración de platos de un solo uso.
- Utilizar tamices de Mesh distintos (tamiz utilizado de Mesh 100) para evaluar si un tamaño de partícula distinto presenta mejores propiedades al plato de un solo uso.
- Experimentar con distintas proporciones de fibra residual, agua, fécula de maíz, glicerina y ácido acético para crear la mezcla del plato.
- Probar variaciones en la presión y temperatura del moldeo del plato de un solo uso para evaluar si se mejora la resistencia mecánica, uniformidad del grosor, u otras propiedades del prototipo que podrían mejorar la satisfacción del consumidor.
- Realizar pruebas con distintos recubrimientos hidrofóbicos que permitan un mayor recubrimiento para disminuir el porcentaje de absorción de agua, o bien, un recubrimiento hidrofóbico que permita el recubrimiento adecuado con una menor masa vertida para reducir el peso y grosor del plato de un solo uso.
- Realizar un análisis de biodegradabilidad al prototipo creado, para evaluar su capacidad de descomposición natural, identificar su impacto ambiental, y cumplir con regulaciones específicas. Este proceso facilita el desarrollo de productos sostenibles, la prevención de contaminación y la innovación en materiales, promoviendo prácticas responsables y alineadas con la economía circular.
- Ampliar la investigación actual mediante la extrapolación de la metodología a escala industrial. Esto permitirá desarrollar un estudio de prefactibilidad que analice los costos,

recursos necesarios, y potenciales beneficios económicos y ambientales, con el objetivo de validar la producción masiva y su integración en procesos industriales sostenibles.

XI. BIBLIOGRAFÍA

- Casaubon, P., Lamshing, P., Isoard, F., Casaubon, S., Delgado, D. y Pérez, A. (2018). pH de los alimentos: ¿una herramienta para el manejo de los pacientes con reflujo gastroesofágico? *Revista mexicana de pediatría*(85), 89 – 94
- Castellanos, A. y Tobar, W. (2014). *Innovación tecnológica e impacto socio-ambientales de la producción de Palma Africana (Elaeis guineensis Jacq.) en la Franja Transversal del Norte*. Centro Universitario de Nor-occidente y Universidad de Wageningen. Obtenido de <https://digi.usac.edu.gt/bvirtual/informes/puidi/INF-2013-31.pdf>
- Cerdá, E. y Khalilova, A. (2020). *Economía circular*.
- Corbella, C. (2018). *ECOPLATOS. Platos desechables fabricados con residuos vegetales*. Universidad de La Laguna.
- CNEE (2024). *Pliegos tarifarios*. Obtenido de <https://www.cnee.gob.gt/Calculadora/resoluciones.php>
- EMPAGUA (2024). *Inicio*. Obtenido de <https://empagua.com/como-solicitar-un-servicio/>
- Gamboa, N. (2015). *Los procesos de producción y su incidencia en el costo del producto terminado de la empresa Metálicas Paper's de la ciudad de Ambato en el año 2014*. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador.
- Garbanzo, G., Molina, E., Serrano, E. y Ramírez, F. (2017). Efecto de mezclas de fibra semicompostada con suelo en el crecimiento y la tolerancia de enfermedades en vivero de palma aceitera. *Agronomía Costarricense*(41), 47-66. <https://doi.org/10.15517/rac.v41i2.31299>
- Gonzalo, A., Sánchez, J., Escudero, E., Marín, F. y Fuertes, R. (2007). *Pulp and Paper Production from EFB using a Semichemical Process*. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/283254115_Pulp_and_paper_production_from_EFB_using_a_semichemical_process
- Gopalan, S., et al. (2019). "Development of biodegradable tableware from coconut shell and its characterization". *Journal of Cleaner Production*
- Grand View Research (2023). *Palm Oil Market Size, Share & Trends Analysis Report By Nature (Organic, Conventional), By Product (Fractionated Palm Oil, Crude Palm Oil), By End-use*

- (Pharmaceuticals, Biofuel & Energy), By Region, And Segment Forecasts, 2024 – 2030. Obtenido de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/palm-oil-market#>
- Green Depot (2024). *Ácido acético 95%*. Obtenido de <https://greendepotgt.com/products/acido-acetico?variant=49479964098880>
- Green Depot (2024). *Parafina Refinada – Cera 58/60*. Obtenido de <https://greendepotgt.com/products/parafina-refinada?variant=47223731487040>
- GREPALMA (2020). *Agroindustria sostenible de aceite de palma en Guatemala*. Obtenido de https://www.grepalma.org/wp-content/uploads/2020/04/Estadisticas_socioeconomicas_anio_2019.pdf
- Hall, B. (2019). *Forget Calories. The Weight of Your Food is What Really Matters*. Obtenido de https://www.stack.com/a/forget-calories-the-weight-of-your-food-is-what-really-matters/#google_vignette
- Isroi, A., Cifriadi, T., Panji, N. y Syamsu, K. (2017). Bioplastic production from cellulose of oil palm empty fruit bunch. *International Conference on Biomass: Technology, Application, and Sustainable Development*(65), doi:10.1088/1755-1315/65/1/012011
- Kong, S., Loh, S., Bachmann, R., Rahim, S. y Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*(39), 729 – 739. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>.
- Kumar, P., et al. (2020). "Sustainable Use of Agro-wastes for the Manufacturing of Disposable Plates". *Waste Management and Research*.
- Malambo, L., Arias, A. y Moscoso, F. (2022). *Elaboración de platos biodegradables a base de hoja de la planta de plátano-cachaco para mejorar la economía del resguardo indígena de Palonegro (Tolima)*. Universidad ECCI. Obtenido de <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/2982/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1>
- McCabe, W. y Smith, J. (1985). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*. McGraw-Hill Book Company, 4a. edición.
- Meira, G. y Gugliotta, L. (2019). *Polímeros: introducción a su caracterización y a la ingeniería de la polimerización*. Universidad Nacional del Litoral, 1a. edición.

- Merck (2024). *Ácido acético (glacial) 100%*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Acetic-acid-glacial-1000-0,MDA_CHEM-100063
- Merck (2024). *Glicerina*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Glycerol,MDA_CHEM-818709
- Merck (2024). *Parafina*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Paraffin,MDA_CHEM-107150
- Merck (2024). *Sodio hidróxido*. Obtenido de https://www.merckmillipore.com/GT/es/product/Sodium-hydroxide,MDA_CHEM-106462
- Neyra, J., Panduro, G., Díaz, E., y Iannacone, J. (2022). Physical and chemical characterization of residual palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) biomass in the Peruvian Amazon. *Agronomía Mesoamericana*(3), 48170. <https://doi.org/10.15517/am.v33i3.48170>
- Nin, J. (2014). *Procesos de fabricación de productos plásticos*. Industrial Data
- Nora, A., Fatma, I., Manal, A. y Shakinaz, T. (2023). Production of Biodegradable Plastic from Biomass. *Food Technology Research Journal*(1), 36-49. Obtenido de https://ftrj.journals.ekb.eg/article_289773_f3c5b7b7019f93a1ff4098cf3942f7bd.pdf
- Oliva, M. (2011). *Elaboración de una guía de buenas prácticas de manufactura para el restaurante central del Irtra Petapa*. Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Orantes, M. (2008). *Purificación de glicerina a pequeña escala como subproducto de reacción de la síntesis de biodiesel por el método de destilación a presión reducida*. Universidad de San Carlos de Guatemala
- Pabón, M. (2004). *Notas de clase bioquímica ruminal*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Pacifiko (2024). *Maizena Fécula de Maíz Natural 2.3 kg*. Obtenido de https://www.pacifiko.com/compras-en-linea/maizena-fecula-de-maiz-natural-2-3-kg&pid=ZTE4ZmE5Yz?srsItd=AfmBOopRKXXXXzoncqGX7wFnwIIDX5QPBl-kyUo6PgpsIIULvO2_smM
- Paucar, W. y Rubio, J. (2022). Caracterización físico-química del cuesco y fibra obtenidos del procesamiento de palma africana para un aprovechamiento eficiente de la energía térmica en

calderas, *Perspectivas*, 6(21),

110–126.

<https://doi.org/10.26620/uniminuto.perspectivas.6.21.2021.110-126>

Perry, R. y Chilton, C. (1984). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (6ta. ed.). McGraw-Hill Edition.

Peters, M., Timmerhaus, K. y West, R. (2003). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers* (5ta. ed.). McGraw-Hill Education.

Rosli, W. y Law, K. (2011). Oil palm fibers as papermaking material: potentials and challenges. *BioResources*(6), 901-917. Obtenido de https://bioresources.cnr.ncsu.edu/BioRes_06/BioRes_06_1_0901_WanDaud_Law_Oil_Palm_Fibers_Papermaking_Material_Review_1296.pdf

Sánchez, J. (2003). *Purificación de parafinas de petróleo por hidrogenación catalítica*. Universidad Complutense de Madrid. Obtenido de <https://www.academia.edu/50356340/PARAFINA>

Treybal, R. (1981). *Mass-Transfer Operations*. McGraw-Hill Book Company, 3a. edición.

Vásquez, E. (2003). *Hidrólisis de los polisacáridos*. México: UNAM

Velásquez, A., Mendizábal, M., Ramos, M. y Guarcax, S. (2016). *Diseño de una toalla sanitaria biodegradable a partir del tallo de la planta de banano. Fase desarrollo*. Universidad del Valle de Guatemala. Obtenido de <https://repositorio.uvg.edu.gt/static/flowpaper/template.html?path=/bitstream/handle/123456789/2802/Megaproyecto%20Revisi%c3%b3n%201%20APROBADO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Walmart (2024). *Fécula Maizena Original De Maíz - 380gr*. Obtenido de <https://www.walmart.com.gt/fecula-maizena-original-de-maiz-380gr/p?srsId=AfmBOorEDs54k3D-L31plfQwoKpzNKMZIIVORGispiEidZEdQf2lVaT4>

Xitumul, W. (2020). *Evaluación de las exportaciones de aceite de palma africana en Guatemala, dentro del marco del acuerdo de asociación con la Unión Europea*. Universidad San Carlos de Guatemala. Obtenido de http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/03/03_6388.pdf

XII. ANEXOS

A. DATOS ORIGINALES

Cuadro 8. Largo de fibra residual de palma africana fina y de raquis

Prueba	Largo fibra fina (± 0.1 cm)	Largo fibra de raquis (± 0.1 cm)
1	3.5	8.1
2	5.6	4.5
3	4.3	5.1
4	2.6	9.1
5	3.9	6.0
6	6.9	5.6
7	4.1	6.8
8	2.0	8.1
9	2.6	8.2
10	4.4	7.9
Promedio	4.0	6.9
Desviación estándar	1.5	1.6

El cuadro anterior presenta los largos de las fibras que se midieron aleatoriamente de la materia prima recibida para la fibra residual de palma africana fina y de raquis. Se midieron diez fibras para obtener un rango amplio de lo posibles largos que pueda presentar la materia prima. Las mediciones se realizaron con un metro Milwaukee.

Cuadro 9. Porcentaje de humedad de fibra residual de palma africana fina y de raquis

Fibra	Prueba	Porcentaje de humedad (%) (± 0.01%)
Fina	1	10.65
	2	10.55
	3	10.57
	4	10.13
	Promedio	10.480
	Desviación estándar	0.002
De raquis	1	10.52
	2	10.28
	3	11.00
	4	10.95
	Promedio	10.690
	Desviación estándar	0.004

El cuadro anterior presenta los porcentajes de humedad de las fibras que se midieron aleatoriamente de la materia prima recibida para la fibra residual de palma africana fina y de raquis. Se midió en cuadruplicado con una balanza de humedad OHAUS modelo MB120 a 140°C y estándar A60 (1 mg/60 s).

Cuadro 10. Masas A, B, C para la prueba de porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina de fibra residual de palma africana fina y de raquis

Fibra	Prueba	Masa A (g) (± 0.0001 g)	Masa B (g) (± 0.0001 g)	Masa C (g) (± 0.0001 g)
Fina	1	1.2374	1.0195	0.4805
	2	1.1195	0.8496	0.4224
	3	0.9882	0.8023	0.4014
	4	1.0309	0.7991	0.3799
De raquis	1	0.9786	0.8115	0.4743
	2	1.1201	0.9381	0.5065
	3	0.9935	0.8278	0.4219
	4	0.9802	0.8098	0.4219

El cuadro anterior presenta las masas A, B y C de la fibra fina y de raquis utilizados para obtener los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina. Las masas se obtuvieron con una balanza analítica OHAUS Pioneer.

Cuadro 11. Características físicas del plato de un solo uso elaborado

Plato	Pantone mínimo	Pantone máximo	Pantone promedio	Masa antes de secado (g) (± 0.1 g)	Masa después de secado (g) (± 0.1 g)	Masa de parafina agregada (g) (± 0.1 g)	Diámetro (cm) (± 0.1 cm)	Grosor (cm) (± 0.1 cm)
1	4655 C	448 C	4745 C	102.7	25.2	3.8	14.1	0.4
2	4655 C	411 C	4755 C	83.3	20.9	4.3	14.0	0.3
3	4695 C	438 C	4495 C	110.4	27.1	4.1	14.2	0.4
4	4625 C	410 C	4655 C	87.0	21.8	4.2	14.1	0.3
			Promedio	95.8	23.8	4.10	14.1	0.35
			Desviación estándar	12.8	2.9	0.22	0.1	0.06

El cuadro anterior presenta los valores Pantone mínimo, máximos y promedios para cuatro platos de un solo uso elaborados a partir de fibra residual de palma africana de raquis, con sus respectivas masas antes y después de secar en el horno, medidos con una balanza OHAUS modelo V31XH2, y los diámetros y grosores, medidos con un metro Milwaukee.

Cuadro 12. Datos para densidad (masa y volúmenes de agua), pH y temperatura máxima de utilización de los platos realizados

Plato	pH (± 0.01)	Masa de muestra para densidad (g) (± 0.001 g)	Volumen inicial para densidad (mL) (± 0.1 mL)	Volumen final para densidad (mL) (± 0.1 mL)	Temperatura máxima de utilización (°C) (± 10°C)
1	5.66	0.431	50.0	52.0	50
2	5.81	0.528	50.0	52.5	50
3	5.69	0.619	50.0	52.3	50
4	5.74	0.367	50.0	51.5	50
Promedio	5.73	0.486	50.0	52.1	50
Desviación estándar	0.07	0.111	0.0	0.44	0

El cuadro anterior presenta el pH, masa, volumen inicial y final para obtener la densidad, y la temperatura máxima de utilización para muestras de cuatro platos realizados a partir de fibra residual de palma africana de raquis, con sus respectivos promedios y desviaciones estándares, medidos con potenciómetro AB15 Plus, balanza analítica OHAUS modelo PA114, probeta Isolab y horno eléctrico Indurama, respectivamente.

Cuadro 13. Datos para la prueba de humectación de distintas muestras

Muestra	Masa inicial (g) (± 0.1 g)	Masa en 15 min (g) (± 0.1 g)	Masa en 30 min (g) (± 0.1 g)	Masa en 1 h (g) (± 0.1 g)	Masa en 3 h (g) (± 0.1 g)	Masa en 6 h (g) (± 0.1 g)
1	29.6	29.5	29.3	28.9	26.5	24.2
2	30.1	30.0	29.7	29.4	27.0	24.9
3	29.8	29.7	29.5	29.1	26.5	24.3
4	30.2	30.1	29.8	29.3	27.4	25.1
5	30.1	30.0	29.5	29.2	27.3	24.8

El cuadro anterior presenta los datos de masas de agua al tiempo 0, 15 min, 30 min, 1 h, 3 h y 6 h después de verterla en el plato de un solo uso elaborado para obtener la prueba de humectación (absorción de agua), medidas con balanza OHAUS modelo V31XH2.

Cuadro 14. Elongación mecánica del plato elaborado por contener peso en su centro

Plato	Elongación por 1 libra (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 2 libras (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 3 libras (cm) (± 0.1 cm)
1	0.0	0.0	0.1
2	0.0	0.0	0.1
3	0.0	0.0	0.1
4	0.0	0.0	0.0
Promedio	0.0	0.0	0.08
Desviación estándar	0.0	0.0	0.05

El cuadro anterior presenta la elongación en centímetros que se forma al aplicar 1, 2 y 3 libras en el centro del plato elaborado, medidas con un metro Milwaukee. El plato se sostuvo de dos lados extremos y la masa se colocó al centro.

Cuadro 15. Elongación mecánica del plato elaborado por contener peso en un extremo

Plato	Elongación por 1 libra (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 2 libras (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 3 libras (cm) (± 0.1 cm)
1	2.4	3.6	4.8
2	2.7	4.0	5.4
3	2.8	4.2	5.6
4	2.8	4.1	5.0
Promedio	2.7	4.0	5.2
Desviación estándar	0.2	0.3	0.4

El cuadro anterior presenta la elongación en centímetros que se forma al aplicar 1, 2 y 3 libras en un extremo del plato elaborado, medidas con un metro Milwaukee. El plato se sostuvo de un solo lado y la masa se colocó al otro extremo.

Cuadro 16. Elongación mecánica de platos comerciales plásticos por contener peso en un extremo

Plato	Elongación por 1 libra (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 2 libras (cm) (± 0.1 cm)	Elongación por 3 libras (cm) (± 0.1 cm)
Poliestireno expandido	7.0	14.0	-
Polipropileno	14.0	-	-

El cuadro anterior presenta la elongación en centímetros que se forma al aplicar 1, 2 y 3 libras en un extremo de los platos comerciales plásticos (poliestireno expandido y polipropileno), medidas con un metro Milwaukee. Los platos se sostuvieron de un solo lado y la masa se colocó al otro extremo.

B. CÁLCULOS DE MUESTRA

Cálculo 1. Porcentaje de celulosa en la fibra residual de palma africana

$$\% \text{ celulosa} = \frac{\text{Masa B} - \text{Masa C}}{\text{Masa A}} * 100 = \frac{1.0195 \text{ g} - 0.4805 \text{ g}}{1.2374 \text{ g}} * 100 = 43.56\%$$

El cálculo anterior muestra el porcentaje de celulosa en la fibra residual de palma africana en función de las masas A, B y C, que se encuentran en el Cuadro 10.

Cálculo 2. Porcentaje de hemicelulosa en la fibra residual de palma africana

$$\% \text{ hemicelulosa} = \frac{\text{Masa A} - \text{Masa B}}{\text{Masa A}} * 100 = \frac{1.2374 \text{ g} - 1.0195 \text{ g}}{1.2374 \text{ g}} * 100 = 17.61\%$$

El cálculo anterior muestra el porcentaje de hemicelulosa en la fibra residual de palma africana en función de las masas A y B, que se encuentran en el Cuadro 10.

Cálculo 3. Porcentaje de lignina en la fibra residual de palma africana

$$\% \text{ lignina} = \frac{\text{Masa C}}{\text{Masa A}} * 100 = \frac{0.4805 \text{ g}}{1.2374 \text{ g}} * 100 = 38.83\%$$

El cálculo anterior muestra el porcentaje de lignina en la fibra residual de palma africana en función de las masas A y C, que se encuentran en el Cuadro 10.

Cálculo 4. Volumen de agua desplazado por la introducción de una muestra del plato

$$\text{Volumen desplazado} = \text{volumen final} - \text{volumen inicial} = 52.0 \text{ mL} - 50.0 \text{ mL} = 2.0 \text{ mL}$$

El cálculo anterior muestra el volumen de agua, que se encuentran en el Cuadro 12, que se desplazó en la probeta por introducir una muestra del plato elaborado, esto con el fin de obtener la densidad del plato.

Cálculo 5. Densidad del plato

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa}}{\text{volumen desplazado}} = \frac{0.431 \text{ g}}{2.0 \text{ mL}} = 0.216$$

El cálculo anterior muestra la densidad del plato elaborado a partir de la masa y volumen desplazado de una muestra, que se encuentran en el Cuadro 12.

Cálculo 6. Absorción de agua del plato

$$\begin{aligned} \% \text{ absorción} &= \frac{\text{masa de agua inicial} - \text{masa de agua final}}{\text{masa de agua inicial}} * 100 = \frac{29.6 \text{ g} - 29.5 \text{ g}}{29.6 \text{ g}} * 100 \\ &= 0.338\% \end{aligned}$$

El cálculo anterior muestra la capacidad del plato para absorber agua al ponerlo en contacto con agua, al obtener la diferencia de masa de agua que se absorbió en el plato, que se encuentran en el Cuadro 13.

Cálculo 7. Balance de masa

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Desperdicio}$$

$$\begin{aligned} &4.845 \text{ kg de fibra de palma africana} \\ &= 4.605 \text{ kg de palma africana molida} \\ &+ 0.240 \text{ kg de partículas de palma africana} \end{aligned}$$

El cálculo anterior muestra el balance de masa para la operación de molienda, con entradas, salidas y desperdicios. Los datos utilizados provienen de las masas obtenidas durante la metodología, especificadas en el Cuadro 22.

Cálculo 8. Energía necesaria para calentar y evaporar para el balance de energía basado en la producción de 1000 platos al día

Energía necesaria

$$\begin{aligned} &= \text{masa} * \text{calor específico} * (\text{Temperatura final} - \text{Temperatura inicial}) \\ &+ \text{masa} * \text{calor latente de vaporización} \\ &= 33351 \text{ g} * 4.18 \frac{\text{J}}{\text{g}^\circ\text{C}} * (100^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C}) + 33351 \text{ g} * 2260 \frac{\text{J}}{\text{g}} = 85827730 \text{ J} \end{aligned}$$

El cálculo anterior muestra la energía necesaria para calentar y evaporar una masa de agua, dato necesario para el balance de energía. El calor específico y calor latente de vaporización se obtuvieron de datos teóricos.

Cálculo 9. Masa de combustible o vapor necesaria para calentar y evaporar para el balance de masa basado en la producción de 1000 platos al día

$$\begin{aligned} \text{Masa necesaria} &= \frac{\text{Energía necesaria}}{\text{poder calorífico/calor latente de vaporización}} = \frac{85827730 \text{ J}}{45000000 \text{ J/kg}} \\ &= 1.907 \text{ kg diésel} \end{aligned}$$

El cálculo anterior muestra la masa de diésel necesaria para calentar y evaporar una masa de agua, dato necesario para el balance de masa. El poder calorífico del diésel y calor latente de vaporización se obtuvieron de datos teóricos.

C. DATOS CALCULADOS

Cuadro 17. Porcentaje de celulosa, hemicelulosa y lignina de fibra residual de palma africana fina y de raquis

Fibra	Prueba	Porcentaje de celulosa (%)	Porcentaje de hemicelulosa (%)	Porcentaje de lignina (%)
Fina	1	43.56 ± 0.02	17.61 ± 0.02	38.83 ± 0.01
	2	38.16 ± 0.02	24.11 ± 0.02	37.73 ± 0.01
	3	40.57 ± 0.02	18.81 ± 0.02	40.62 ± 0.01
	4	40.66 ± 0.02	22.49 ± 0.02	36.85 ± 0.01
	Promedio	40.74	20.75	38.51
	Desviación estándar	2.21	3.05	1.62
De raquis	1	34.46 ± 0.02	17.08 ± 0.02	48.47 ± 0.02
	2	38.53 ± 0.02	16.25 ± 0.02	45.22 ± 0.01
	3	40.86 ± 0.02	16.68 ± 0.02	42.47 ± 0.01
	4	39.57 ± 0.02	17.38 ± 0.02	43.04 ± 0.01
	Promedio	38.35	16.85	44.80
	Desviación estándar	2.77	0.49	2.72

El cuadro anterior presenta los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina para la fibra residual de palma africana fina y de raquis. El cálculo de muestra se encuentra en el Cálculo 1, 2 y 3.

Cuadro 18. Datos calculados para obtener la densidad de las diferentes muestras de plato

Plato	Volumen desplazado (mL)	Densidad (g/mL)
1	2.00 ± 0.20	0.216 ± 0.022
2	2.50 ± 0.20	0.211 ± 0.017
3	2.30 ± 0.20	0.269 ± 0.024
4	1.50 ± 0.20	0.245 ± 0.033
Promedio	2.08	0.235
Desviación estándar	0.43	0.027

El cuadro anterior presenta el volumen desplazado por la muestra del plato elaborado y su densidad. El cálculo de muestra se encuentra en el Cálculo 4 y 5.

Cuadro 19. Porcentaje de absorción de agua (prueba de humectación) de las diferentes muestras de plato

Plato	Absorción de agua en 15 min (%)	Absorción de agua en 30 min (%)	Absorción de agua en 1 h (%)	Absorción de agua en 3 h (%)	Absorción de agua en 6 h (%)
1	0.338 ± 0.002	1.01 ± 0.03	2.36 ± 0.05	10.5 ± 0.1	18.2 ± 0.1
2	0.332 ± 0.002	1.33 ± 0.02	2.33 ± 0.04	10.3 ± 0.1	17.3 ± 0.1
3	0.336 ± 0.002	1.01 ± 0.03	2.35 ± 0.05	11.1 ± 0.1	18.5 ± 0.1
4	0.331 ± 0.002	1.32 ± 0.02	2.98 ± 0.05	9.27 ± 0.06	16.9 ± 0.1
5	0.332 ± 0.002	1.99 ± 0.02	2.99 ± 0.05	9.30 ± 0.06	17.6 ± 0.1
Promedio	0.334	1.33	2.60	10.1	17.7
Desviación estándar	0.003	0.40	0.35	0.8	0.7

El cuadro anterior presenta el porcentaje de absorción de agua del plato elaborado a distintos tiempos (15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas y 6 horas). El cálculo de muestra se encuentra en el Cálculo 6.

Cuadro 20. Balance de masa de las operaciones necesarias para elaborar 1000 platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana

Operación	Entrada (kg)	Salida (kg)	Desperdicio (kg)
Molienda	4.845	4.605	0.240
Tratamiento químico	27.610	4.376	23.234
Mezclado	43.938	41.647	2.291
Prensa hidráulica	41.647	41.647	0
Horno	41.647	23.800	17.847
Espray de parafina	27.900	27.900	0

El cuadro anterior presenta las entradas, salidas y desperdicios de las distintas operaciones necesarias para elaborar 1000 platos de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana, representando el balance de masa. El cálculo de muestra se encuentra en el Cálculo 7.

Cuadro 21. Energía y masa necesaria de combustible o vapor de agua para calentar y evaporar una masa de agua o parafina para los balances de masa y energía

Operación	Energía necesaria (J)	Masa necesaria (kg)
Horno	85827730	1.907
Tratamiento químico	5155506	2.281
Tanque de mezclado	10101594	4.470
Espray de parafina	387450	0.171

El cuadro anterior presenta la energía necesaria para calentar y evaporar una masa de agua o parafina según la operación, y la masa de combustible o vapor necesaria para lograr la liberación de dicha energía, basados en la producción de 1000 platos al día. El cálculo de muestra se encuentra en el Cálculo 8 y 9.

D. ANÁLISIS DE ERROR

Cálculo 10. Cálculo de muestra de propagación de error de sumas y restas para el volumen desplazado por una masa del plato de un solo uso para obtener la densidad de este

$$z = x \pm y$$

$$\Delta z = \Delta x + \Delta y$$

$$\Delta \text{volumen desplazado} = \Delta \text{volumen inicial} + \Delta \text{volumen final} = 0.1 \text{ mL} + 0.1 \text{ mL} = 0.2 \text{ mL}$$

El cálculo anterior muestra la propagación de error utilizada para sumas y restas de todos los cálculos. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 12 y la propagación de error se encuentra en el Cuadro 18.

Cálculo 11. Cálculo de muestra de propagación de error de multiplicaciones y divisiones para la densidad del plato de un solo uso

$$z = x * y; z = \frac{x}{y}$$



$$\Delta z = z * \sqrt{\frac{\Delta x}{x} + \frac{\Delta y}{y}}$$

$$\begin{aligned} \Delta \text{densidad} &= \text{densidad} * \left(\frac{\Delta \text{masa}}{\text{masa}} + \frac{\Delta \text{volumen desplazado}}{\text{volumen desplazado}} \right) \\ &= 0.216 \frac{\text{g}}{\text{mL}} * \left(\frac{0.01 \text{ g}}{0.431 \text{ g}} + \frac{0.2 \text{ mL}}{2.0 \text{ mL}} \right) = 0.022 \frac{\text{g}}{\text{mL}} \end{aligned}$$

El cálculo anterior muestra la propagación de error utilizada para multiplicaciones y divisiones de todos los cálculos. Los datos utilizados se encuentran en el Cuadro 12 y la propagación de error se encuentra en el Cuadro 18.

E. BITÁCORA

Cuadro 22. Bitácora de la metodología

Fecha	Actividad	Resultado
13/02/2024	<p>Se recibió la fibra residual de palma africana fina y de raquis en costales.</p>  	<p>10.82 kg de fibra fina, y 6.42 kg de fibra residual de raquis</p>

Se midió el largo de 10 fibras aleatoriamente y el porcentaje de humedad, para cada tipo de fibra residual.



13/02/2024



Largos de fibras y porcentajes de humedad de los Cuadros 8 y 9

Se realizaron las pruebas necesarias para obtener los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina.



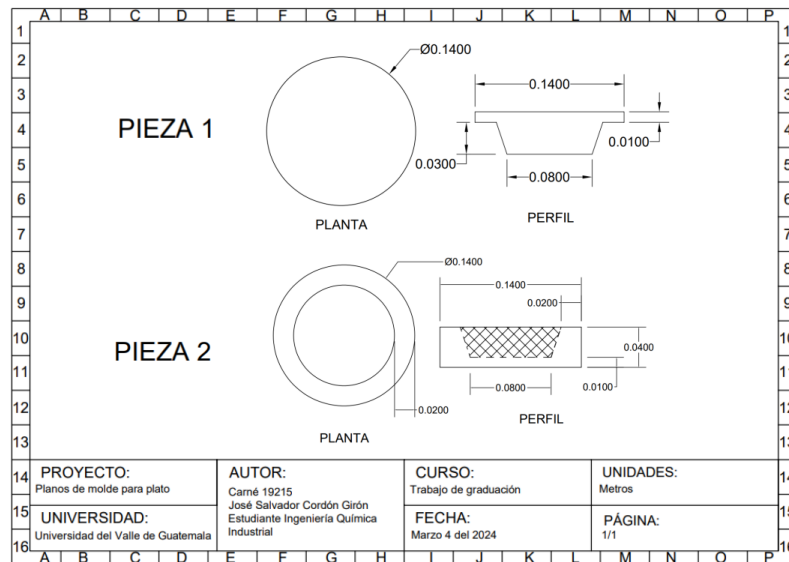
15/02/2024



Porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina de las fibras residuales finas y de raquis, que se muestran en el Cuadro 10



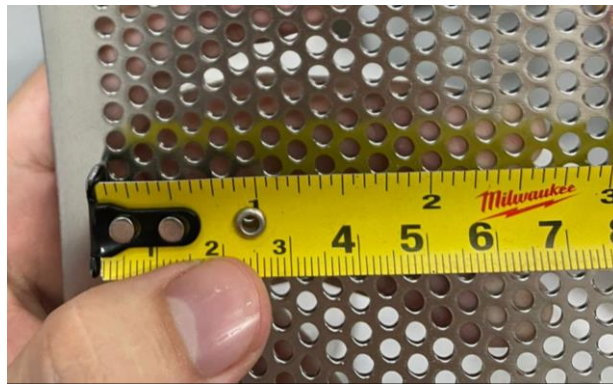
Se realizó el diseño del molde con forma de plato en AutoCad.



04/03/2024

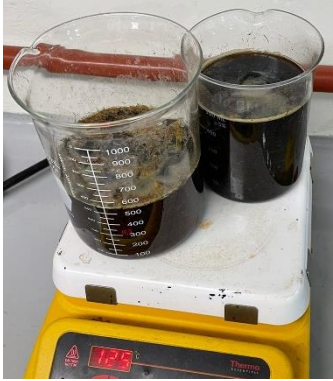



Diseño de
dos piezas
que se mandó
a
manufacturar
en madera

Se trituró la fibra residual de palma africana fina y de raquis con un molino de cuchillas operando a 35 rpm, utilizando tamiz de Mesh 6.

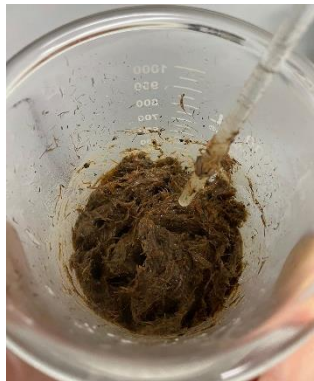


22/03/2024

De 2.82 kg de fibra residual fina, se obtuvo 2.60 kg molida y 0.32 kg se fue en la limpieza del equipo y área. De 2.28 kg de fibra residual de raquis, se obtuvo 1.80 kg molida y 0.48 kg se fue en la limpieza del equipo y área. Estos datos se utilizaron para el diagrama del proceso (Figura 7)

<p>22/03/2024</p>	<p>Se realizó el tratamiento químico a la fibra residual fina y de raquis.</p>   	<p>Se determinó que la fibra residual fina no se utilizaría porque presentó una coloración muy oscura y se perdió mucha masa</p>
<p>24/04/2024</p>	<p>Se recibió el molde de madera.</p> 	<p>Dos piezas de madera</p>

Se elaboró la primera mezcla para el plato de un solo uso con 45 g de fibra residual de raquis, 58.2 g de fécula de maíz, 500 g de agua potable, 65 g de glicerina y 65 g de ácido acético.



24/04/2024

La mezcla desprendía un olor muy fuerte a ácido acético

Se realizó el moldeo de la mezcla realizada el 24/04/2024.



10/06/2024






Un plato con olor a ácido acético en exceso. Además, era muy flexible y suave para ser un plato




Se elaboró otra mezcla para el plato de un solo uso con 83.8 g de fibra residual de raquis, 25.4 g de fécula de maíz, 208 g de agua potable, 8.5 g de glicerina y 8.5 g de ácido acético.



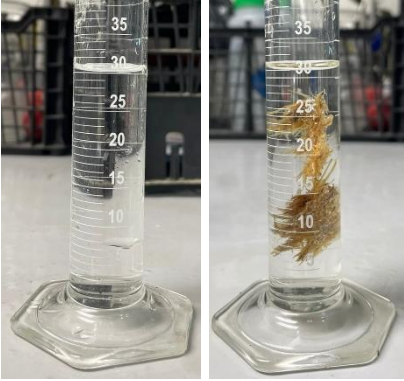




13/06/2024

La mezcla aún desprendía olor a ácido acético, aunque en menor intensidad

14/06/2024	<p>Se realizó el moldeo de la mezcla realizada el 13/06/2024.</p> 	<p>Un plato con olor a ácido acético y más resistente que el realizado el 10/06/2024, pero la textura era áspera e incómoda al tacto</p>
14/06/2024	<p>Se realizó la prueba de humectación (absorción de agua), sumergiendo una muestra en agua.</p> 	<p>La absorción de agua fue de hasta 110% a las 3 horas, por lo que se vio la necesidad de un recubrimiento hidrofóbico</p>
18/06/2024	<p>Se volvió a moler la fibra residual de raquis con un tamiz de Mesh 100.</p> 	<p>Fibra molida con menor tamaño de partícula</p>

18/06/2024	<p>Se elaboró la mezcla final (descrita en Metodología).</p> 	Mezcla inodora
24/06/2024	<p>Se realizó el moldeo de la mezcla realizada el 18/06/2024.</p> 	Plato de un solo uso inodoro, resistente según su manipulación con textura más agradable al tacto
08/07/2024	<p>Se derritió parafina y se pesó el plato de un solo uso elaborado antes y después de agregar parafina derretida como recubrimiento hidrofóbico.</p> 	Cantidad promedio de parafina necesaria para recubrir la parte superior del plato. Este dato se encuentra en el Cuadro 11

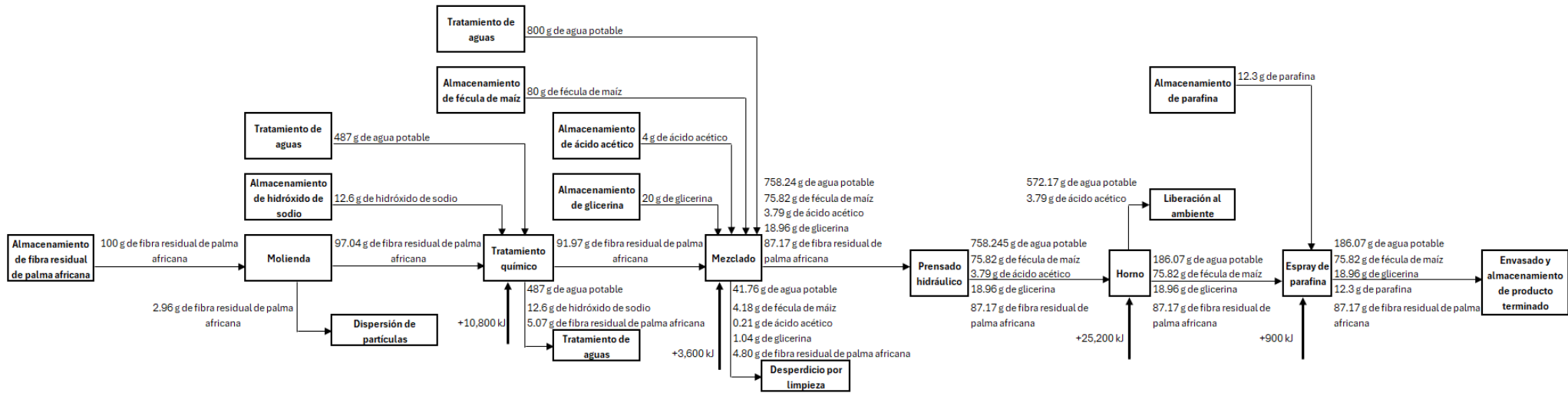
15/07/2024	<p>Se determinó el Pantone de los platos elaborados con las siguientes muestras.</p> 	<p>Pantone mínimo, máximo y promedio que se encuentran en el Cuadro 11</p>
15/07/2024	<p>Se determinó el pH del plato elaborado.</p> 	<p>pH que se encuentra en el Cuadro 12</p>
15/07/2024	<p>Se midió la masa de muestras y el volumen de agua que desplazaban al sumergirlas.</p> 	<p>Masas y volúmenes desplazados para medir la densidad del plato de un solo uso, encontrados en el Cuadro 12</p>

<p>22/07/2024</p>	<p>Se realizó la prueba de humectación (absorción de agua) en el plato de un solo uso elaborado para 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 3 horas y 6 horas.</p> 	<p>Resultados satisfactorios de absorción de agua gracias a la parafina vertida. Las masas absorbidas se encuentran en el Cuadro 13</p>
<p>29/07/2024</p>	<p>Se midió el plato elaborado y se realizaron las mediciones de elongación por carga de distintas masas y en distintas posiciones en el plato elaborado y platos plásticos de poliestireno expandido y polipropileno.</p> 	<p>Las mediciones del plato se encuentran en el Cuadro 11 y las elongaciones en el Cuadro 14, 15 y 16</p>



El cuadro anterior presenta la bitácora de la metodología para este trabajo de graduación con sus respectivas fechas de realización, actividad realizada con imágenes y el resultado.

Figura 9. Balance de masa y energía del proceso de elaboración de platos de un solo uso a partir de palma africana a escala laboratorio



Cuadro 23. Costo de un plato de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana elaborado a escala laboratorio

Recurso	Costo unitario	Referencia	Cantidad utilizada	Costo total
Hidróxido de sodio	Q466.00/kg	(Merck, 2024)	0.0126 g	Q5.8716
Fibra residual	Q225.00/8628 g	(Green Depot, 2024)	25 g	Q0.6520
Fécula de maíz	Q21.65/380 g	(Walmart, 2024)	20 g	Q1.1395
Ácido acético	Q728.00/kg	(Merck, 2024)	1 g	Q0.7280
Glicerina	Q736/kg	(Merck, 2024)	5 g	Q3.6800
Parafina	Q10,288.00/25 kg	(Merck, 2024)	4.1 g	Q1.6872
Energía eléctrica	Q1.464023/kWh	(CNEE, 2024)	101.473 kJ	Q0.0413
Agua potable	Q4.80/m ³	(EMPAGUA, 2024)	687 g	Q0.0033
Total:				Q12.8039

El cuadro anterior presenta el costo de cada recurso utilizado (materia prima, energía eléctrica y agua potable) para elaborar un plato de un solo uso a nivel laboratorio. El costo unitario de cada recurso se obtuvo de diferentes fuentes, mencionados en la casilla de “Referencia”. El costo de la fibra residual se determinó al considerar que el 10% de la biomasa del fruto es aceite, y el resto (90%) fibra residual; así, con el precio de venta del aceite de palma africana, se estimó un costo aproximado para la fibra residual. Se asumió un consumidor residencial BTS suministrado por EGGSA para el costo unitario de la energía eléctrica. Se asumió un costo promedio entre los consumos de 1 m³ a 60 m³ para el costo unitario del agua potable. También se presenta el costo total obtenido.

Cuadro 24. Costo alternativo de un plato de un solo uso a partir de fibra residual de palma africana elaborado a escala laboratorio

Recurso	Costo unitario	Referencia	Cantidad utilizada	Costo total
Fibra residual	Q225.00/8628 g	(Green Depot, 2024)	25 g	Q0.6520
Fécula de maíz	Q99.00/2.3 kg	(Pacifiko, 2024)	20 g	Q0.8609
Ácido acético	Q899.00/30 L	(Green Depot, 2024)	0.000953 L	Q0.0286
Glicerina	Q599.00/20 L	(Green Depot, 2024)	5 g	Q0.1198
Parafina	Q1,099.00/50 kg	(Green Depot, 2024)	4.1 g	Q0.0901
Energía eléctrica	Q1.464023/kWh	(CNEE, 2024)	101.473 kJ	Q0.0413
Agua potable	Q4.80/m ³	(EMPAGUA, 2024)	687 g	Q0.0033
Total:				Q1.7960

El cuadro anterior presenta el costo alternativo de cada recurso utilizado (materia prima, energía eléctrica y agua potable) para elaborar un plato de un solo uso a nivel laboratorio, considerando compras al por mayor, y evitar el uso de hidróxido de sodio. El costo unitario de cada recurso se obtuvo de diferentes fuentes, mencionados en la casilla de “Referencia”. El costo de la fibra residual se determinó al considerar que el 10% de la biomasa del fruto es aceite, y el resto (90%) fibra residual; así, con el precio de venta del aceite de palma africana, se estimó un costo aproximado para la fibra residual. Se asumió un consumidor residencial BTS suministrado por EGGSA para el costo unitario de la energía eléctrica. Se asumió un costo promedio entre los consumos de 1 m³ a 60 m³ para el costo unitario del agua potable. También se presenta el costo total obtenido.

XIII. GLOSARIO

Densidad. Cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia, expresada comúnmente en gramos por centímetro cúbico (g/cm^3) o kilogramos por metro cúbico (kg/m^3).

Elongación. Aumento en la longitud de un material cuando se somete a una fuerza, generalmente expresada como porcentaje respecto a su longitud original.

Holgura. Espacio o flexibilidad adicional que permite que un objeto funcione correctamente, sin tensión ni ajuste excesivo.

Humedad. Cantidad de vapor de agua presente en un material o en el aire, y puede afectar las propiedades físicas de los materiales y su conservación.

Maniobrabilidad. Facilidad con la que un objeto puede ser manipulado o controlado, especialmente en términos de movimiento y operación.

Mezcla heterogénea. Mezcla en la que los componentes no están distribuidos de manera uniforme, y se pueden distinguir físicamente las diferentes sustancias que la conforman.

Pantone. Sistema universalmente reconocido de identificación y estandarización de colores, utilizado principalmente en las industrias de diseño y manufactura para asegurar la precisión del color.

pH. Medida de la acidez o alcalinidad de una sustancia, en una escala que va de 0 a 14, donde 7 es neutral, valores menores a 7 indican acidez y mayores a 7 indican alcalinidad.

Prototipo. Primer modelo o versión preliminar de un producto que se utiliza para probar conceptos, funciones y características antes de su producción final.

Punto de fusión. Temperatura a la cual un sólido se convierte en líquido bajo condiciones normales de presión.

Sustituto. Producto o material que puede reemplazar a otro en una función específica sin perder eficacia o calidad.

Usabilidad. Facilidad con la que los usuarios pueden utilizar un producto o sistema para cumplir con sus objetivos de manera eficiente y satisfactoria.