



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Química e Ingeniería Química

Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial

**Interacción de la Cáscara de Café (*Coffea arabica*),
Almidón de Papa y Pectina sobre las Propiedades
Físicas y Mecánicas de un Prototipo de Bandeja**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Agroindustrial

AUTOR

Madeleine ESCAJADILLO LUQUE

ASESOR

Noemi BRAVO ARANIBAR

Silvia Elvira PANDIA ESTRADA (Coasesor)

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Escajadillo, M. (2023). *Interacción de la Cáscara de Café (Coffea arabica), Almidón de Papa y Pectina sobre las Propiedades Físicas y Mecánicas de un Prototipo de Bandeja*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Química e Ingeniería Química, Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Madeleine Escajadillo Luque
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	48982502
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5236-7352
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Noemi Bravo Aranibar
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	10672520
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-3454-2601
Datos de Co asesor	
Nombres y apellidos	Silvia Elvira Pandia Estrada
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	41723050
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Delo Dalison Huamani Mallma
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	47808533
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Carlos Alberto Suca Apaza
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01334382
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Noemi Bravo Aranibar

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	10672520
Datos de investigación	
Línea de investigación	Gestión y aprovechamiento de residuos agroindustriales
Grupo de investigación	No aplica.
Agencia de financiamiento	Prociencia - Proyecto N° 056 – 2021
Ubicación geográfica de la investigación	Edificio: Instituto Tecnológico de la Producción Departamento: Lima. Provincia: Callao. Distrito: Callao.
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2022-2023
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería de producción https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.03 Otras ingenierías y tecnologías https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.11.02



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)

FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA
Central: 619 7000 anexos 1202, 1203, 1205, 1206, 1207 Telefax: 1209, 1218
Ciudad Universitaria – Av. Venezuela s/n – Lima 1

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA AGROINDUSTRIAL

A C T A DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Los suscritos Miembros del Jurado nombrados por la Dirección de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial, bajo la Presidencia del **Dr. DELO DALISON HUAMANI MALLMA**, el **Ing. CARLOS ALBERTO SUCA APAZA** (Miembro) y la **Mg. NOEMI BRAVO ARANIBAR** (Asesora), habiendo presentado para el efecto la **TESIS**, titulada “**Interacción de la Cáscara de Café (*Coffea Arabica*), Almidón de Papa y Pectina sobre las Propiedades Físicas y Mecánicas de un Prototipo de Bandeja**”, después de **SUSTENTADA Y APROBADA LA TESIS** elaborada por la Bachiller en Ingeniería Agroindustrial: **ESCAJADILLO LUQUE MADELEINE**; para optar el **TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGROINDUSTRIAL**, acordando calificarlo con la **NOTA** de:

Dieciocho
.....
(LETRAS)

18.00
.....
(NÚMEROS)

Lima, 17 de noviembre del 2023

Dr. Delo Dalison Huamani Mallma
Presidente

Ing. Carlos Alberto Suca Apaza
Miembro

Mg. Noemi Bravo Aranibar
Asesora

Ed. O. N. Vidal
Dr. EDGAR ORLANDO NAGLES VIDAL
Director de la EP de Ingeniería Agroindustrial





Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Vicerrectorado de Investigación y Posgrado



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo Noemi Bravo Aranibar en mi condición de asesor acreditado con la Resolución Decanal N° 000025-2024-D-FQIQ/UNMSM de la tesis, cuyo título es **"INTERACCIÓN DE LA CÁSCARA DE CAFÉ (*Coffea arabica*), ALMIDÓN DE PAPA Y PECTINA SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DE UN PROTOTIPO DE BANDEJA"**, presentado por las bachilleres en Ingeniería Agroindustrial **Madeleine Escajadillo Luque** optar el título Profesional de Ingeniera Agroindustrial CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante el software de similitud textual, el documento evaluado cuenta con el porcentaje de **14%** de similitud, nivel **PERMITIDO** para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención el título correspondiente.

Firma del Asesor

DNI: 10672520

Noemi Bravo Aranibar
Asesor



Huella digital

DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mis padres Marisol y Hederd por el apoyo, comprensión y amor incondicional que me brindan, son mi ejemplo a seguir, cada logro y éxito mío también es suyo.

A mis hermanos Nayeli y Geovani por ser mi alegría, mi lugar seguro, mis amigos eternos, ustedes me motivan y llenan de energía.

AGRADECIMIENTOS

A Prociencia por el financiamiento del proyecto N° 056 – 2021 que me permitió realizar este trabajo de investigación y obtener mi título profesional.

A mi Universidad Nacional Mayor de San Marcos, por darme la oportunidad de ser su alumna y por los conocimientos adquiridos.

Al Instituto Tecnológico de la Producción por brindarme sus laboratorios para realizar mi tesis, por ser el lugar donde me he forjado como profesional.

A la Mg. Silvia Pandia por ser mi co – asesora, por apoyarme durante todo el proceso de mi tesis, por sus consejos, enseñanzas y amistad; por motivarme e inspirarme a ser una profesional competente.

A la Mg. Noemi Bravo por haber confiado en mí y acompañarme desde mi 8vo ciclo, gracias por sus consejos, apoyo incondicional, sus palabras de aliento y motivación. Gracias a Ud. aprendí que las oportunidades se buscan.

Al Mg. Miguel Albrecht por compartirme conocimientos que me ayudaron a desarrollar mi tesis, gracias por la amistad y los momentos amenos que pase en el ITP.

A mis compañeros de proyecto Sheila Percca y Edwin Merino, por su amistad y todos los momentos vividos entre risas, momentos de estrés, cansancio y alegría. Nuestras discusiones, intercambio de ideas y “peleas” lograron hacer posible esta tesis, gracias.

Un agradecimiento especial a la E.P de Ingeniería Agroindustrial en SJJ por las enseñanzas aprendidas en sus aulas, a los profesores por los conocimientos impartidos y la exigente formación, y a mis compañeros por las anécdotas compartidas.

RESUMEN

El objetivo de este proyecto es investigar cómo influye la interacción de la cáscara de café, almidón de papa y pectina en la formulación de un prototipo de bandeja. Se empleó cáscara de café arábica (variedad *Caturra*) procedente del beneficio húmedo, la cual se caracterizó mediante un análisis proximal y contenido lignocelulósico (celulosa, hemicelulosa y lignina). Para la producción de las bandejas, se mezcló el almidón (45 - 80%), cáscara de café (5 - 45%), pectina (5 - 15%) y agua, hasta obtener una mezcla homogénea, que se colocó en un molde y se termoprensó a 185 °C durante 6 min. Se utilizó un diseño de mezclas aplicando restricciones, que contó con 21 tratamientos experimentales que se optimizaron evaluando la mínima resistencia a la flexión y mínima absorción de agua, adicionalmente se preparó un tratamiento control para realizar comparaciones. El tratamiento óptimo y el control se caracterizaron mediante la evaluación de sus propiedades físicas (absorción de agua, color, espesor y densidad), mecánicas (resistencia a la flexión), microscopía electrónica de barrido (SEM) y grado de desintegración.

Palabras clave: flexión, absorción, termoprensado, diseño de mezclas.

ABSTRACT

The objective of this project is to investigate how the interaction of coffee peel, potato starch and pectin influences the formulation of a tray prototype. Arabica coffee husk (Caturra variety) from the wet mill was used, which was characterized through a proximal analysis and lignocellulosic content (cellulose, hemicellulose and lignin). To produce the trays, starch (45 - 80%), coffee husk (5 - 45%), pectin (5 - 15%) and water were mixed until a homogeneous mixture was obtained, which was placed in a mold. and thermopressed at 185 °C for 6 min. A mixture design was used applying restrictions, which had 21 experimental treatments that were optimized by evaluating the minimum flexural resistance and minimum water absorption. Additionally, a control treatment was prepared for comparisons. The optimal treatment and control will be characterized by evaluating its physical properties (water absorption, color, thickness and density), mechanical (flexural strength), scanning electron microscopy (SEM) and degree of disintegration.

Keywords: bending, absorption, thermopressing, mixture design.

ÍNDICE

RESUMEN	4
ABSTRACT	5
I. INTRODUCCIÓN	9
II. MARCO TEÓRICO	11
2.1. El café	11
2.1.1. Aspectos generales	11
2.1.2. Cultivo de café en el Perú	12
2.1.3 Cosecha y post cosecha del café	13
2.1.4. Cáscara de café	15
2. 2. Almidón	16
2.2.1. Estructura	16
2.2.2. Cambios en el almidón por tratamiento térmicos	18
2.2.3. Aplicación del almidón en envases descartables	19
2.2.4. Proceso de formación de espuma por compresión	20
2.3. Pectina	21
2. 3. 1. Clasificación según el contenido de metoxilo	21
2.3.2. Propiedad viscosante de la pectina	22
2.4. Fibras vegetales	22
2.4.1. Lignina	23
2.4.2. Celulosa	24
2.4.3. Hemicelulosa	25

	7
2.5. Compuestos reforzados con fibras naturales	25
2.6. Biodegradabilidad y biodegradación	26
2.7. Grado de desintegración	28
III. MATERIALES Y MÉTODOS	29
3. 1. Lugar de ejecución	29
3.2. Materiales y equipos	29
3.2.1. Materia prima	29
3.2.2. Insumos	29
3.2.3. Materiales de laboratorio	29
3.2.4. Instrumentos de medición	30
3.2.5. Equipos	31
3. 2. 6. Otros	31
3. 3. Procedimiento experimental	32
3. 3. 1. Composición química proximal de la cáscara de café	32
3.3.2. Composición lignocelulósica de la cáscara de café	35
3.3.3. Acondicionamiento de cáscara de café	38
3.3.4. Fabricación de bandejas biodegradables	40
3.3.5. Análisis de las variables respuesta de las bandejas biodegradables	41
3.3.6. Optimización y verificación del tratamiento óptimo	42
3.3.7. Caracterización la bandeja óptima	42
3.3.8. Diseño experimental u observacional:	45

	8
IV. RESULTADOS Y DISCUSION	47
4. 1. Composición química proximal	47
4.2. Determinación de componentes lignocelulósicos	48
4.3. Análisis de las variables respuesta de las bandejas biodegradables	49
4.3.1. Capacidad de absorción de Agua	49
4.3.2. Resistencia a la flexión	56
4.4. Optimización de las variables respuesta	61
4.5. Verificación de la formulación óptima	62
4.5.1 Capacidad de absorción de agua	62
4.5.2 Resistencia a la flexión	64
4.6. Caracterización de bandejas biodegradables	65
4.6.1. Color	65
4.6.2. Espesor y densidad	66
4.6.3. Morfología	67
4.6.4. Grado de desintegración	68
V. CONCLUSIONES	70
VI. ANEXOS	71
VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	84

I. INTRODUCCIÓN

La producción de café impacta positivamente en la economía del país. Según los reportes de la Junta Nacional de Café (2023) en el año 2022 el café ocupó el tercer lugar en el ranking de agroexportaciones con un valor de US\$ 1,234 millones y una producción de 234.200 TM, siendo Cajamarca la principal región productora, seguida de San Martín y Junín.

Se conoce como “beneficio” al proceso por el cual se obtienen los granos de café, existen tres tipos: húmedo, seco y semisecho. En el país el beneficio húmedo es el más utilizado, debido a su eficiencia (Díaz y Carmen, 2017), este proceso consiste en introducir los cerezos de café en máquinas despulpadoras que separan las cáscaras y semillas, estas últimas quedan recubiertas con parte de la pulpa llamada mucilago, luego se fermenta y finalmente se obtiene el café pergamino, que seguidamente es lavado y secado para ser almacenado (INACAL, 2021).

Durante el proceso de despulpado se generan grandes volúmenes de residuos que no son gestionados adecuadamente, la “pulpa” (epicarpio y mesocarpio) que es el descarte de esta operación representa el 42 % de la cereza de café (Duangjai et al., 2016), cuando la “pulpa” es secada se le conoce comúnmente como “cáscara de café”.

Existen estudios previos orientados a encontrar usos sostenibles y rentables para la cáscara de café, por ejemplo, en alimentos para animales (Franca y Oliveira, 2009), biocombustibles (Emma y Yadav, 2022) y como fuente de compuestos bioactivos (Collazo et al., 2019); sin embargo, aún se están buscando alternativas para su aprovechamiento.

Por otro lado, los envases descartables de poliestireno generan problemas de contaminación ambiental ya que por su naturaleza toman cientos de años en descomponerse, acumulándose en vertederos, ríos y océanos (Mangaraj et al., 2018); a pesar de ello, estos envases siguen siendo altamente demandados por su bajo precio. El Gobierno del Perú no ha sido ajeno a esta problemática, desde el 20 de diciembre de 2021 quedó prohibida la producción, importación y

comercialización del poliestireno expandido (Tecnopor) para alimentos y bebidas de consumo humano como parte de lo establecido en la Ley N° 30884, esto con la finalidad de reducir el impacto adverso del plástico de un solo uso en la salud humana y el medio ambiente.

Con el avance de la tecnología de ciencia de materiales, el comportamiento del consumidor cambia y se busca alternativas a los materiales sintéticos convencionales (Gutiérrez y Álvarez, 2017). Una alternativa son las bandejas biodegradables hechos a base de almidón; sin embargo, presentan algunas deficiencias frente a los envases de poliestireno, como su baja resistencia mecánica y alto carácter hidrofílico (Cruz Tirado et al., 2019), la adición de componentes lignocelulósicos presentes en fibras vegetales, que cumplen una función estructural, puede actuar como material de refuerzo en la fabricación de estas bandejas (Oliveira et al., 2021).

Este proyecto propone aprovechar los residuos del procesamiento de café en el desarrollo de un prototipo de bandeja, sustituyendo un porcentaje significativo de almidón por cáscara de café, que es una materia prima ecológica, natural y puede mejorar sus características físicas y mecánicas

Objetivo general:

Evaluar cómo influye la mezcla de cáscara de café, almidón de papa y pectina en las propiedades físicas y mecánicas de un prototipo de bandeja.

Objetivos específicos:

- Estudiar la optimización del porcentaje de cáscara de café, almidón de papa y pectina para la elaboración de un prototipo de bandeja en función de su mínima absorción de agua y mínima resistencia a la flexión.
- Caracterizar la bandeja óptima mediante la evaluación de sus propiedades físicas, mecánicas, microscopía electrónica de barrido (SEM) y grado de desintegración.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. El café

2.1.1. Aspectos generales

El café es la semilla de la planta del género *Coffea*, su presentación puede ser entera o molida; de igual forma a la bebida elaborada con esta semilla también se le conoce como café, es una de las bebidas más populares del mundo, en las últimas tres décadas su producción se ha duplicado, las principales regiones productoras son Sudamérica, Asia, Centroamérica y África, (Hejna et al., 2021).

El árbol del café pertenece a la familia *Rubiaceae* con una altura aproximada de 12 m, para que la recolección sea más sencilla se adopta la forma de un arbusto de 2,5 m de altura (Gemechu, 2020). Los frutos se forman a partir de las flores blancas, estos tienen forma similar a la cereza (botánicamente conocido como drupa) y miden 1,5 cm aproximadamente. Inicialmente la superficie del fruto es de color verde, al madurar cambia de color rojo a violeta y en su pulpa dulce (mesocarpio) contiene dos semillas que contactan por su cara lisa (Belitz et al., 1997).

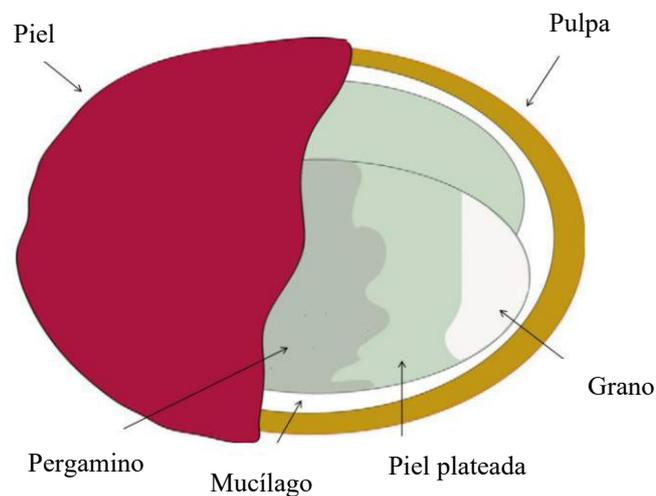
El pericarpio o piel recubre la pulpa blanda y fibrosa que es conocida como mesocarpio exterior, ambas le dan forma al café, como muestra en la Figura 1. A continuación viene una capa de mucílago translúcido, incoloro y viscoso, también conocido como capa de pectina, el endocarpio conocido como pergamino y, por último, se tiene la piel plateada (Czekała et al., 2023).

Sólo dos de las aproximadamente 70 especies de *Coffea* que existen en la actualidad tienen una importancia económica significativa: *Coffea arabica*, que produce más del 75% de la cosecha mundial y *Coffea canephora*, denominada robusta, que produce el 25% (Muhie, 2022).

El café se produce en zonas con climas húmedos con temperaturas entre 20 y 25°C, con precipitaciones entre 1600 y 1800 milímetros por año, lo cual es posible en zonas boscosas de selva alta. La especie que se cultiva principalmente en Perú es la arábica, que se exporta en forma de granos verdes o tostados (MINCETUR, 2016).

Figura 1

Morfología del fruto de café



Nota. Adaptado de “Functional properties of coffee and coffee by-products” por Esquivel, P. & Jimenez, 2012, *Food research international*, 46(2), 488-495.

2.1.2. Cultivo de café en el Perú

Cultivado en los valles interandinos de Perú y en toda la franja oriental de la cordillera de los Andes, a menudo conocida como selva alta o yungas, el café es un cultivo permanente o perenne. Durante el año 2021, la producción de café en grano fue de 366,1 mil toneladas y se desarrolló en 16 departamentos. No obstante, en cuatro de ellos, San Martín, Cajamarca, Amazonas y Junín, se concentra el 75,1% de la producción nacional (MIDAGRI, 2023). Los cafés cultivados son 100% Arábica, y las principales especies son Typica, Caturra, Catimor, Pache y Bourbon (Díaz y Carmen, 2017).

Para la instalación del cultivo el caficultor debe realizar una serie de operaciones importantes como la elección de un terreno que cumpla con los requerimientos adecuados de temperatura, precipitación (70 a 100 pulgadas anuales), humedad (75% a 85%), pH (entre 5.5 a 6.5), luminosidad (entre 8 a 9 horas de luz diaria), la adquisición de semillas de buena calidad y fertilizantes adecuados (INIA, 2022).

2.1.3 Cosecha y post cosecha del café

La etapa más importante del cultivo es la cosecha porque se relaciona con la calidad del café. Los frutos maduros son recogidos (Figura 2) y se inspeccionan para eliminar los que presenten magulladuras. La madurez del fruto se determina midiendo los sólidos solubles (°Brix), observando el color del fruto y extrayendo una pequeña cantidad de mucílago del fruto, de esta forma el caficultor elige cuando realizar la cosecha (Paredes et al., 2022).

Figura 2

Fruto del café listo para la cosecha



Nota. Adaptado de “*Línea de base del sector café en el Perú*”, por Díaz, C. y Carmen, M., Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD.

Luego, estos frutos pasan a la etapa de postcosecha donde se realizan una serie de operaciones para obtener los granos de café (beneficio), esta puede ser por vía húmeda, seca o semiseco.

a) El beneficio húmedo

Es el más utilizado en el país, consiste en sumergir los frutos en un tanque de agua, cuya parte inferior contiene un tubo que transporta la fruta a los pulperos, los cuales por un mecanismo de fricción separan los granos de la pulpa, luego se derivan hasta un sistema de recolección de desperdicios. La siguiente operación es transportar los granos hacia un tanque de fermentación anaeróbica para remover el mucílago el cual demora de 48 a 72 horas, pasado este tiempo el mucílago se desprende de los granos y se obtiene el café pergamino (Paredes et al., 2022).

b) Beneficio seco

Otra forma de secado es el natural, que consiste en secar el cerezo inmediatamente después de cosecharla, manteniendo la piel. Para un secado uniforme, es crucial remover continuamente. Dependiendo de la temperatura local, el secado puede durar entre 20 días y 4 semanas. Sin embargo, no debe secarse durante mucho tiempo, ya que podría volverse quebradiza al apilarla (INACAL, 2021).

c) Beneficio Semiseco

Es un método que combina el procesamiento húmedo y seco de la cereza de café, el despulpado de las cerezas se realiza de manera similar al método húmedo, pero se excluye el paso de fermentación. De esta forma, el café despulpado, que contiene los restos de mucílago, puede secarse directamente. Finalmente, el pergamino se retira mecánicamente mediante descascarado (Gemechu, 2020).

2.1.4. Cáscara de café

El subproducto primario del beneficio seco del café se compone de piel seca, pulpa, mucilago y el pergamino; en el beneficio húmedo se compone por piel y pulpa; en ambos casos el residuo se obtiene en una única fracción y se denomina “cáscara de café” (Figura 3). En el beneficio húmedo esta representa entre 40% - 50% de su peso fresco (Carmen et al., 2020), este subproducto es difícil de degradarse naturalmente por lo cual, su desecho en suelos y ríos provoca acidificación, causando un impacto negativo en el medio ambiente ecológico y el sistema hídrico (Hu et al., 2023).

Actualmente se están estudiando alternativas para valorizar este subproducto, por ejemplo, en alimentos para animales (Franca y Olivera, 2009), biocombustibles (Emma y Yadav, 2022) y como fuente de compuestos bioactivos (Collazo et al., 2019), de esta forma se busca minimizar su desecho en vertederos.

Figura 3

Partes del cerezo del café que componen la cáscara de café



Nota. Adaptado de “Revalorization of Coffee Husk: Modeling and Optimizing the Green Sustainable Extraction of Phenolic Compounds”, por Rebollo et al., 2021, *Foods 10*, 653.

2. 2. Almidón

El almidón es uno de los polisacáridos más abundantes e importantes, ocupa el segundo lugar después de la celulosa. Se encuentra en cereales, tubérculos y algunas frutas como material de reserva energética (Badui, 2006). Los almidones tienen un valor como aditivo alimentario por la contribución que tiene en la textura y su utilización como agente espesante (Dana, 1992).

Los gránulos son pequeños corpúsculos discretos que contienen almidón, estos ejercen una presión osmótica relativamente baja en el tejido vegetal que permite a la planta almacenar enormes cantidades de glucosa de forma fácilmente accesible. Se han desarrollado varias técnicas microscópicas para determinar el origen de diversos almidones basándose en el tamaño y la forma de los gránulos, que son exclusivos de cada especie botánica (Badui, 2006).

2.2.1. Estructura

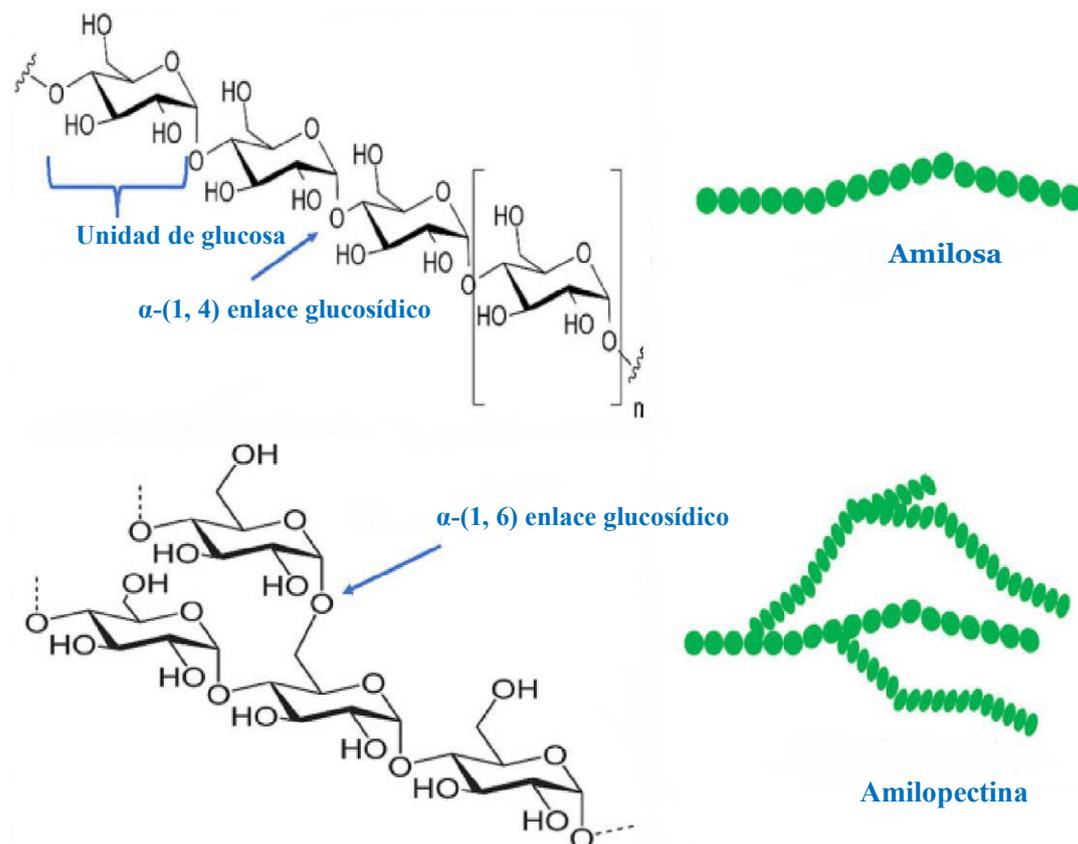
El almidón está compuesto fundamentalmente por dos polímeros de glucosa: la amilosa y amilopectina (Figura 4).

a) Amilosa

Como resultado de la condensación de D-glucopiranosas por enlaces $\alpha(1,4)$ -glucosídicos, la amilosa, que constituye el 20-30% de los almidones más comunes, forma largas cadenas lineales con 200-2500 unidades y pesos moleculares de hasta un millón. En otras palabras, la amilosa es un α -D-(1,4)-glucano cuya unidad de repetición es la α -maltosa y tiene la capacidad de adoptar una conformación helicoidal tridimensional, en la que cada vuelta de la hélice está formada por seis moléculas de glucosa (Badui, 2006). Las cualidades distintivas de la amilosa se derivan de su estructura lineal y alargada, entre ellas se incluye su disposición para interactuar con yodo, alcoholes o ácidos orgánicos, así como su tendencia a interactuar con otras cadenas de amilosa y causar precipitaciones (Lisi, 2012).

Figura 4

Estructura química de la amilasa (a) y amilopectina (b).



Nota. Adaptado de “A comprehensive review on starch: Structure, modification, and applications in slow/controlled-release fertilizers in agriculture”, por Salimi et al., 2023, *Carbohydrate Polymers*, 121326.

b) Amilopectina

El componente primario y altamente ramificado del almidón es la amilopectina, tiene un peso molecular mayor que la amilosa (Ai y Jane, 2018), sus ramificaciones están conectadas al tronco central por enlaces α -D-(1,6), que están espaciados cada 15-25 unidades lineales de glucosa, al igual que la amilosa (Badui, 2006). Las características pastosas del almidón están muy influenciadas por las cadenas ramificadas extralargas que se encuentran en la amilopectina. Este compuesto también es el principal responsable de la

formación de la viscosidad y la pastosidad del almidón tras la gelatinización y el hinchamiento de sus granulos (Bertoft, 2017).

2.2.2. Cambios en el almidón por tratamiento térmicos

a) Gelatinización

La estructura muy ordenada y estable de los gránulos de almidón, resultado de las interacciones repetidas entre la amilosa y amilopectina, los hace insolubles en agua fría. (Badui, 2006). La gelatinización consiste en la modificación de los gránulos del almidón por la aplicación de calor (60 y 70°C), esta energía térmica permite que algo de agua pueda pasar a través de la porción amorfa de la red molecular, si la temperatura continúa incrementándose provoca que los enlaces de hidrógeno de la región cristalina se rompan y como consecuencia el agua ingresa fácilmente, causando el hinchamiento rápido de los gránulos de almidón (Dana, 1992). El fenómeno conocido como "gelatinización" se produce a una temperatura en la que la amilosa se difunde en el agua, pero la amilopectina permanece dentro del gránulo, la amilosa fuera del gránulo de almidón crea una malla y un gel en esta fase del proceso, mientras que el gránulo de almidón pierde su forma (Marcia, 2003; Biliaderis, 1991). Una cantidad limitada de agua impide la gelatinización completa dentro del periodo de temperatura común, pero a medida que aumenta la temperatura, los gránulos de almidón se vuelven más móviles y, en última instancia, la estructura cristalina se funde (Slade y Levine, 1991 citado en Tovar, 2008).

b) Retrogradación

El proceso conocido como "retrogradación" se da cuando el de almidón gelatinizado se enfría gradualmente y las moléculas de amilosa se alinean provocando una mayor formación de enlaces de puente de hidrógeno entre cadenas paralelas adyacentes (Lineback y Rasper, 1988 citado en Marcia, 2003). La amilosa cristaliza rápidamente tras el

enfriamiento, insolubilizándose más de la mitad, la amilopectina, en cambio, retrograda más lentamente. Los dos procesos que componen la retrogradación son: (a) la recristalización de la amilopectina y (b) la gelificación de las moléculas de amilosa que se desprenden del gránulo durante la gelatinización (Aranda y Bocanegra 2018). La retrogradación del almidón o endurecimiento de los productos es más lenta cuando el contenido de humedad es mayor, depende de muchos factores como el tipo y concentración de almidón, regímenes de crecimiento del gránulo y enfriamiento, pH, la presencia de solutos como lípidos, sales y azúcares. También se puede manifestar la formación de precipitados y/o geles que afectan la textura, aceptabilidad y digestibilidad de los alimentos que contienen almidón (Biliaderis, 1998).

2.2.3. Aplicación del almidón en envases descartables

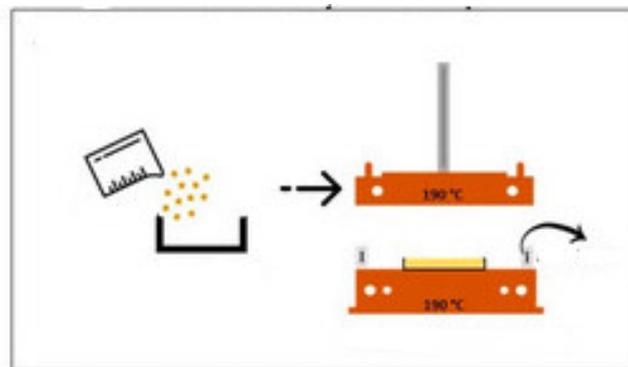
Debido al impulso de las preocupaciones ambientales por el uso de envases plásticos, se han realizado investigaciones y desarrollo de materiales a base de almidón, diferentes tipos de almidones como papa, mandioca, arroz, maíz y tapioca se han utilizado para su preparación. Su bajo costo y abundante disponibilidad genera un creciente interés en la obtención de nuevos productos y aplicaciones como, por ejemplo, usos en envases y recipientes desechables o de un solo uso, materiales de amortiguación y aislamiento, paneles de espuma, materiales de construcción, películas de mantillo, matriz de encapsulación y liberación controlada, dermatológica y cosmética (Soykeabkaew y Suwantong, 2015). Generalmente es usado como termoplástico, se plastifica por desestructuración en presencia de cantidades específicas de agua o plastificantes y calor. Sin embargo, los almidones tienen una alta sensibilidad a la humedad y sus propiedades mecánicas restringen sus usos, por este motivo se están realizando estudios para mejorar estas desventajas, mezclándolos con otros polímeros o fibras y ciertos aditivos (Mangaraj et al., 2019).

2.2.4. Proceso de formación de espuma por compresión

Las espumas obtenidas por proceso de compresión pueden tener diferentes formas, ya sea como tazas, vasos o bandejas. Puede obtenerse por moldeado, como se ve en la Figura 5, la mezcla se introduce en una prensa hidráulica con control de temperatura, se utilizan la presión y el calentamiento para formar la espuma (Mangaraj et al., 2019) o por horneado donde se calienta la masa del almidón en un molde cerrado, generalmente la temperatura del proceso varía entre 180 y 250°C.

Figura 5

Proceso de formación de espuma por compresión



Nota. Adaptado de “Biosourced disposable trays made of brewer’s spent grain and potato starch” por Ferreira et al., 2020, *Polymers*, 11(5).

Durante el proceso de compresión, los gránulos del almidón se gelatinizan en una pasta viscosa mientras el agua se evapora, la masa se expande hasta llenar el molde. Luego la espuma se seca gradualmente y toma forma del molde, por este motivo la forma y el grosor de la espuma pueden ser controlados eligiendo el molde. El producto espumoso debe retirarse del molde fácilmente para mantener su estructura, el estearato de magnesio se agrega a la masa como agente desmoldante y la goma guar evita la sedimentación del almidón. Las espumas obtenidas tienen una estructura con celdas pequeñas y cerradas en su exterior mientras que en la parte interior la estructura presenta poros más sueltos y grandes (Soykeabkaew, 2015).

2.3. Pectina

Las pectinas varían en cuanto a su concentración de metoxilo, su actividad gelificante y la presencia de otros grupos químicos, como las amidas y los etoxilos, son más frecuentes en las frutas inmaduras y los tejidos blandos. Están unidas a otros hidratos de carbono, como las hemicelulosas, y confieren dureza a algunos productos (Badui,2006). La disolución de las pectinas que componen la pared celular se ha relacionado con el ablandamiento de diversos alimentos. La pectina es un heteropolisacárido integrado por moléculas de ácido D-galacturónico con unidades unidas por enlaces α 1-4, sus cadenas están interrumpidas por unidades de L- ramnosa unidas mediante enlaces α 1-2. También se puede encontrar galactosa, arabinosa, glucosa y xilosa (Ferreira, 2007).

2. 3. 1. Clasificación según el contenido de metoxilo

a) Pectina de alto metoxilo.

Son aquellas en las que el ácido galacturónico del polímero tiene más del 50% de sus grupos carboxilo esterificados con metanol, cuando el pH está entre 2,8 y 3,5 y la concentración de sólidos solubles (azúcar) está entre el 60% y el 70% estas pectinas gelifican. Según las circunstancias, la pectina actúa más como agente viscosante que como gelificante. Las pectinas con alto contenido en metoxilo pueden clasificarse a su vez en dos grupos: las que presentan un grado de esterificación con metanol comprendido entre el 68 y el 75%, gelifican rápidamente en menos de cinco minutos; el otro grupo gelifica lentamente, tardando más de cinco minutos en gelificar y presentando un 60-68% de esterificación con metanol (Ferreira, 2007).

b) Pectina de bajo metoxilo.

Son aquellas en las cuales menos del 50% de los grupos hidroxilo están esterificados con metanol, requieren la presencia de cationes divalentes para la formación del gel, generalmente se emplea calcio. Los cationes forman enlaces con las moléculas de pectina

adyacentes formando una red tridimensional con los grupos carboxilos de la pectina. El pH puede fluctuar entre 1 a 7, o en un rango mayor y la concentración de sólidos solubles puede variar entre 0% - 80%, esto no causa un efecto en la textura del gel; el contenido de calcio es el principal causante de la formación del gel, si no hay calcio no se produce gelificación (Ferreira, 2007).

2.3.2. Propiedad viscosante de la pectina

Las pectinas tienen la capacidad de generar soluciones viscosas en agua; esta característica depende de la concentración, el pH, la temperatura y el grado de polimerización de la pectina, así como de la presencia de electrolitos. La viscosidad aumenta a medida que se incrementa la concentración de pectina con un alto grado de esterificación en la solución, también puede aumentar con la adición de calcio y otros iones polivalentes; algunas pectinas de bajo metoxilo pueden gelificarse si la concentración de calcio supera un umbral determinado.

2.4. Fibras vegetales

Todas las plantas superiores tienen fibras vegetales como componentes estructurales, que en su mayoría están formadas por fibrillas de celulosa incrustadas en una matriz de lignina. La máxima resistencia a la tracción y a la flexión se consiguen mediante la alineación de las fibrillas a lo largo de su longitud, además brinda rigidez (Maya y Sabu, 2008). La celulosa y la lignina son los componentes principales en todas las fibras naturales de refuerzo que son lignocelulósicas, y los contenidos de celulosa y lignina varían de una fibra natural a otra (Mohanty y Drzal, 2002).

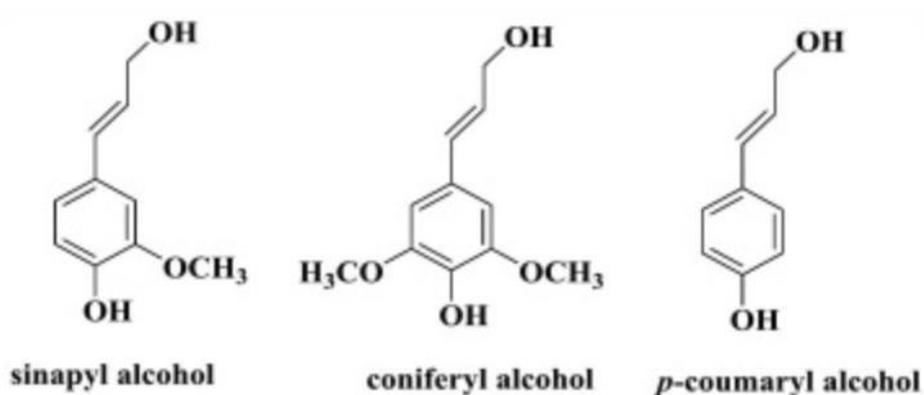
Las fibras naturales están constituidas por diferentes proporciones de celulosa, hemicelulosa y lignina, su composición depende de la naturaleza de la planta, lugar de cultivo, edad, etc. (Bharath y Basavarajappa, 2016).

2.4.1. Lignina

Las ligninas se sintetizan a partir del acoplamiento oxidativo de monómeros de alcohol p-hidroxicinámico y compuestos relacionados. Estos polímeros se encuentran principalmente en forma secundaria en paredes celulares vegetales engrosadas, están unidos covalentemente a hemicelulosas y proporcionan resistencia y rigidez a la pared celular, permitiendo que las plantas crezcan hacia arriba. También proporcionan al sistema vascular la hidrofobicidad necesaria para el transporte de agua y solutos (Pérez et al., 2002).

Figura 6

Tres monómeros de la lignina



Nota. Adaptado de “Preparation of lignin-based hydrogels, their properties and applications” por Mondal et al., 2023, *International Journal of Biological Macromolecules*, 125580.

La lignina es el término general para un gran grupo de polímeros aromáticos. Constituye el único grupo de polímeros biosintetizados con un esqueleto aromático, tienen la función de hacer rígidas e impermeables las paredes secundarias de las células, además de protegerla de la degradación microbiana dándoles resistencia a la descomposición.

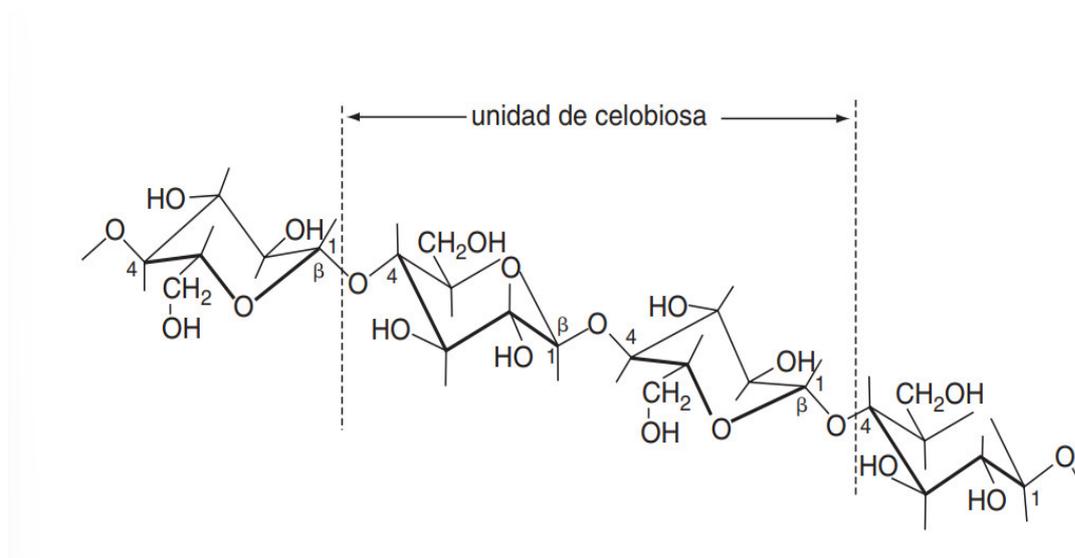
Su complejidad proviene de la asociación de los tres monolignoles (Figura 6) por diferentes enlaces químicos sin carácter ordenado o repetitivo para formar un polímero amorfo e hidrofóbico (Saes et al., 2010).

2.4.2. Celulosa

Es el compuesto orgánico más abundante de la naturaleza, este polisacárido es prácticamente una fuente inagotable de glucosa que se renueva continuamente a través de la fotosíntesis, se están desarrollando diversos estudios para aprovechar su uso en la producción de glucosa (Badui, 2006).

Figura 7

Celobiosa, unidad representativa de la celulosa.



Nota. Adaptado de *Química de los alimentos*, por Badui, S., 2006., Pearson Educación.

(Beguin y Aubert, 1994 citado por Perez et al., 2002).

La celulosa se compone de moléculas de celobiosa que están formadas por subunidades de D-glucosa unidas por enlaces glucosídicos β -1,4 (Figura 7). La hemicelulosa y la lignina cubren las microfibrillas y se agrupan para crear la fibra de celulosa. Estas forman largas cadenas, conocidas como fibrillas elementales, unidas entre sí por enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals. Existen dos formas de celulosa: la cristalina y la amorfa, que representan la parte menor de las cadenas de celulosa no estructuradas.

2.4.3. Hemicelulosa

En comparación con la celulosa, es un polisacárido de peso molecular reducido, esta formado por los siguientes ácidos: 4-O-metil-glucurónico, D-galacturónico, D-xilosa, D-manosa, D-galactosa, D-glucosa, L-arabinosa y D-glucurónico. Los enlaces glucosídicos, b-1,4 y ocasionalmente b-1,3, unen los azúcares entre sí (Pérez et al., 2002). El término se utiliza para describir una amplia clase de polisacáridos con diversos tipos de monómeros (heteropolisacáridos) que se encuentran principalmente en la pared celular y actúan como agentes cementantes en el tejido vegetal (Badui, 2006).

La hemicelulosa de la madera dura consiste principalmente en glucuronoxilano, mientras que la de la madera blanda consiste en glucomanano. La hemicelulosa se diferencia de la celulosa principalmente en que sus ramificaciones incluyen cadenas laterales cortas formadas por varios azúcares, además pueden hidrolizarse fácilmente, incluso cuando se cristalizan con cadenas de celulosa, no se combinan (Perez et al., 2002).

2.5. Compuestos reforzados con fibras naturales

El interés en los materiales compuestos de polímeros reforzados con fibras naturales (Figura 8) está creciendo rápidamente tanto en términos de sus aplicaciones industriales como de investigación fundamental. Son renovables, baratos, total o parcialmente reciclables y biodegradables. Las plantas como el lino, el algodón, el cáñamo, el yute, el sisal, el kenaf, la piña, el ramio, el bambú, el plátano, etc., así como la madera, utilizada desde tiempos inmemoriales como fuente de fibras lignocelulósicas, se aplican cada vez más como el refuerzo de materiales compuestos (Chandramohan y Marimuthu, 2011).

Los principales beneficios específicos del uso de fibras lignocelulósicas son su alta disponibilidad, bajo precio, baja densidad en comparación con las fibras de vidrio convencionales (permitiendo preparar materiales livianos), total biodegradabilidad, alta resistencia a la tracción y comportamiento no abrasivo durante el procesamiento. Además, a

diferencia de las fibras de vidrio o sintéticas, tienen menos impacto en la salud de los fabricantes de composites (irritación de la piel, cáncer de pulmón). Por todas estas razones, las fibras lignocelulósicas son buenas candidatas para el refuerzo termoplástico. Sin embargo, se sabe que algunos procesos de fabricación que producen fibras naturales producen grandes cantidades de polvo, lo que puede ser perjudicial a largo plazo para el personal de producción. Además, el uso de fibras vegetales para el refuerzo compuesto podría tener algunos límites, debido a su baja resistencia térmica o su sensibilidad al agua (Berhet et al., 2016).

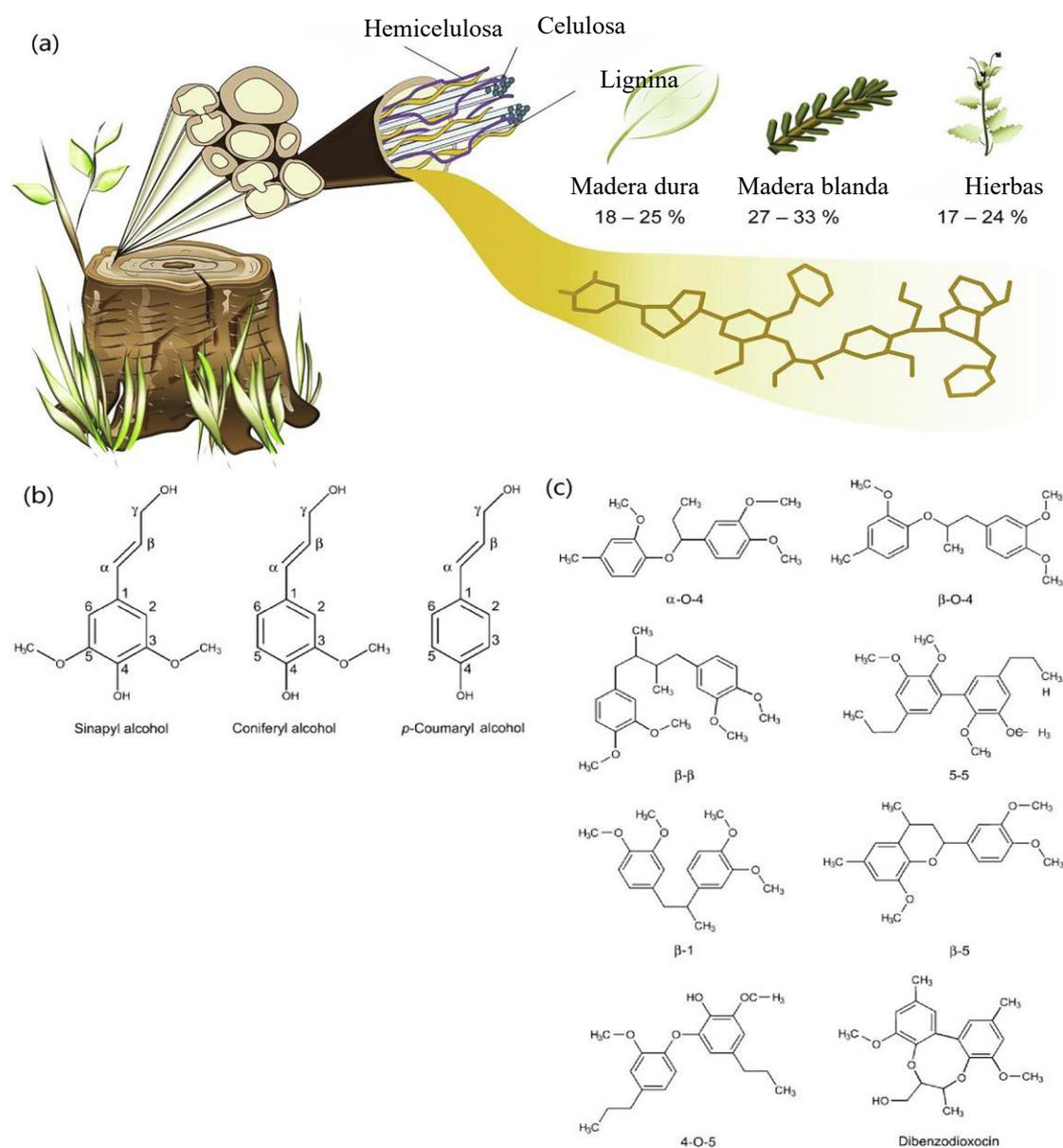
Los inconvenientes que obstaculizan su crecimiento en el mercado del envasado de alimentos son principalmente su procesabilidad limitada, propiedades mecánicas y de barrera insuficientes, alto costo de producción (por ejemplo, bio-poliésteres) o reclamos ambientales controvertidos. Además, la sensibilidad del material al agua y al deterioro microbiano a menudo es incompatible con los requisitos de conservación de calidad y seguridad alimentaria.

2.6. Biodegradabilidad y biodegradación

El término biodegradabilidad y biodegradación suele utilizarse como sinónimos, sin embargo, cada uno tiene un significado diferente. La biodegradabilidad se refiere a una potencialidad, es decir, la capacidad de un polímero para ser degradado por un agente biológico; la biodegradación se refiere a un proceso que ocurre bajo ciertas condiciones, en un tiempo dado, con resultados medibles. Entonces la biodegradabilidad de un polímero se infiere estudiando los procesos de biodegradación, desde un enfoque de laboratorio bajo condiciones específicas. Los métodos para medir la biodegradabilidad simulan las condiciones ambientales y microbiológicas de un proceso de compostaje. El material de prueba generalmente se reduce a polvo y se mezcla con una cierta cantidad de compost maduro, que se utiliza como fuente de microorganismos y nutrientes, se lleva al grado correcto de humedad y se mantiene a una temperatura constante de 58°C. A partir de la medición del CO₂ producido en estas condiciones,

Figura 8

Composición de la fibra lignocelulósica: celulosa, hemicelulosa y lignina, y contenidos de lignina en hierbas, madera dura y madera blanda (a). Diagramas estructurales de tres unidades en la lignina: grupo siringilo (tipo S), el grupo guaiacilo (tipo G) y el grupo p-hidroxifenilo (b). Tipo de enlace interlignínico formado por tres unidades (c).



Nota. Adaptado de “The cornerstone of realizing lignin value-addition: Exploiting the native structure and properties of lignin by extraction methods”, por Huang et al., 2020, *Chemical Engineering Journal*, 402, 126237.

se determina el grado de conversión (mineralización) del carbono orgánico del material de base biológica. Paralelamente se mide la biodegradación del material de referencia, la celulosa microcristalina. Según la EN 13432:2001, la biodegradación del material de ensayo, medida mediante el ensayo de compostaje controlado, debe ser como mínimo del 90% (porcentaje de conversión del carbono orgánico en CO₂) o del 90% del nivel alcanzado por la celulosa al mismo tiempo (biodegradación relativa), por un tiempo máximo de seis meses. La celulosa debe alcanzar al final de la prueba una biodegradación de al menos el 70%; de lo contrario, la prueba no es válida. La celulosa se utiliza como control interno, para asegurar que el entorno de prueba esté activo. Al ser un material totalmente biodegradable, el nivel de mineralización de la celulosa se considera como la máxima mineralización alcanzable en las condiciones de prueba (Innocenti, 2003).

2.7. Grado de desintegración

El grado de desintegración es un proceso físico que implica la fragmentación del material plástico en el compost final. Esta puede realizarse a escala piloto o a escala laboratorio (Briassoulis et al., 2010). El ensayo consiste en mezclar las piezas de plástico con un material sintético sólido biodegradable y someterlo a una degradación aeróbica. El material sintético está compuesto por compost, aserrín de madera, alimento para conejos, almidón, sacarosa, etc. La mezcla se coloca en un reactor de polipropileno sellado herméticamente para evitar una evaporación excesiva y la degradación aeróbica se llevó a cabo en un horno de circulación de aire a una temperatura constante de 58 ± 2 °C durante 90 días. Durante este tiempo se controló periódicamente la humedad, mezcla y aireación de las muestras. Después de máximo 90 días de compostaje se calcula el grado de bio desintegración, por diferencia de peso (Sarasa y Javierre, 2009).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Los ensayos fisicoquímicos realizados a la cáscara de café y la elaboración de bandejas se desarrollaron en el laboratorio de fisicoquímica de la Dirección de Investigación, Desarrollo, Innovación y Transferencia Tecnológica (DIDITT) del ITP- Instituto Tecnológico de la Producción, ubicado en la provincia del Callao.

3.2. Materiales y equipos

3.2.1. *Materia prima*

La cáscara de café *arábica*, variedad *Caturra* se acopio en la provincia de San Ignacio, ubicada en Cajamarca. El almidón de papa procedente de Laboratorios “Lely S.A.C” y pectina cítrica de grado 150° de la marca comercial Fratello.

3.2.2. *Insumos*

- Estearato de Magnesio
- Glicerol, marca Biolab Reagent

3.2.2. *Reactivos químicos*

- Ácido sulfúrico 95-97 % de pureza.
- Hidróxido de sodio 97 – 98,5 % de pureza.
- Clorito de sodio 80% de pureza.
- Ácido acético glacial 99.9% de pureza.
- Etanol 96% de pureza.
- Éter de petróleo 99.9% de pureza

3.2.3. *Materiales de laboratorio*

- Beaker de 10, 150, 250, 500 y 1000 mL

- .
- Probeta de 10, 50 y 100 mL
- Matraz Erlenmeyer 100, 300 y 500 mL
- Pipetas de 5, 10, 20 mL
- Micropipeta de 1000 y 5000 ul
- Propipeta
- Fiola de 25, 50, 10 mL
- Varilla de vidrio
- Placas de petri
- Espátula
- Kitasato
- Balón de destilación (250, 500, 1000 mL)
- Papel whatman N° 1 y N° 4
- Pesafiltro
- Balones de digestión para proteína
- Bureta de 50 mL
- Celda de colorímetro
- Crisoles de porcelana
- Filtro Gosh
- Papel toalla

3.2.4. Instrumentos de medición

- Regla
- Micrómetro Mitutoyo (700-118-20)
- Cronómetro
- Termohigrómetro digital Control Company

3.2.5. Equipos

- Balanza Analítica Digital
- Analizador de textura Brookfield modelo CT3
- Campana desecadora
- Campana extractora
- Colorímetro, Konica Minolta CM-5.
- Agitador mecánico
- Termoprensa
- Molino de martillos
- Molino ultracentrífugo Retsch
- Bomba de vacío
- Estufa por convección marca MMM, Venticell

3. 2. 6. Otros

- Cuchillo de acero
- Molde de termoprensado
- Platos
- Papel absorbente Elite
- Pinza
- Tamiz N° 60
- Lapiceros
- Espátulas
- Taper cuadrado de 25x25x 12 cm
- Compost marca 4 estaciones
- Aserrín

3. 3. Procedimiento experimental

3. 3. 1. Composición química proximal de la cáscara de café

Para realizar los análisis de humedad, grasa cruda, proteína y ceniza, la muestra se redujo a un tamaño de partícula menor a 0,25 mm. Se usó las metodologías descritas en el Official Methods of Analysis AOAC (2010).

a) Determinación de humedad

Se pesa de 3 a 4 gramos en un pesafiltro (con peso conocido) y se lleva a la estufa a una temperatura de 100 a 105 °C, hasta que el peso sea constante. Los cálculos se realizaron por diferencia de peso.

$$\%Humedad = \frac{(B - C) * A * 100}{A}$$

Donde:

A = Peso de la muestra en gramos

B = Pesafiltro + muestra antes del secado.

C = Pesafiltro + muestra después del secado

(B - C) = Pérdida de peso de la muestra después del secado.

b) Determinación de grasa cruda

Se pesa de 3 a 4 g de muestra, luego se coloca en un cartucho de celulosa y se rellena con algodón. Los cartuchos se colocan dentro del dedal del Soxhlet, se agrega éter de petróleo a los balones de 250 mL (previamente pesados) y se unió con el condensador del extractor de soxhlet. La extracción duró 6 horas aproximadamente, se dio por culminada cuando el solvente en el dedal fue incoloro. Terminada la extracción los balones con la grasa extraída se dejaron reposar hasta eliminar el éter restante, la grasa cruda se calculó por diferencia de peso.

$$\%Grasa Cruda = \frac{(W_2 - W_1) * 100}{S}$$

Donde:

W_1 = Peso del balón vacío.

W_2 = Peso del balón más el contenido (secado).

S = Peso de la muestra.

c) Determinación de Proteína

El método micro Kjeldahl se llevó a cabo en 3 etapas:

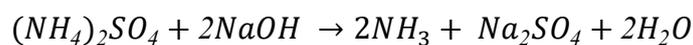
- *Digestión:* Se pesa 1g de cáscara de café con exactitud en un papel y se coloca dentro de un balón de digestión, al cual se le agrega 7 g de catalizador (Na_2SO_4 y $CuSO_4(II)$ 9:1) y luego se adiciona 15 mL de H_2SO_4 . El balón se coloca en una plancha térmica, la digestión termina cuando el color del contenido cambia a celeste, luego se transfiere a una fiola de 100 mL y se enrasa con agua destilada.



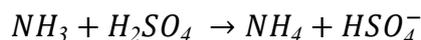
Muestra	Ácido Sulfúrico	Sulfato de amonio
---------	-----------------	-------------------

- *Destilación:* Consiste en alcalinizar la muestra, para que el nitrógeno se desprenda en forma de amoníaco, luego este se recoge en un exceso de ácido sulfúrico.

En un matraz se agrega 5 mL de H_2SO_4 (0,1 N) con 3 gotas de indicador Tochiro y en el tubo de destilación se agrega 5 mL de muestra digerida. Luego se coloca el tubo en el equipo destilador, este se encarga de adicionar el NaOH. Culminado el tiempo de destilación el contenido del matraz se observa de color morado y se utilizará en la siguiente etapa.



Amoniaco



- *Titulación:* Para cuantificar el nitrógeno amoniacal se utiliza la técnica de volumetría ácido-base. Utilizando hidróxido sódico 0,01N, se valora el ácido sulfúrico residual en el matraz hasta conseguir un tono translúcido (verdoso).

$$\% \text{ Nitrógeno} = \frac{(Bco - S) * N * 0,014 * 20 * 100}{g \text{ muestra}}$$

Donde:

Bco= mL de solución de NaOH usado para el blanco.

Gasto= mL de solución de NaOH usado para la muestra.

N= Normalidad de NaOH multiplicado por el factor de corrección.

0,014=meq-g de nitrógeno.

20 = Factor de dilución

Proteína cruda = % Nitrógeno

d) Cenizas

Se pesan dos gramos de cáscara de café en un crisol de porcelana de peso conocido. A continuación, se coloca en una mufla a 550 °C durante dos horas. Al final del proceso, se saca y se deja enfriar en un desecador. Se registra el peso final y se calcula el contenido de cenizas a partir de la diferencia.

$$\% \text{ Cenizas} = \frac{(B - C) * 100}{A}$$

Donde:

A= Peso de muestra en gramos.

B= Peso en gramos del crisol más cenizas.

C = Peso en gramos del crisol vacío.

e) Determinación de Fibra Cruda

Es un método por el cual los compuestos no celulósicos se solubilizan en soluciones de H₂SO₄ a 0,255 N y NaOH al 0,313 N controlando las condiciones de temperatura. Se utiliza vacío controlado para filtrar la mezcla resultante, y la fibra bruta se elimina del residuo de filtrado quemándolo (en la mufla).

$$\%Fibra = \frac{Pérdida\ por\ incineración}{Peso\ de\ muestra} \times 100$$

f) Determinación de carbohidratos

Se halla por diferencia de porcentajes, después de realizar los análisis de proteína, grasa, fibra y ceniza (Salvatierra, 2015).

$$\%Carbohidratos = 100 - (\%H + \%P + \%G + \%F + \%C)$$

Donde:

%H= Humedad

%P = Porcentaje de proteína

%G = Porcentaje de grasa cruda

%F= Porcentaje de fibra

%C = Porcentaje de Ceniza.

3.3.2. Composición lignocelulósica de la cáscara de café

Para tener una muestra homogénea, el tamaño de partícula se redujo a 0,25 mm.

a) Determinación de extractos

La determinación se realizó en base al procedimiento NREL/TP-510-42619. Se pesa 10 g de muestra, se envuelve en papel filtro y se coloca en el dedal del extractor de Soxhlet. Se

realiza una extracción de 3 h utilizando como solvente agua destilada y la segunda extracción de 2 horas utilizando como solvente etanol. Se retiró la muestra y se seca en una estufa a 70°C durante 3 horas. Luego se pesa la muestra, el contenido de extractos se determinó por diferencia de peso.

La muestra sin extractos obtenida se utilizará para la determinación de Lignina, celulosa y holocelulosa.

$$\%Extractos = \frac{\text{Peso muestra original} - \text{Peso de muestra sin extracto}}{\text{Peso de muestra original}} \times 100$$

b) Determinación de Lignina Klason

Según el método TAPPI T-222 os-74, se pesó 1 g de muestra sin extractos en un matraz de 300 mL, se añadió 15 mL de H₂SO₄ al 72% , se mantuvo en agitación durante 2 horas. Luego se transfirió el contenido a un balón de destilación y se agregaron 560 mL de agua destilada, para obtener H₂SO₄ al 4%, luego se llevó a ebullición durante 4 horas mediante reflujo. El contenido se filtró utilizando un filtro Gooch #3 y una bomba de vacío, luego se lavó la muestra con agua destilada caliente y se secó en una estufa a 105 °C hasta obtener peso constante.

$$\%Lignina = \frac{\text{Peso residuo seco}}{\text{Peso de muestra original libre de extracto}} \times 100$$

c) Determinación de holocelulosa

Según la norma ASTM 1104-56, se pesó 2g de muestra libre de extractos y se colocó en un matraz, se agregó 160 mL de agua destilada, 1g de clorito de sodio y 0,2 mL de ácido acético. Se dejó reposar durante 1 hora en un baño de agua a 80°C. Pasado el tiempo se añadió nuevamente 1g de clorito de sodio y 0, 2 mL de ácido acético. Se realizó esta acción

durante 3 horas aproximadamente. Tras la última adición se dejó reposar 1 hora, luego se enfrió y se filtró. Se realizó un lavado con 500 mL de agua. La muestra filtrada se secó en una estufa a 105°C durante 4 horas hasta que el peso sea constante.

$$\%Holocelulosa = \frac{\text{Peso residuo seco}}{\text{Peso de muestra original libre de extracto}} \times 100$$

$$\text{Holocelulosa} = \text{Celulosa} + \text{Hemicelulosa}$$

d) Determinación de celulosa

Según la norma TAPPI T 212, en un matraz se pesó 1g de holocelulosa, se agregaron 10 mL de NaOH al 17,5% p/v se agitó y se dejó reposar por 5 min. Luego se añadió 5 mL de NaOH al 17,5 % p/v se agitó y se dejó reposar por 30 min. Finalmente se agregaron 30 mL de agua, se agitó y se dejó reposar durante 1h. Luego se filtró al vacío, se realizó un lavado con una disolución de NaOH y se enjuaga nuevamente con 30 mL de agua. Se agregó 15 mL de ácido acético al 10% sin aplicar vacío y se dejaron reposar 3 minutos, por último, se enjuaga con 50 mL de agua destilada. La muestra se secó en la estufa a 70 °C hasta peso constante, el resultado obtenido se multiplica por el porcentaje de holocelulosa determinado anteriormente.

$$\%Celulosa = \%Holocelulosa \times \frac{\text{Peso residuo seco}}{\text{Peso de muestra original}} \times 100$$

e) Determinación de hemicelulosa

La holocelulosa es la suma de celulosa y hemicelulosa, por lo tanto, esta se determinó por la diferencia de los porcentajes de holocelulosa y celulosa obtenidos anteriormente.

$$\%Hemicelulosa = \%Holocelulosa - \%Celulosa$$

3.3.3. Acondicionamiento de cáscara de café

Se puede observar el flujograma del proceso en la Figura 9.

a) Recepción

La cáscara de café *arábica*, variedad *Caturra* se acopio en la provincia de San Ignacio, ubicada en Cajamarca, esta fue trasladada al Laboratorio de Físicoquímica de la DIDIT – ITP, donde se realizó un pesado, se corroboró que presente color uniforme y se separó la materia extraña (piedras, paja, etc.).

b) Lavado y desinfección

Se realizó un lavado sumergiendo las cáscaras en un recipiente con agua fría con 100 ppm de hipoclorito de sodio durante 10 min, se agitó manualmente para retirar impurezas y materia extraña.

c) Secado

Las cáscaras se colocaron en bandejas, ocupando la mayor superficie posible, sin sobreponerse entre ellas. Luego se colocaron en una estufa a 65°C durante 12 h.

d) Primera molienda

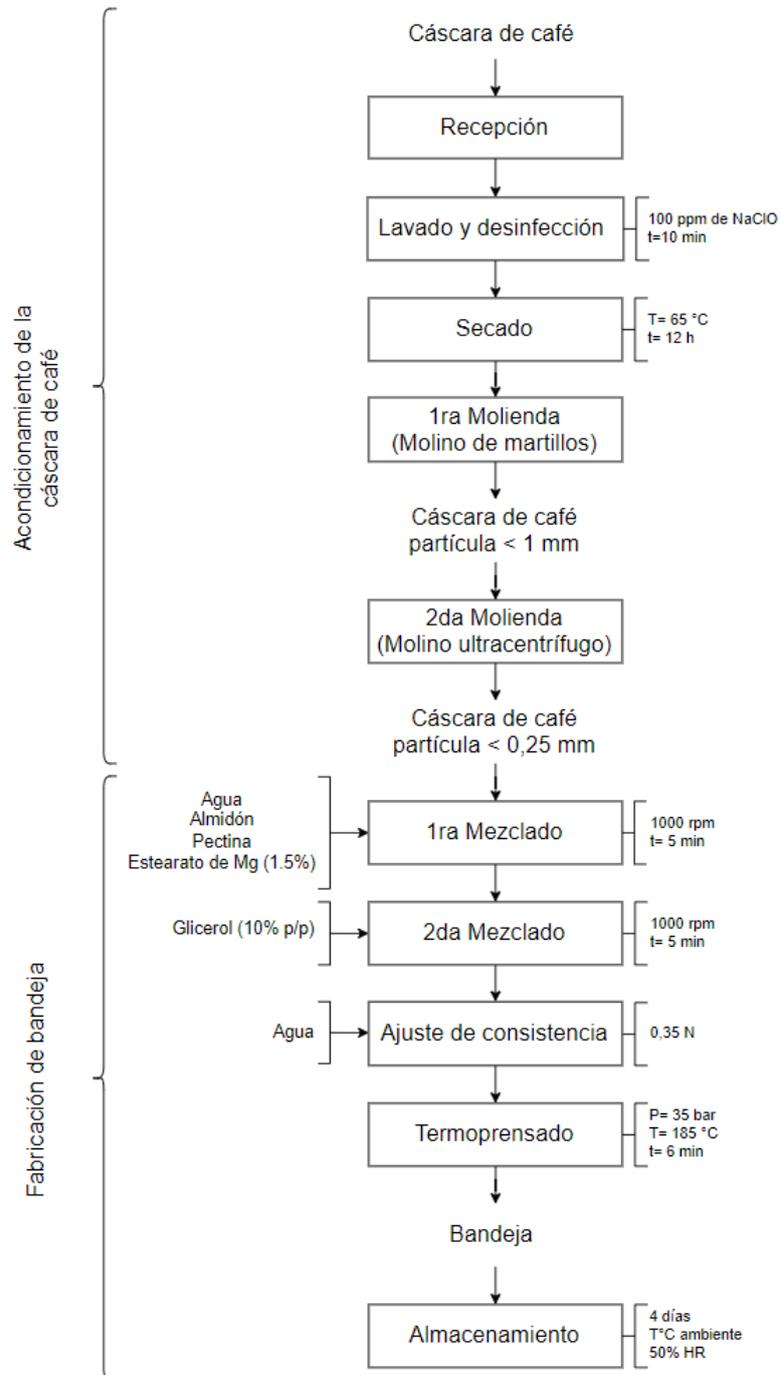
La operación se realizó en un molino de martillos, la cáscara se molió hasta obtener un tamaño de partícula de 1 mm.

e) Segunda molienda

La cáscara obtenida de la primera molienda se volvió a moler en un molino ultracentrífugo para reducir el tamaño de partícula a 0,25 mm.

Figura 9

Flujograma del proceso de desarrollo de mezclas para la obtención de prototipo de bandejas biodegradables.



3.3.4. Fabricación de bandejas biodegradables

a) Primer mezclado

En un recipiente se mezcló la cáscara de café molida (0.25 mm), almidón, pectina (previamente diluida en agua al 10%), estearato de magnesio y agua utilizando un agitador mecánico, durante 5 min a 1000 rpm.

b) Segundo mezclado

Una vez homogenizados los componentes cáscara de café, almidón y pectina se agregó glicerol al 10% (plastificante) y se mezcló nuevamente durante 5 min a 1000 rpm hasta obtener una mezcla homogénea.

c) Ajuste de consistencia

Los tratamientos presentaban diferente consistencia por ese motivo se agregó agua hasta alcanzar una dureza de 0.35N (este dato se obtuvo a partir de pruebas preliminares), esta consistencia permite distribuir la mezcla de manera óptima sobre el molde. Se utilizó un analizador de textura Brookfield – CT3 con una sonda cilíndrica TA11/1000 (Basiri y Shekarforoush, 2022). Se colocó la mezcla hasta la marca graduada de 30 mL en un beaker marca Pírex de 50 mL, el beaker se colocó sobre la base TA-RT-KIT y se realizó el análisis con velocidad de 1 mm/s, carga de activación 0.1 N y un valor meta de 10 mm.

d) Termoprensado

Se utilizó un molde de acero formado por dos piezas, la mezcla se colocó en la pieza inferior y luego se tapó con la pieza superior, este sistema fue introducido dentro de la termoprensa. Se realizaron pruebas preliminares para encontrar los parámetros de presión, temperatura y tiempo que permitieron obtener las 21 bandejas enteras y con una estructura que permita realizar mediciones. Los parámetros utilizados fueron 35 Bar, 185 °C y 6 min. Finalizada la operación se retiró la bandeja y se dejó enfriar a temperatura ambiente.

d) Almacenamiento

Las bandejas se almacenaron durante 4 días a temperatura ambiente y a $50 \pm 3\%$ de humedad relativa en un desecador antes de realizar los análisis. Para mantener la humedad relativa del desecador se utilizó una solución de acetato de potasio 12 mol/kg.

3.3.5. Análisis de las variables respuesta de las bandejas biodegradables

Luego de la obtención de los prototipos de bandeja, a cada tratamiento se le evaluará las siguientes propiedades (variables respuesta) correspondiente al diseño experimental:

a) Capacidad de absorción de agua

La bandeja se cortó en rectángulos de 2.5 cm de ancho y 5.0 cm de largo, se registró el peso inicial y la muestra se sumergió en 100 mL de agua destilada, se utilizó el método Cobb (ABNT, 1999) con algunas modificaciones, los tiempos de inmersión fueron 1, 10, 15 y 20 min, el exceso de agua se eliminó papel de toalla y la muestra fue pesada. Se realizaron 4 repeticiones por prueba y la cantidad de agua absorbida se calculó como la diferencia de peso y se expresa como masa de agua absorbida sobre masa de la muestra original.

$$\%C. \text{ de absorción de agua} = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Peso inicial}}$$

b) Resistencia a la flexión

El módulo de flexión se determinó utilizando un analizador de textura Brookfield - CT3, equipada con accesorio curva de 3 puntos. Las muestras se cortaron en rectángulos de 2.5 de ancho y 5 cm de largo, las pruebas se realizaron según la norma ISO 178:2003 con algunas modificaciones. La velocidad de la prueba fue de 0.02 mm/s, la carga de activación 0.1 N y el valor meta 10 mm. La resistencia a la flexión se calcula a través de una fórmula matemática. Se realizaron 3 pruebas por tratamiento como mínimo y el resultado fu expresado en MPa.

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2}$$

Donde:

σ = Resistencia a la flexión.

F = Fuerza aplicada en el medio de la muestra

L = Distancia entre los puntos de apoyo de la muestra

B = Largo de la muestra.

h = Espesor de la muestra.

3.3.6. Optimización y verificación del tratamiento óptimo

Se realizó la optimización del diseño con el programa Desing Expert en función mínima absorción de agua y mínima resistencia a la flexión. El tratamiento óptimo obtenido a partir del diseño estadístico se repitió nuevamente y se validó los resultados de las variables respuesta absorción de agua y flexión siguiendo la metodología del punto 3.3.5.

3.3.7. Caracterización la bandeja óptima

a) Color

Se determinó utilizando un colorímetro Konica Minolta CM – 5. El color se evaluó en el espacio CIEL*a*b, en cuanto a la luminosidad L^* (claro 100 y oscuro 0), a^* (rojo - verde) y b^* (amarillo - azul) son las coordenadas de cromaticidad con valores de -60 a +60 (Panzarini et al., 2020).

b) Espesor

Se utilizó un micrómetro digital Mitutoyo, modelo 700-118-20, las muestras se cortaron en cuadrados de 2.5 x 2.5 cm². Los realizaron 4 mediciones y se tomó el promedio como resultado (Hoyos et al., 2021).

c) Densidad

La densidad de las bandejas se determinó a partir de la masa y el volumen (espesor - ancho - largo) de las muestras. La bandeja se cortó en cuadrados de 2.5 x 2.5 cm², se llevó a la estufa (100 °C) durante 24 h y luego se registró el peso. El volumen se calculó multiplicando los lados y el espesor. Los valores presentados son la media de 8 muestras para cada formulación (Spada et al., 2019).

$$Densidad = \frac{Masa (g)}{Volumen(cm^3)}$$

d) Microscopia electrónica de barrido (SEM)

El estudio de la morfología se realizó con microscopio electrónico de barrido (Axia ChemiSEM MyAP) según la metodología de Aguilar y Tapia (2023) las muestras fueron secadas a 40 °C durante 24 h, luego se facturaron y se colocó sobre trozos de aluminio con cintas de carbono en plataformas de metal para su observación en el microscopio a bajo vacío. Las imágenes fueron obtenidas con aumentos de 120x a una distancia de 11.3 mm.

e) Grado de desintegración

El grado de desintegración se determinará midiendo la pérdida de masa del material expuesto a un entorno de compostaje, siguiendo la norma ISO 20200: 2004 con algunas modificaciones. Las muestras se cortan en cuadrados de 2.5 x 2.5 cm² y se entierran en un recipiente con compost de plantas, debe presentar 55% de humedad y una relación carbono: nitrógeno entre 20:1 y 40:1. Los recipientes se mantienen a una temperatura de 58°C en condiciones aeróbicas durante 60 días. Transcurridos los días las muestras se secan a 40°C hasta peso constante. Se calculará el grado de desintegración siguiendo la ecuación:

$$\%D = \frac{m_i - m_r}{m_i} \times 100$$

Paralelamente en un reactor se registró la pérdida de peso, retirando muestra en días determinados (1, 2, 4, 7, 10, 14, 21, 42, 50 y 60) y calculando la diferencia de peso.

Tanto al inicio (día 0) como al final del ensayo (día 60) se controlaron los siguientes parámetros en el compost:

Sólidos secos (DS): Se peso 5 g de compost en un pesafiltro y se secó a 105°C en una estufa de convección hasta peso constante:

$$\%DS = \frac{m_s^{105}}{m_i} \times 100$$

Donde:

%DS = Solidos secos

m_s^{105} = Peso del compost secado a 105 °C.

m_i = Peso inicial del compost.

Sólidos volátiles (VS): El compost se secó en una estufa de convección a 105 °C hasta peso constante y posteriormente se calcina a 550 °C durante 8 horas en una mufla hasta peso constante:

$$\%VS = \frac{m_s^{105} - m_s^{550}}{m_s^{105}} \times 100$$

Donde:

%VS = Solidos Volátiles

m_s^{105} = Peso del compost secado a 105 °C.

m_s^{550} = Peso del compost calcinado a 550°C.

Relación carbono / nitrógeno (C/N) se obtuvo a partir de la siguiente ecuación:

$$C/N = \frac{VS(\%)}{2}$$

La prueba se considera valida si la disminución de solidos volátiles en cada reactor debe ser superior o igual al 30%, R se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{(m_i * DM_i * VS_i) - (m_f * DM_f * VS_f)}{(m_i * DM_i * VS_i)} * 100$$

Donde:

m_i = Masa inicial de compost introducido en el reactor.

DM_i = Masa seca inicial expresada en porcentaje dividido entre 100.

VS_i = Contenido de solidos volátiles iniciales en el compost expresado en porcentaje dividido entre 100.

m_f = Masa final del compost.

DM_i = Masa seca final expresada en porcentaje dividido entre 100.

VS_i = Contenido final de solidos volátiles en el compost expresado en porcentaje dividido entre 100.

3.3.8. Diseño experimental u observacional:

Las características del prototipo de bandeja dependen de cómo interactúan los componentes: cáscara de café (x_1), almidón de papa (x_2) y pectina (x_3); por tal motivo se utilizó un diseño experimental de mezclas, donde las condiciones fueron que la cantidad de cada componente debe encontrarse entre 0 - 100% y la suma de estos debe ser igual a la unidad (Montgomery, 2011).

En la Tabla 1 se muestran las restricciones aplicadas a los componentes, se tomaron en base a pruebas preliminares y preexistencia de información para la formulación de bandejas biodegradables.

Se realizaron 21 tratamientos (6 ejecuciones, 5 puntos de ajuste, 5 réplicas y 5 puntos centrales y un tratamiento control (hecho solo a base de almidón y pectina), el número de corridas se realizó por triplicado. La optimización de la composición de la mezcla se logró obteniendo la mínima absorción de agua y mínima resistencia a la flexión (Tabla 2), a partir de estos

resultados se eligió el mejor tratamiento y se continuó con la caracterización de la bandeja óptima.

Modelo estadístico cuadrático:

$$E(y) = \sum_{i=1}^q \beta_i x_i + \sum_{i<j} \sum_{j=2}^q \beta_{ij} x_i x_j$$

Donde q es el número de componentes, β_i representa la respuesta que se espera para la mezcla pura $x_i=1$ y $x_j=0$ cuando $j \neq i$. La ecuación $\sum_{i=1}^q \beta_i x_i$ representa la mezcla lineal. Si existe una curvatura derivada de una mezcla no lineal entre pares de componentes, los parámetros β_{ij} representa una mezcla sinérgica o antagónica (Montgomery, 2011).

Tabla 1

Componentes y restricciones de la formulación

Componente	Nombre	Unidad	Restricciones en la formulación
x_1	Cáscara de café	%	$5 \leq x_1 \leq 40$
x_2	Almidón de papa	%	$45 \leq x_2 \leq 80$
x_3	Pectina	%	$5 \leq x_3 \leq 15$

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2

Variables respuesta del diseño estadístico

Respuestas	Unidades
Absorción de agua	%
Resistencia a la flexión	MPa

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4. 1. Composición química proximal

La composición proximal de la cáscara de café se muestra en la Tabla 3, los valores de grasa y proteínas fueron similares a los recopilados por Oliveira y Franca (2015) quienes informaron que el contenido de grasa se encuentra entre 1 - 2 %, el contenido de proteína entre 4 - 12 %, el contenido de ceniza y grasa son comparables con los reportados por Andrade (2009). Sin embargo, la composición de la cáscara de café puede variar dependiendo de la altitud, variedad de cultivo, condiciones de cultivo, modo de procesamiento y etapa de desarrollo de las cerezas del café (Elías, 1979 citado por Hejna, 2021).

Tabla 3

Composición química proximal de la cáscara de café comparado con los resultados de otros autores.

Componentes	Resultado (%)	Oliveira y Franca, 2015 (%)	Andrade, 2009 (%)
Humedad	7.37 ± 0.26	-	
Carbohidratos	77.56	45.00 – 89.00	-
Fibra	10.95 ± 0.92	-	17.70
Cenizas	6.44 ± 0.05	-	6.00
Proteína	3.77 ± 0.29	4.00 – 12.00	7.25
Grasa	1.28 ± 0.08	1.00 – 2.00	1.40 – 6.00

4.2. Determinación de componentes lignocelulósicos

La cáscara de café presenta componentes lignocelulósicos que se muestran en la Tabla 4, estos resultados son similares a los reportados por Bonilla et al. (2014) y Gurram et al (2016). Se espera que la adición de cáscara de café a la formulación de bandejas biodegradables mejore las propiedades físicas y mecánicas, como en el caso de Cruz Tirado et al. (2017) que utilizó fibras de caña de azúcar con una composición lignocelulósica similar a la de cáscara de café ($23,69 \pm 0,39\%$ celulosa, $19,29 \pm 1,34\%$ hemicelulosa y $17,93 \pm 1,08\%$ lignina insoluble) y la incorporó al 40% en espumas a base de almidón. Sus resultados mostraron una disminución en la capacidad de absorción de agua, un aumento de la resistencia a la flexión y reducción la deformación a la rotura de las espumas.

Tabla 4

Contenido de compuestos lignocelulósicos de la cáscara de café en base seca comparado con otros resultados

Componentes	Cáscara de café arábica		Bagazo de caña de azúcar	
	Resultado (%)	Bonilla et al., 2014 (%)	Gurram et al., 2016 (%)	Cruz Tirado et al., 2017 (%)
Extractos	56.80 ± 0.88	-	-	-
Holocelulosa	36.24 ± 0.67	24.30	43.00	42.98
Celulosa	21.21 ± 2.06	20.70	23.00	$23,69 \pm 0,39$
Hemicelulosa	15.03 ± 2.06	3.60	20.00	$19,29 \pm 1,34$
Lignina	12.67 ± 0.86	14.30	22.00	$17,93 \pm 1,08$

Cruz Tirado et al. (2019) afirman que las características mecánicas de las espumas basadas en almidón pueden mejorarse reforzándolas con componentes fibrosos como la celulosa. Según Vercelheze et al. (2012), el uso de fibras lignocelulósicas como refuerzo en matrices poliméricas de almidón aumenta la biodegradabilidad del material y disminuye la rigidez, además su composición química es similar a la del almidón por lo cual tienen una buena compatibilidad e interacción (Soykeabkaew y Suwantong, 2015).

4.3. Análisis de las variables respuesta de las bandejas biodegradables

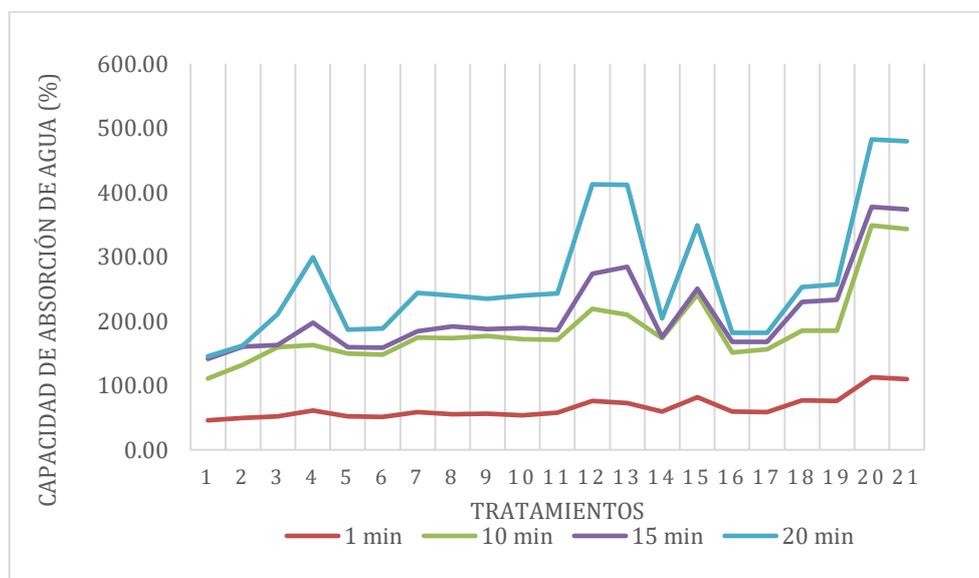
4.3.1. Capacidad de absorción de Agua

En la Tabla 5 se presentan los valores de capacidad de absorción de agua (CAA) para 4 tiempos de inmersión donde cada dato es el promedio de 4 repeticiones. Durante los primeros minutos los compuestos absorben agua rápidamente, hasta que se alcanza un punto de saturación (Kushwaha y Kumar, 2010), esto se observó en el T1 y T2 donde a partir de los 15 min no hubo un cambio significativo de la CAA.

En la Figura 10 se muestran las curvas de CAA para cada tiempo analizado en función de cada uno de los tratamientos, donde los valores fluctuaron entre 45.86 – 112.70%, 110.86 – 348.71%, 141.29 – 377.49% y 145.41- 482.37 % para los tiempos de 1, 10, 15 y 20 min respectivamente, este incremento en la CAA al aumentar el tiempo de inmersión fue significativo, se observa que a partir de los 10 min la tendencia de las curvas es similar, el pico más bajo corresponde al T1 (40% Cáscara de café , 55% Almidón y 5% pectina) y el más alto al T21 (5% Cáscara de café, 80% almidón y 15% pectina).

Figura 10

Representación de la absorción de agua a diferentes tiempos de inmersión para los 21 tratamientos.

**Tabla 5**

Valores experimentales para la variable respuesta: capacidad de absorción de agua

Tratamiento	Componentes			Respuesta			
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₁			
	C. Café (%)	Almidón (%)	Pectina (%)	Absorción de agua (%)			
	(%)	(%)	(%)	1 min	10 min	15 min	20 min
1	40	55	5	45.86 ± 2.70 ^a	110.86 ± 3.21 ^b	141.29 ± 3.69 ^c	145,41 ± 6,50 ^c
2	31.67	63.33	5	49.83 ± 1.29 ^a	132.03 ± 3.45 ^b	159.96 ± 3.02 ^c	161,72 ± 5,33 ^c
3	23.33	71.67	5	51.76 ± 1.31 ^a	159.60 ± 2.06 ^b	163.10 ± 3.45 ^c	210,56 ± 1,12 ^d
4	15	80	5	61.19 ± 2.29 ^a	162.41 ± 3.71 ^b	197.14 ± 3.45 ^c	298,86 ± 6,38 ^d
5	40	50	10	51.83 ± 1.60 ^a	149.26 ± 1.19 ^b	159.36 ± 2.82 ^c	186,69 ± 13,4 ^d
6	40	50	10	51.20 ± 1.21 ^a	148.30 ± 2.31 ^b	158.51 ± 7.51 ^c	188,20 ± 11,10 ^d
7	25	65	10	59.00 ± 1.15 ^a	174.13 ± 4.89 ^b	184.63 ± 3.22 ^c	243,60 ± 8,12 ^d
8	25	65	10	55.39 ± 1.77 ^a	173.39 ± 4.32 ^b	191.54 ± 6.93 ^c	239,89 ± 7,72 ^d
9	25	65	10	56.09 ± 1.23 ^a	176.60 ± 2.90 ^b	187.48 ± 3.26 ^c	234,80 ± 13,01 ^d
10	25	65	10	53.92 ± 1.04 ^a	172.05 ± 4.27 ^b	189.27 ± 3.82 ^c	239,53 ± 12,48 ^d

11	25	65	10	57.63 ± 1.24 ^a	171.22 ± 7.80 ^b	185.98 ± 6.34 ^c	243,04 ± 9,17 ^d
12	10	80	10	76.01 ± 1.71 ^a	219.26 ± 4.94 ^b	273.99 ± 4.26 ^c	412,38 ± 9,11 ^d
13	10	80	10	72.45 ± 2.44 ^a	210.19 ± 3.46 ^b	284.49 ± 1.89 ^c	411,92 ± 21,21 ^d
14	32.5	55	12.5	59.18 ± 2.48 ^a	173.89 ± 4.65 ^b	175.44 ± 0.47 ^b	204,01 ± 3,16 ^c
15	15	72.5	12.5	81.63 ± 1.50 ^a	241.68 ± 6.73 ^b	250.85 ± 7.66 ^b	349,27 ± 10,08 ^c
16	40	45	15	59.36 ± 2.13 ^a	151.43 ± 2.96 ^b	167.65 ± 4.88 ^c	181,94 ± 6,78 ^d
17	40	45	15	58.65 ± 1.25 ^a	155.89 ± 1.76 ^b	167.56 ± 6.41 ^c	181,52 ± 8,51 ^d
18	22.5	62.5	15	76.79 ± 1.37 ^a	184.97 ± 5.26 ^b	230.13 ± 3.24 ^c	253,05 ± 17,36 ^d
19	22.5	62.5	15	75.56 ± 1.26 ^a	185.38 ± 4.38 ^b	232.94 ± 4.00 ^c	257,48 ± 15,99 ^d
20	5	80	15	112.70 ± 1.04 ^a	348.71 ± 5.91 ^b	377.49 ± 1.60 ^c	482,37 ± 9,27 ^d
21	5	80	15	110.03 ± 1.67 ^a	343.46 ± 7.61 ^b	373.95 ± 3.65 ^c	479,68 ± 17,18 ^d

Para realizar el análisis del diseño se escogió los datos del tiempo de 20 min debido a que fue el tiempo más próximo al punto de saturación, en el cual todas las muestras mantuvieron una estructura adecuada para realizar mediciones confiables.

En la Tabla 6 se muestra que tanto el modelo lineal y cuadrático tienen un valor – p significativo < 0.05 (Gutierrez y De la Vara, 2008), sin embargo, el modelo cuadrático tiene un R² predicho superior con 0.99 de ajuste, por lo cual se escogió este modelo debido a que un coeficiente de determinación mayor a 0.85 permite predecir una mejor respuesta (Montgomery, 2011).

En la Tabla 7 se muestra el análisis de varianza (ANOVA), se observa que el valor - p es significativo tanto para la mezcla lineal, como para las interacciones X₁X₂, X₂X₃ y X₂X₃. Según Gutiérrez y De la Vara (2008), esto sugiere que el modelo de segundo orden se ajusta cómodamente a los datos y permite interpretar la respuesta en la región experimental seleccionada, demostrando que la falta de ajuste del modelo no era importante. La variable de respuesta y las variables de investigación están relacionadas por la siguiente ecuación polinómica de segundo grado:

$$Y_1 = 170.61X_1 + 451.14X_2 - 980.31X_3 - 516.28X_1X_2 + 1544.81X_1X_3 + 2024.81X_2X_3$$

Tabla 6*Resumen de posibles modelos para el diseño experimental*

Modelo	Secuencial	R²	R²	
	Valor - p	Ajustado	Predicho	
Lineal	< 0.0001	0.8944	0.8684	
Cuadrático	< 0.0001	0.9991	0.9989	Sugerido
Cubico especial	0.2248	0.9992	0.9989	
Cubico	0.1484	0.9993	0.9978	

Tabla 7*Análisis de Varianza para el modelo cuadrático de la capacidad de absorción de agua.*

Fuente	Suma de cuadrados	G.l	Cuadrados medios	Valor F	Valor P	
Modelo	2.056E+05	5	41111.97	4624.94	< 0.0001	Significativo
Mezcla lineal	1.861E+05	2	93069.74	10469.99	< 0.0001	
X₁X₂	17148.60	1	17148.60	1929.15	< 0.0001	
X₂X₃	1648.20	1	1648.20	185.42	< 0.0001	
X₁X₃	2831.57	1	2831.57	318.54	< 0.0001	
Residual	133.34	15	8.89			
Falta de ajuste	69.25	6	11.54	1.62	0.2470	No significativo
Error puro	64.09	9	7.12			
Total	2.057E+05	20				

En la Figura 11 y 12 se muestra la variación de la CAA en función de la interacción de cáscara de café (CC), almidón y pectina, donde la coloración roja indica un incremento del porcentaje de CAA y, por el contrario, la coloración azul una disminución.

En un diseño de mezclas los componentes interactúan simultáneamente, sin embargo, podemos mantener constante uno de los componentes y evaluar como interactúan los otros dos, por este motivo para un mejor ejercicio de análisis los tratamientos se dividieron en 4 grupos G1, G2,

G3 y G4 según el porcentaje de pectina analizado 5, 10, 12.5 y 15% respectivamente (Figura 13).

Figura 11

Superficie de contornos para la absorción de agua en función de los componentes cáscara de café (X_1), almidón (X_2) y pectina (X_3).

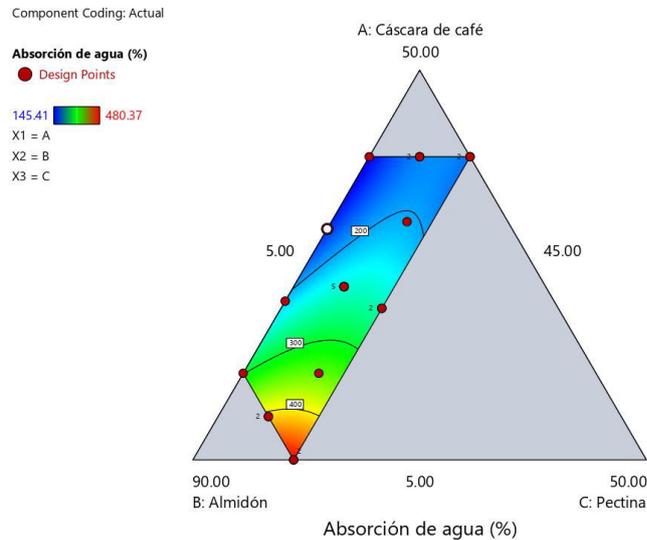


Figura 12

Superficie de respuesta para la absorción de agua en función de los componentes cáscara de café (X_1), almidón (X_2) y pectina (X_3)

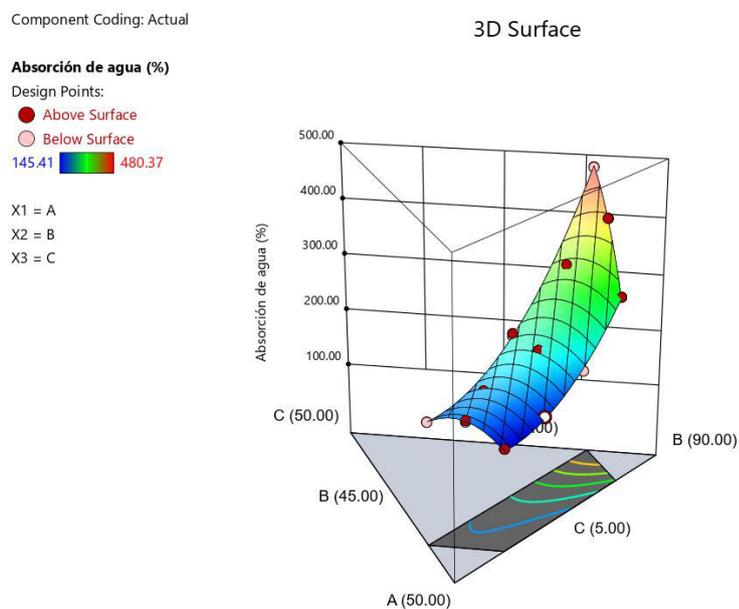
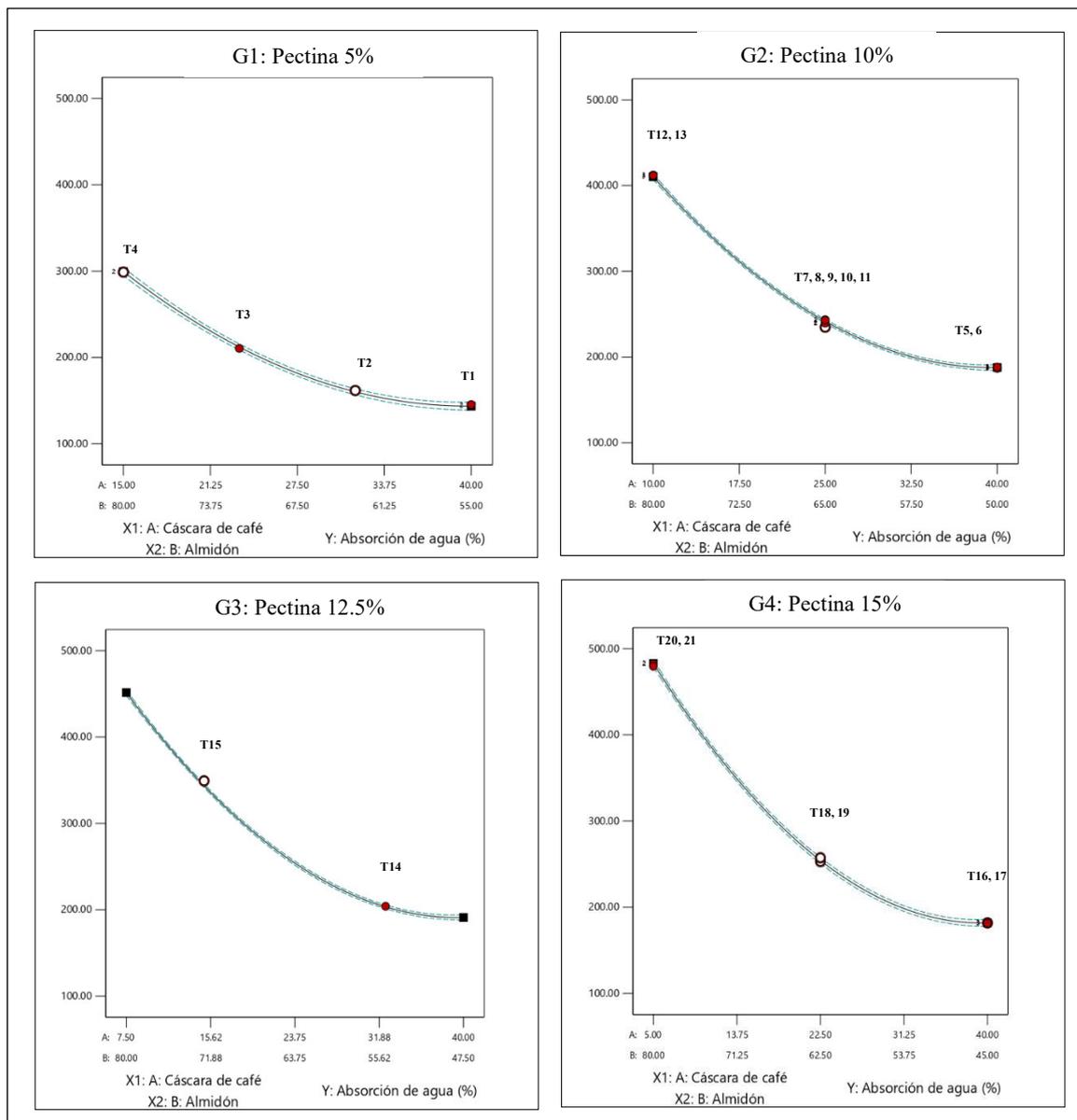


Figura 13

Efecto de la interacción de la cáscara de café (CC) y almidón sobre la absorción de agua cuando la pectina se mantiene constante en 5, 10, 12.5 y 15 %.



En el G1 se encuentra el valor de absorción más bajo del diseño experimental que fue 145,41% que corresponde al T1 (40% CC y 55 % de almidón), seguido de 161.72% que corresponde a T2 (31.67% CC y 63.33% almidón).

En el G2 se muestran los tratamientos T5 (40% CC y 50% almidón), los puntos centrales (25% CC y 65% de almidón) y T12 (10% CC y 80% de almidón), los resultados fueron 186.69, 234.80 y 412.38% respectivamente, se observa una disminución de la CAA a medida que aumenta el contenido de CC y se reduce el contenido de almidón. De igual forma en G4, el tratamiento T16 (40% CC y 35% almidón) tiene uno de los valores más bajos de absorción 181.16 % mientras que T20 (5% CC y 80% almidón) tuvo el valor más alto de absorción en el diseño con 480.37%.

Los tratamientos con 40% de CC (T1, T5 y T16) fueron los que mostraron una menor CAA 145.41, 186.69 y 181,94 %, la reducción de esta propiedad está relacionada con el contenido de compuestos lignocelulósicos que presenta la CC, en especial la lignina que presenta porciones cristalinas resistentes a la molécula de agua (Spada et al., 2020), además la incorporación de CC aumenta la densidad de la espuma y por lo tanto disminuye porosidad que está fuertemente relacionada con la CAA (Bergel et al.,2021).

Los tratamientos T12, T13, T20 Y T21 tuvieron los resultados de CAA más altos del diseño, superiores a 400%, debido a que el almidón fue el principal componente, representado el 80% de la mezcla. Existe una alta afinidad de este componente con el agua debido a sus numerosos grupos hidroxilo libres presentes en el monómero α -glucosa, que forman enlaces de hidrógeno con el agua disponible (Bergel et al., 2018). Además, almidón de papa tiene un alto contenido de amilopectina, que es la responsable de su capacidad para absorber agua (Aguilar y Tapia, 2023).

Todos los resultados fueron menores a los presentados por Cabanillas et al. (2019) quienes obtuvieron una CAA de 550% durante 20 min de inmersión al incorporar 20% de fibra de cascara de piña a espumas de almidón de yuca. Hoyos et al. (2021) incorporaron fibra del 2,5 a 5% a bandejas de almidón y sus valores de CAA (1 min) estuvieron entre 142.29 a 173.99%, estos fueron mayores que los presentados por T20.

Evaluando T1 y T14 donde el porcentaje de CC es mayor a 30%, se muestra como al elevar el porcentaje de pectina de 5% a 12.5 % hay un incremento de la absorción de agua de 145, 41 % a 204%. De igual forma en los tratamientos T4, T12 y T20 el almidón se mantiene constante en 80%, a medida que aumenta el porcentaje de pectina de 5 a 15% se observa un incremento en los resultados de absorción 298.86, 412.38 y 482.37 % respectivamente. La incorporación de pectina aparentemente incrementa la absorción de agua, sin embargo, no ejerce una influencia marcada en comparación con el almidón ya que representa solo del 5 a 15 % de la composición de la mezcla.

4.3.2. Resistencia a la flexión

En la Tabla 8 se muestran los valores de resistencia a la flexión, donde cada dato es el promedio de 4 repeticiones. En la Tabla 9 se muestran los posibles modelos para el diseño experimental, se eligió el modelo cuadrático debido a que tiene un valor $-p$ significativo <0.05 y un R^2 predicho superior a 0.97 de ajuste.

En la Tabla 10 se muestra el análisis de varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático seleccionado, se observa que el *valor - p* es significativo tanto para la mezcla lineal como para las interacciones X_1X_2 , X_2X_3 y X_1X_3 . La falta de ajuste del modelo fue no significativa ya que el valor p es superior a 0.05, según Gutiérrez y De la Vara (2008) esto indica que el modelo de segundo orden se ajusta de manera conveniente a los datos y permite explicar la respuesta en la región experimental elegida. La ecuación polinomial de segundo grado que relaciona la variable respuesta con las variables de estudio es la siguiente:

$$Y_2 = -0.395X_1 + 1.622X_2 - 26.347X_3 + 3,401_1X_2 + 30,137X_1X_3 + 31,053X_2X_3$$

Tabla 8

Valores experimentales para la variable respuesta: resistencia a la flexión.

Tratamiento	Componentes			Respuesta
	X ₁	X ₂	X ₃	Y ₂
	Cáscara de café (%)	Almidón (%)	Pectina (%)	Resistencia a la Flexión (MPa)
1	40.00	55.00	5.00	1,62 ± 0,24
2	31.67	63.33	5.00	1,75 ± 0,30
3	23.33	71.67	5.00	1,76 ± 0,21
4	15.00	80.00	5.00	1,81 ± 0,36
5	40.00	50.00	10.00	1,47 ± 0,23
6	40.00	50.00	10.00	1,46 ± 0,08
7	25.00	65.00	10.00	1,65 ± 0,31
8	25.00	65.00	10.00	1,62 ± 0,33
9	25.00	65.00	10.00	1,62 ± 0,19
10	25.00	65.00	10.00	1,63 ± 0,28
11	25.00	65.00	10.00	1,63 ± 0,40
12	10.00	80.00	10.00	1,69 ± 0,15
13	10.00	80.00	10.00	1,69 ± 0,22
14	32.50	55.00	12.50	1,46 ± 0,44
15	15.00	72.50	12.50	1,59 ± 0,10
16	40.00	45.00	15.00	1,12 ± 0,19
17	40.00	45.00	15.00	1,13 ± 0,11
18	22.50	62.50	15.00	1,39 ± 0,26
19	22.50	62.50	15.00	1,40 ± 0,21
20	5.00	80.00	15.00	1,46 ± 0,25
21	5.00	80.00	15.00	1,34 ± 0,17

Tabla 9*Resumen de posibles modelos para el diseño experimental*

Modelo	Secuencial	R²	R²	
	Valor - p	Ajustado	Predicho	
Lineal	< 0.0001	0.8677	0.8216	
Cuadrático	< 0.0001	0.9760	0.9552	Sugerido
Cubico especial	0.1548	0.9778	0.9517	
Cubico	0.7281	0.9748	0.8632	

Tabla 10*Análisis de Varianza para el modelo cuadrático de la resistencia a la flexión*

Fuente	Suma de cuadrados	G.l	Cuadrados medios	Valor F	Valor P	
Modelo	0.6986	5	0.1397	163.35	< 0.0001	Significativo
Mezcla lineal	0.6267	2	0.3133	366.35	< 0.0001	
X₁X₂	0.0305	1	0.0305	35.69	< 0.0001	
X₂X₃	0.0257	1	0.0257	30.07	< 0.0001	
X₃X₁	0.0273	1	0.0273	31.93	< 0.0001	
Residual	0.0128	15	0.0009			
Falta de ajuste	0.0051	6	0.0008	0.9877	0.4863	No significativo
Error puro	0.0077	9	0.0009			
Total	0.7114	20				

En la Figura 14 se muestra el área delimitada por las restricciones de los componentes A: Cáscara de café (X_1), B: Almidón (X_2) y C: Pectina (X_3) y en la Figura 15 se observa la superficie de respuesta que muestra como interactúa lo componentes en función de la resistencia a la flexión. La coloración roja indica incremento de la resistencia a la flexión y la coloración azul una disminución de su valor.

Para un mejor ejercicio de análisis los tratamientos se dividieron en 4 grupos G1, G2, G3 y G4 según el porcentaje de pectina analizado 5, 10, 12.5 y 15% respectivamente (Figura 16).

Figura 14

Superficie de contornos para la resistencia a la flexión en función de los componentes cáscara de café (X_1), almidón (X_2) y pectina (X_3).

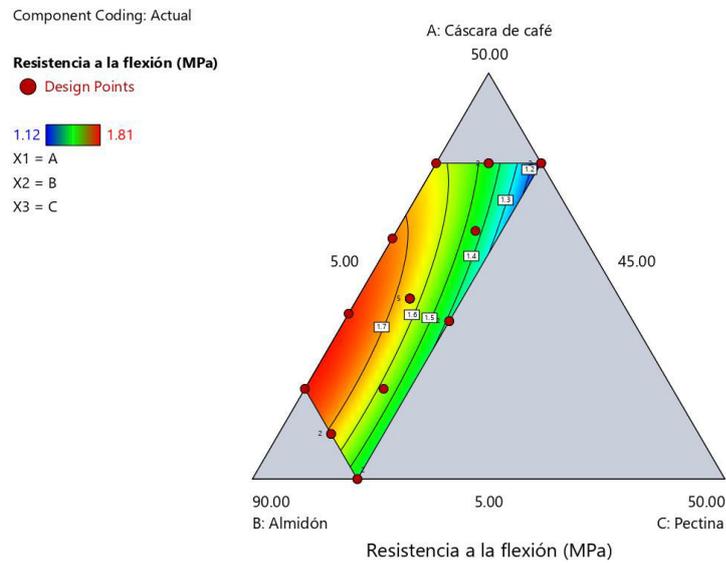


Figura 15

Superficie de respuesta para la resistencia a la flexión en función de los componentes cáscara de café (X_1), almidón (X_2) y pectina (X_3).

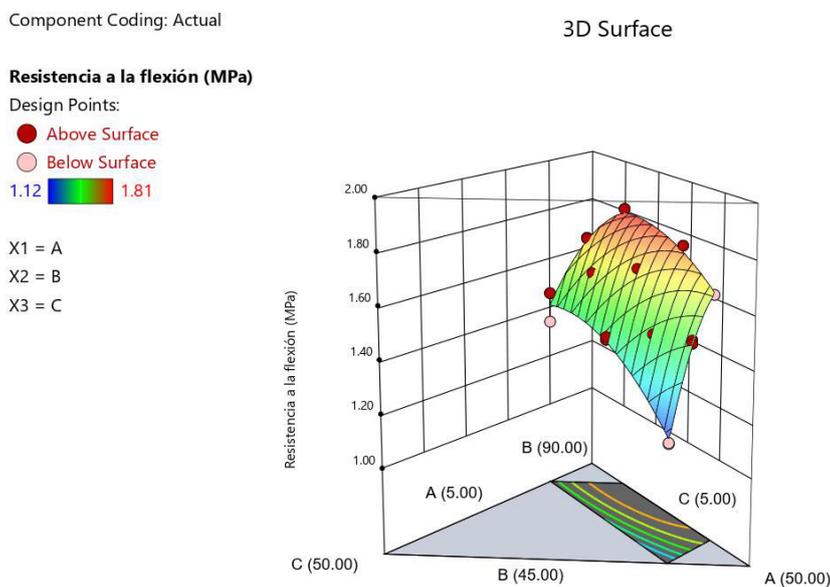
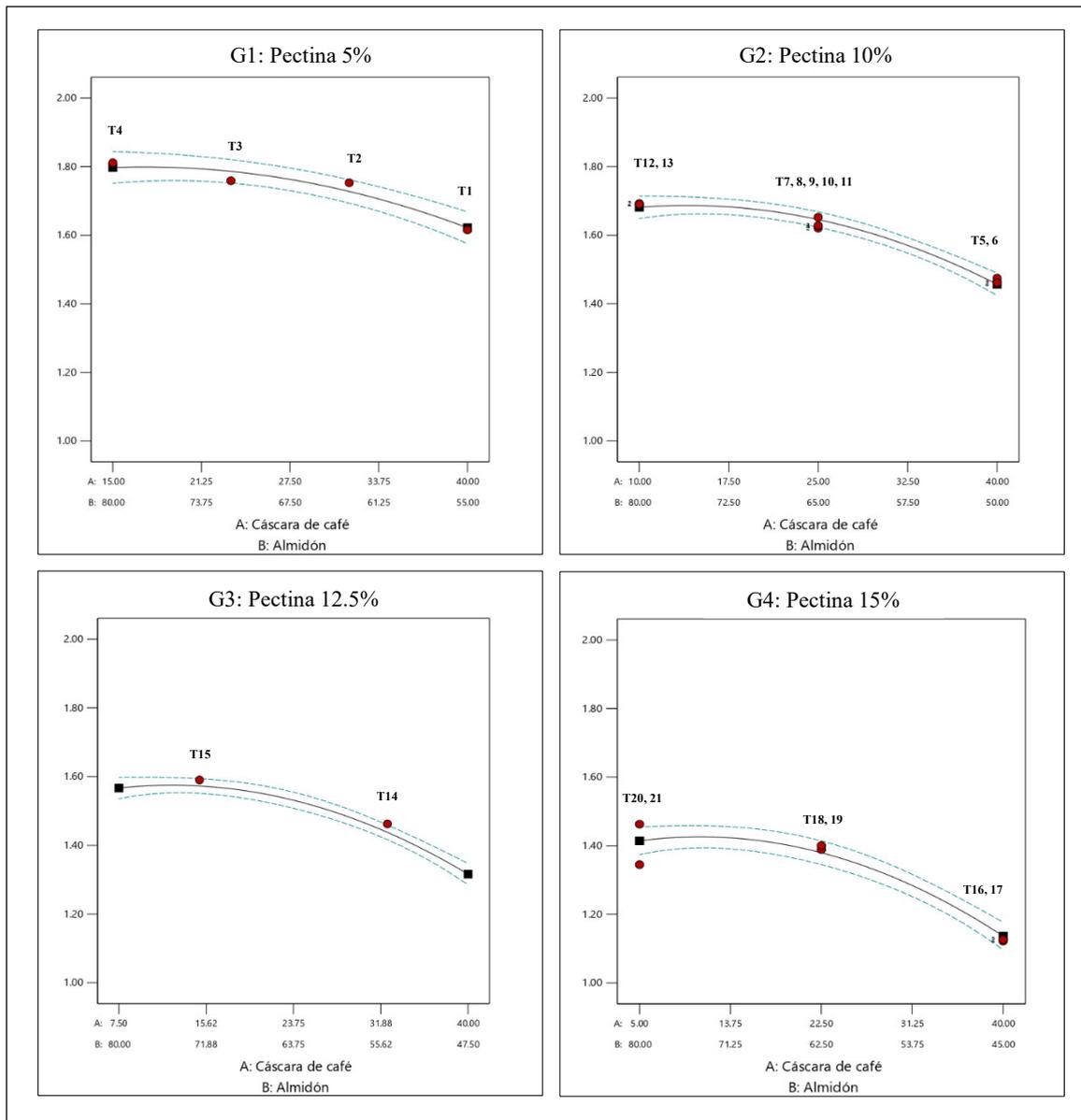


Figura 16

Efecto de la interacción de la cáscara de café y almidón sobre la resistencia a la flexión cuando la pectina se mantiene constante en 5, 10, 12.5 y 15 %.



El valor más alto de RF se observa en G1 con un valor con 1.803 MPa que corresponde a T4 (15% CC y 80% almidón), también se observa que a medida que se incrementa el porcentaje de fibra y disminuye el almidón la RF se reduce, esto también se muestra en G2, G3 y G4.

De igual forma el incremento del porcentaje de pectina influyo en la reducción de la RF, esto se ve representado en T16 (40% CC y 45% almidón), que fue el tratamiento con mayor porcentaje de CC y pectina, y tuvo la menor RF del diseño con un valor de 1.122 MPa, esta reducción de RF mejoro la flexibilidad de la bandeja, esto se condice con Zeng et al.(2023); Merino et al. (2023) y Mugwagwa y Chimphango (2022) quienes elaboraron biocompuestos incorporando pectina con la finalidad de mejorar las propiedades mecánicas.

Según Machado et al. (2019) la disminución de la RF y la homogeneidad de la matriz polimérica al añadir fibra esta se asociada con la presencia de lignina, sus resultados disminuyeron de 4.8 a 1.5 Mpa al incorporar piel de maní. Ferreira et al. (2020) incorporaron bagazo de cerveza (subproducto lignocelulósico) y sus valores de RF estuvieron entre 1.1 y 2.0MPa, un rango similar al obtenido en este diseño, además observaron que un incremento de la fibra por encima del 40% disminuye la RF, esto se debe a la presencia de fibra crea de vacíos en la estructura y debilita la interacción entre las cadenas de almidón produciendo una discontinuidad en la matriz polimérica (Chotiprayon et al., 2020; Cabanillas et al., 2019).

4.4. Optimización de las variables respuesta

Luego de obtener los resultados de las variables se determinó la formulación óptima en función de los criterios elegidos, se minimizó la RF y la CAA para obtener bandejas más flexibles y con menor afinidad por el agua. Para optimizar los procesos de respuesta múltiple se utiliza la función de deseabilidad, los valores pueden variar de 0 a 1, donde 0 indica una respuesta no deseada y 1 muestra respuestas óptimas a las condiciones estudiadas (Derringer et al., 1980 citado por Talens et al., 2022).

La formulación óptima generada por el programa estadístico Desing Expert fue 40% de cáscara de café (CC) , 45% de almidón y 15% de pectina con una deseabilidad de 0.934 y las respuestas estimadas de RF y CAA fueron 1.136 MPa y 181.854% respectivamente.

4.5. Verificación de la formulación óptima

Para realizar la verificación se elaboró nuevamente la bandeja utilizando los valores óptimos. Los resultados experimentales, que son la media de tres o más réplicas, se comparan con los resultados del modelo estimado en la Tabla 11. También se muestran los valores del grupo de control, que consisten en una concentración de pectina del 15% determinada mediante optimización y desarrollo sin cáscara de café. Los valores experimentales fueron similares a los estimados con error absoluto que varía entre 0.94 a 7.89, lo cual indica que los modelos son adecuados y pueden emplearse para predecir las respuestas de CAA a 20 min y RF.

Tabla 11

Resultados del modelo estimado, experimental de la bandeja óptima y el control

Fuente	Absorción de Agua - 20 min (%)	Resistencia a la flexión (Mpa)
Valor estimado	181.854	1.136
Valor experimental	183.25 ± 8.63 ^a	1.23 ± 0.05 ^a
Error absoluto	0.77	8.27
Control	369.49 ± 4.40 ^b	2.44 ± 0.2 ^b

4.5.1 Capacidad de absorción de agua

El valor experimental de la CAA (20 min) de la bandeja óptima fue de 183.25 %, comparado con el valor estimado tuvo un error de 0.77%, también se evaluó la CAA de la bandeja control, que tuvo un valor de 369.49 % este valor es significativamente mayor a la bandeja óptima. Este resultado concuerda con lo mencionado anteriormente, la cáscara de café contribuye a la reducción de la CAA.

Para conocer el punto de saturación del tratamiento óptimo se hizo una curva de CAA (Figura 17), en la Tabla 12 se muestran los tiempos utilizados y los valores de CAA para la bandeja óptima y control. A medida que aumenta el tiempo de inmersión se incrementa la CAA, se observa que para la bandeja óptima a los a partir de los 20 min no hay un aumento significativo

en la CAA, es decir ha alcanzado el punto de saturación. Según Kushwaha y Kumar (2010) la hemicelulosa es la principal responsable de la absorción de agua, seguido de la celulosa y lignina, el agua hincha la célula de la pared de la fibra hasta su saturación. Por el contrario, la bandeja control sigue incrementando su CAA. Además, a partir de los 5 min la bandeja control absorbe aproximadamente el doble de agua que la bandeja óptima. La cantidad de agua absorbida en los tiempos iniciales está relacionada con la porosidad de la espuma, pero el aumento en la cantidad de agua absorbida con el tiempo puede estar relacionado con la absorción por el propio almidón (Verzhelshe et al., 2012).

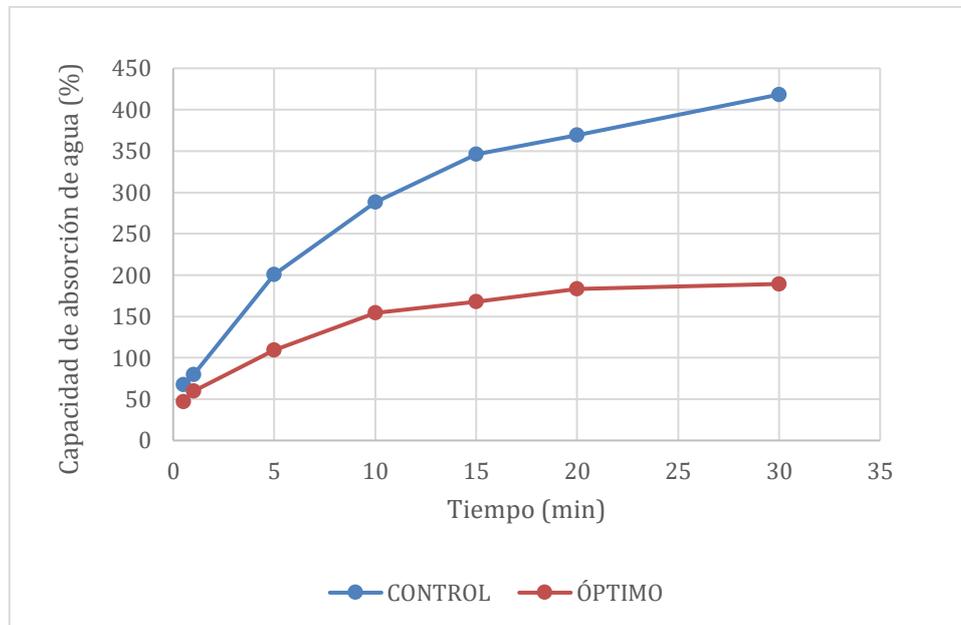
Tabla 12

Capacidad de absorción de agua de la bandeja óptima y control a diferentes tiempos de inmersión

	Tiempo						
	30 s	1 min	5 min	10 min	15 min	20 min	30 min
Óptimo	46.91 ± 1.76 ^a	59.74 ± 4.31 ^b	109.13 ±7.31 ^c	153.98 ± 9.36 ^d	167.90 ± 4.10 ^e	183.25 ± 8.63 ^f	189.27 ± 5.63 ^f
Control	67.44 ± 3.54 ^a	79.68 ± 3.05 ^b	200.87 ± 4.31 ^c	288.20 ± 8.07 ^d	345.99 ± 5.94 ^e	369.49 ± 4.40 ^f	418.33 ± 7.50 ^g

Figura 17

Curva de capacidad de absorción de agua para la bandeja óptima y control a diferentes tiempos de inmersión



4.5.2 Resistencia a la flexión

El resultado experimental de RF de la bandeja óptima fue de 1.23 MPa comparado con el resultado estimado tuvo un error de 8.27 %, el RF de la bandeja control es 2.44 MPa, significativamente mayor a la bandeja óptima. Según estos resultados la incorporación de fibra de cáscara de café se reduce la resistencia a la flexión.

Este resultado es similar a los obtenidos por Machado et al. (2017), que redujo la RF hasta 1,9 Mpa al incorporar fibra de torta de sésamo, con respecto a su control. Engel et al. (2019) también obtuvieron una reducción de 0.4 MPa en la RF al incorporar 16% fibra de tallos de uva a bandejas a base de almidón de yuca, similar a la obtenida en este estudio con 0.68 MPa. Esta disminución probablemente se deba a una reducción de los enlaces de hidrógeno entre las cadenas de los polímeros y un aumento del espacio molecular, debido a la incorporación de fibra.

4.6. Caracterización de bandejas biodegradables

4.6.1. Color

La bandeja óptima presento un color marrón oscuro y el control era de color amarillo claro (Figura 18). En la Tabla 13, se muestra que los parámetros de color L^* a^* b^* para ambas bandejas.

El parámetro L^* representa la luminosidad, la bandeja óptima tuvo una luminosidad menor (40.66) comparado con el control (84.93), esta disminución es característica de las bandejas formuladas con fibra como lo muestra en bandejas elaboradas con residuos de aguacate (Aguilar y Tapia, 2023), L^* disminuyo de 70.2 a 53.9, bandejas elaboradas con torta de ajonjolí (Carolina et al., 2017) L^* disminuyo de 79.0 a 59.0, bandejas con fibra de maíz (Aguirre et al., 2023) L^* disminuyo 78.86 a 66.92. Panzarini et al. (2020) tuvo una luminosidad similar con 47.6, sus bandejas tuvieron una luminosidad mayor a las obtenidas en este estudio, esto se debe a que el color de la fibra de cáscara de café es marrón y el porcentaje utilizado (40%). Cabanillas et al. (2019) menciona que cuando el material lignocelulósico se degrada a alta temperatura y presión, se liberan compuestos como furfural y glicolaldehído, que también pueden contribuir al pardeamiento. El parámetro a^* incremento levemente su valor con respecto al control de 2.32 a 3.35, esto representa una mayor coloración roja en la bandeja, por el contrario, el parámetro b^* tuvo una reducción de 18.48 a 5.02 esto representa una disminución de la coloración amarilla, este resultado difiere de otros estudios, pero se debe a que el control presentaba un color amarillo claro y la bandeja óptima un color marrón oscuro.

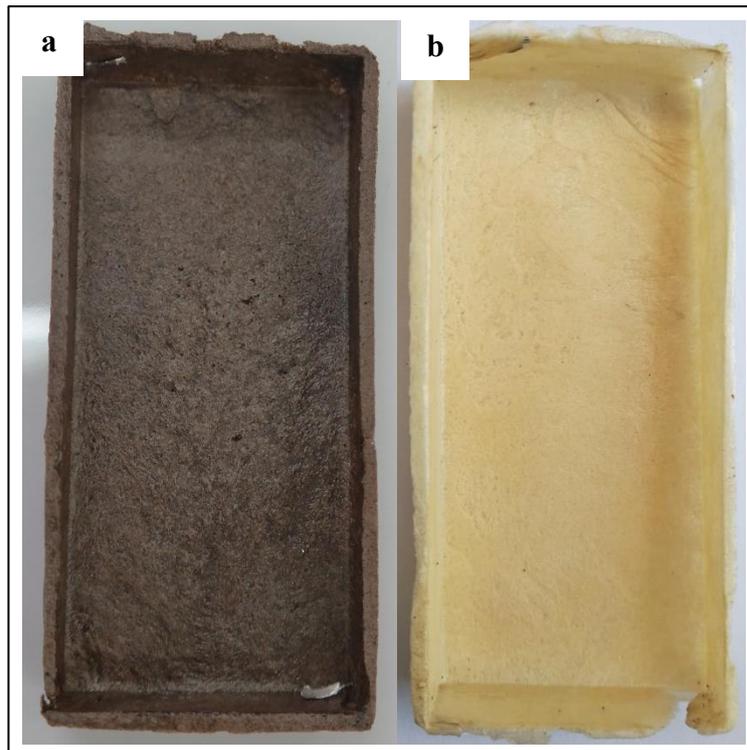
Tabla 13

Parámetros de color de la bandeja óptima y control

	L^*	a^*	b^*
Óptimo	40.66 ± 0.09^a	3.35 ± 0.16^a	5.02 ± 0.15^a
Control	84.93 ± 0.5^b	2.32 ± 0.19^b	18.48 ± 0.31^b

Figura 18

Apariencia visual de la bandeja óptima (a) y control (b).

**4.6.2. Espesor y densidad**

La bandeja óptima tuvo valores de espesor y densidad significativamente mayores que el tratamiento control (Tabla 14), resultados similares obtuvo Cruz Tirado et al. (2019) quienes elaboraron bandejas con 40% de fibra de rastrojo de esparrago con un espesor de 2.53 mm, el valor superior de la densidad en la bandeja óptima se debe a que la incorporación de fibra en la matriz polimérica interfiere con la capacidad de expansión del almidón durante el termoprensado. Los valores obtenidos de la bandeja óptima como control son superiores al EPS con 0.04 g/cm^3 , sin embargo, son similares a las bandejas elaboradas a base de 40 % de residuos de esparrago con 0.3 g/cm^3 (Cruz Tirado, 2019), fibras de algodón con 0.23 g/cm^3 (Bergel 2021), bagazo de malta con 0.45 g/cm^3 (Mello y Mali, 2014) por lo tanto sigue siendo un material de empaque liviano.

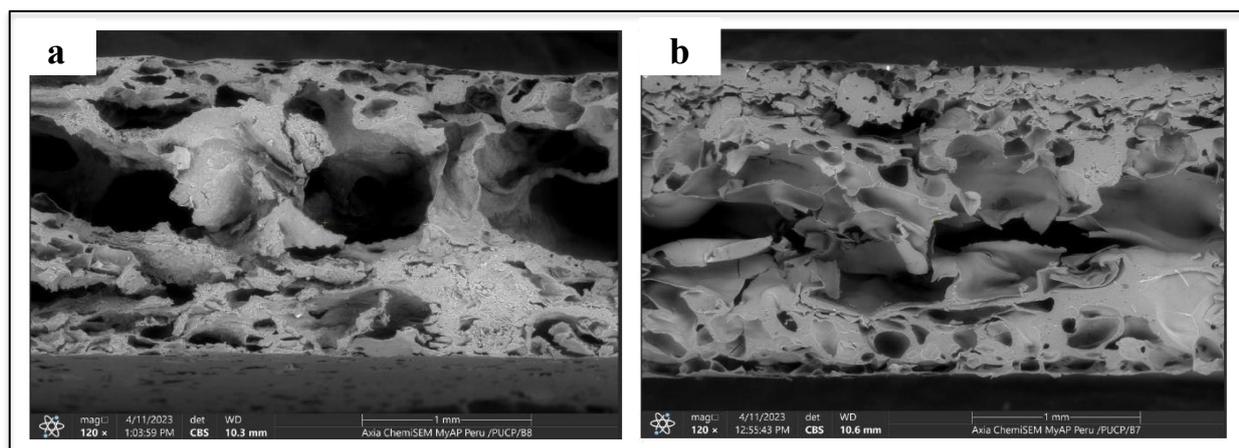
Tabla 14*Valores de espesor y densidad de la bandeja óptima y control*

	Espesor (mm)	Densidad (g/cm³)
Óptimo	2.12 ± 0.13 ^a	0.34 ± 0.02 ^a
Control	2.01 ± 0.10 ^b	0.29 ± 0.02 ^b

4.6.3. Morfología

En la Figura 19 se muestra la morfología de la sección transversal de la bandeja óptima y bandeja control. En ambas bandejas se observa que las paredes son más densas y la zona central presenta agujeros más grandes, esta estructura tipo sándwich es característica de las espumas hechas a base de almidón (Aguilar y Delia, 2023; Engel et al., 2019; Bergel et al., 2021).

En la bandeja óptima la presencia de cáscara de café causó una expansión en la parte central que formo cavidades grandes, estas se forman cuando el agua contenida en la mezcla ebulliciona y forma burbujas que dejan una estructura abierta (Engel et al., 2019), por el contrario, la masa cerca al molde caliente se seca rápidamente impidiendo la expansión e incrementando la densidad en esa área (Soykeabkaew y Suwantong, 2015). El control a diferencia del óptimo tuvo una mejor expansión y presento una estructura más homogénea y mejor distribuida.

Figura 19*Morfología de la sección transversal de la bandeja óptima (a) y control (b).*

De forma similar las bandejas con residuo de ajonjolí de Machado et al. (2017) presentaron cavidades más grandes y una estructura más abierta en comparación con el tratamiento control que presento burbujas pequeñas y bien distribuidas, el control al estar compuesto solo de almidón se expande de forma más homogénea. Según Cabanillas et al. (2019) proporciones de fibra superiores al 10% generan bandejas con celdas de aire de mayor tamaño y distribución irregular en comparación con el control.

4.6.4. Grado de desintegración

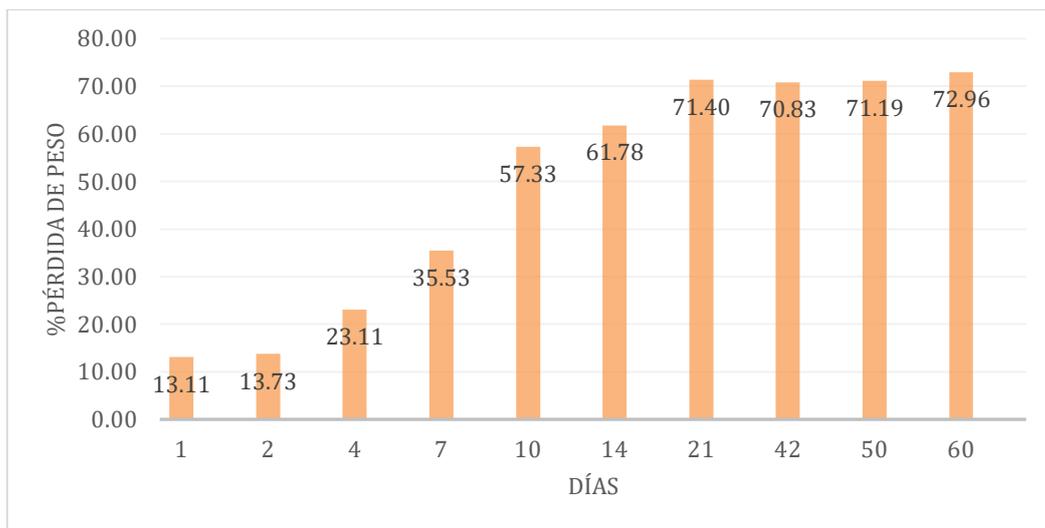
El grado de desintegración de la bandeja óptima fue de 74.65%, para validar la prueba se realizó el cálculo de sólidos volátiles, el resultado fue 54.96% superior a 30% que es lo que indica la norma ISO 20200:2004, por lo cual el resultado es confiable. Paralelamente realizó una prueba de pérdida peso con la finalidad de ver el comportamiento de la desintegración, en . En la Figura 20 se muestra que para el día 10 la muestra había perdido más de la mitad de su peso 57.33 % y a partir del día 21 la pérdida de peso fue mayor al 70% y en la Figura 21 la muestra retirada del reactor a los 60 días. Estos resultados son similares a los de Fan et al. (2023) que a los 5 días tuvo una pérdida de peso de 32.6% y a los 45 días alcanzó el 71.5%.

Las bandejas a base de almidón con residuos realizados por Engel et al. (2019), Aguilar y Tapia (2023), Machado et al. (2020) fueron sometidos a un sistema de compostaje similar, observaron una degradación en el suelo a los 49, 30 y 49 días respectivamente.

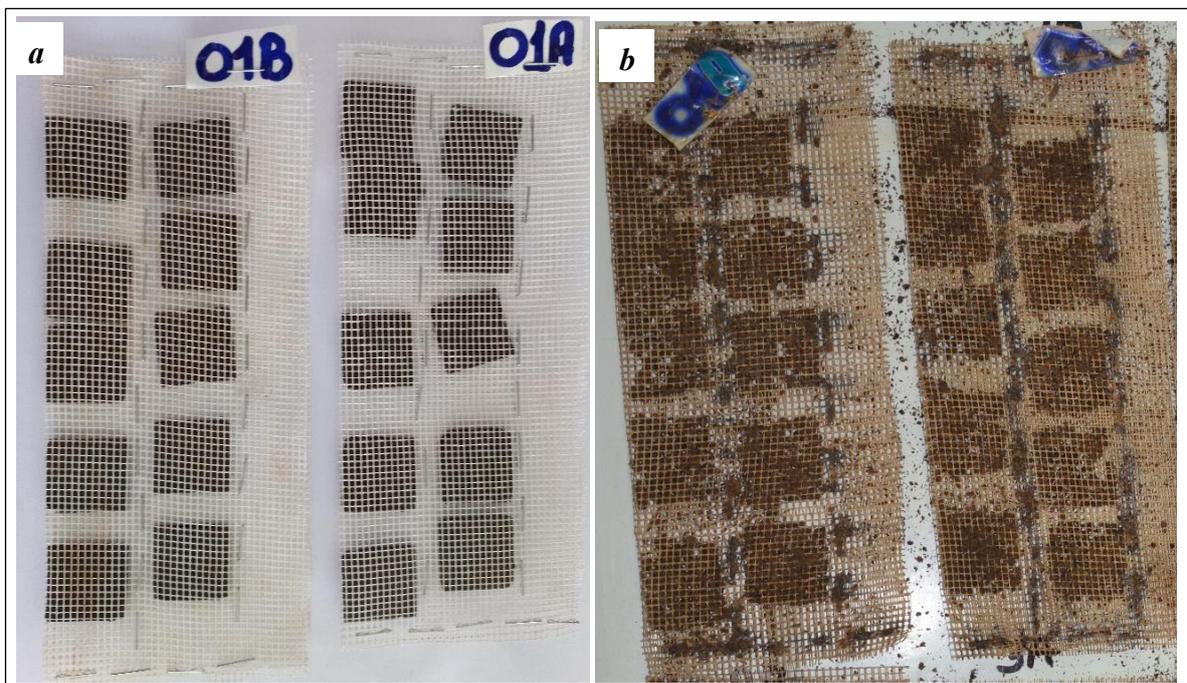
La desintegración de la bandeja se debe al proceso natural de compostaje en que el material orgánico se descompone por acción de enzimas sintetizadas por hongos y bacterias. La descomposición de la fibra requiere que diferentes enzimas, como las celulasas (descomposición de la celulosa), lacasas (enzimas que oxidan una gran variedad de sustratos orgánicos), peroxidasas (descomposición de la lignina) y amilasas (descomposición del almidón) son algunas de las enzimas involucradas en la degradación del material vegetal (Polman et al., 2021; Luzi et al., 2015).

Figura 20

Pérdida de peso de la bandeja óptima en el transcurso de los 60 días de compostaje.

**Figura 21**

Muestras de bandeja óptima antes de ser introducidas en el reactor (a) y después de 60 días de compostaje (b)



V. CONCLUSIÓN

- El incremento de la cáscara de café y pectina en el prototipo de bandeja reduce significativamente la capacidad de absorción de agua y resistencia a la flexión.
- La formulación óptima para la elaboración de la bandeja está compuesta por 40% de cáscara de café, 15% de pectina y 45% de almidón.
- Los valores experimentales de la capacidad de absorción de agua y resistencia a la flexión de la bandeja óptima son similares a los valores estimados por el modelo y significativamente menores a los del control.
- La bandeja óptima alcanza un punto de saturación a los 20 min, a partir del cual ya no hay aumento significativo en la capacidad de absorción de agua.
- El uso de un alto porcentaje de cáscara de café en la bandeja óptima otorga una coloración oscura que disminuye los parámetros de luminosidad y cromaticidad b*.
- La cáscara de café limita la capacidad de expansión del almidón, incrementa el valor la densidad en la bandeja óptima con respecto al control.
- La bandeja óptima es un material con un grado de desintegración superior al 70% bajo un sistema de compostaje.
- La bandeja óptima es un material compostable que alcanza un grado de desintegración superior al 70% a partir de los 21 días.

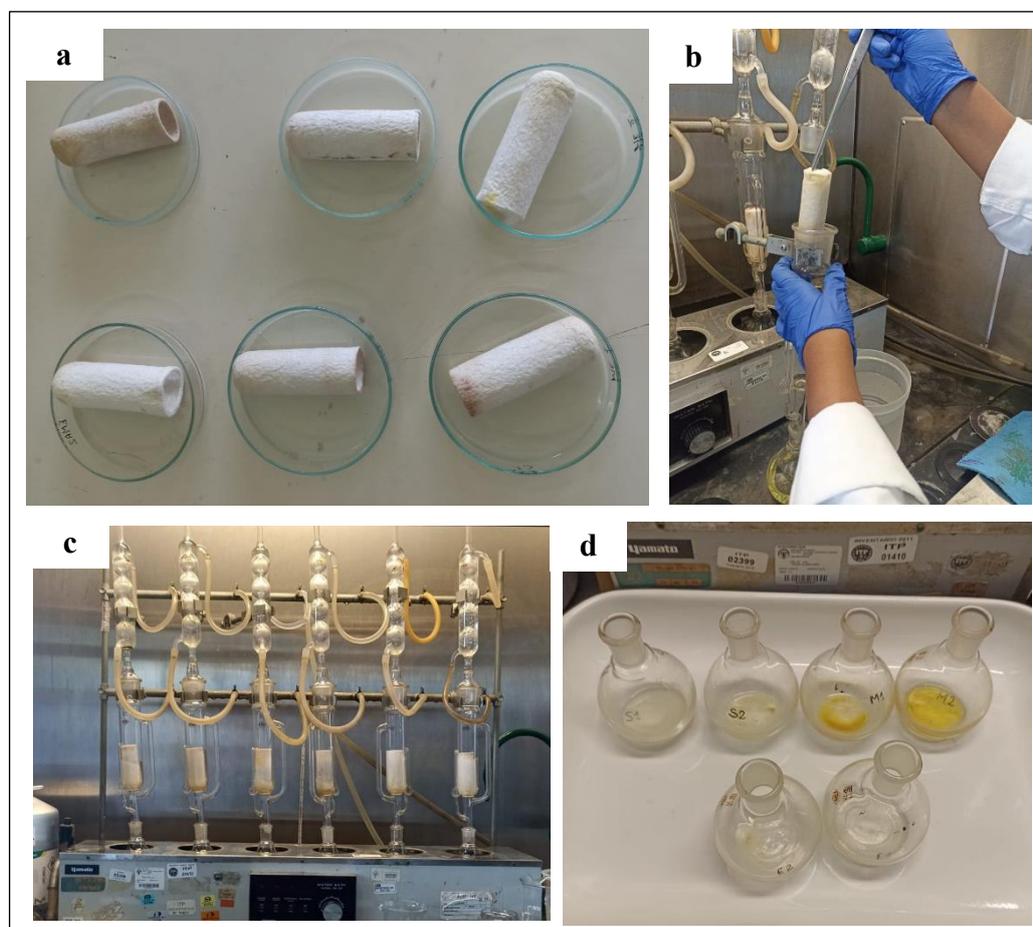
VI. ANEXOS

Anexo 1. Determinación de composición química proximal y lignocelulósica.

Determinación de humedad.



Determinación de grasa: (a) Cartuchos con la muestra adentro. (b) introducción del cartucho en el equipo Soxhlet. (c) Extracción de grasa en el equipo Soxhlet. (d) Balones con la grasa extraída.



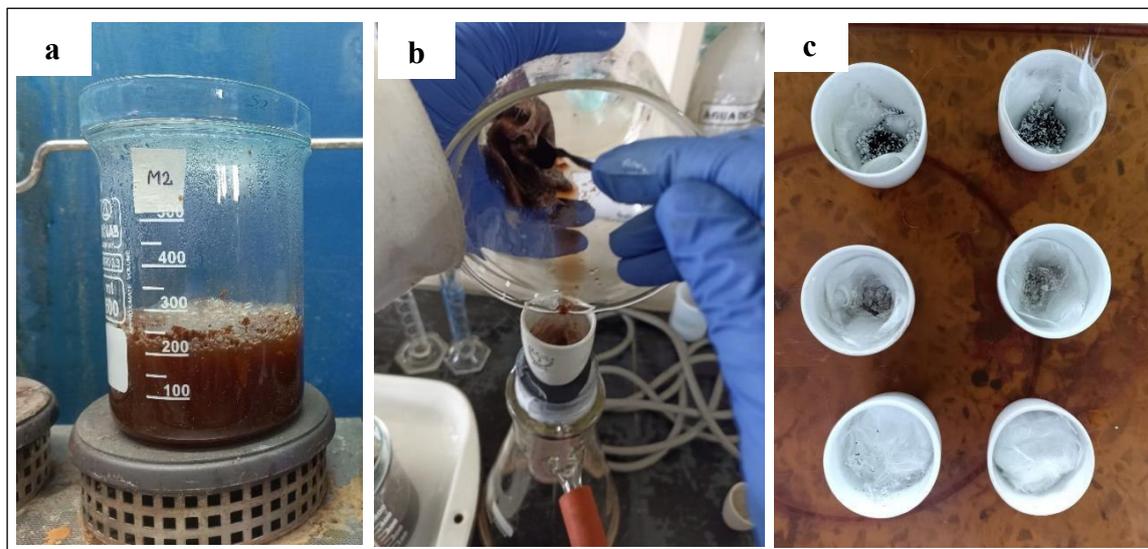
Determinación de Proteína: (a) Digestión de la muestra al inicio. (b) Digestión de la muestra al final. (c) Fiolas de 100 mL enrasadas. (d) Destilación de la proteína. (e) Titulación con indicador Tashiro. (f) Viraje del contenido.



Determinación de cenizas



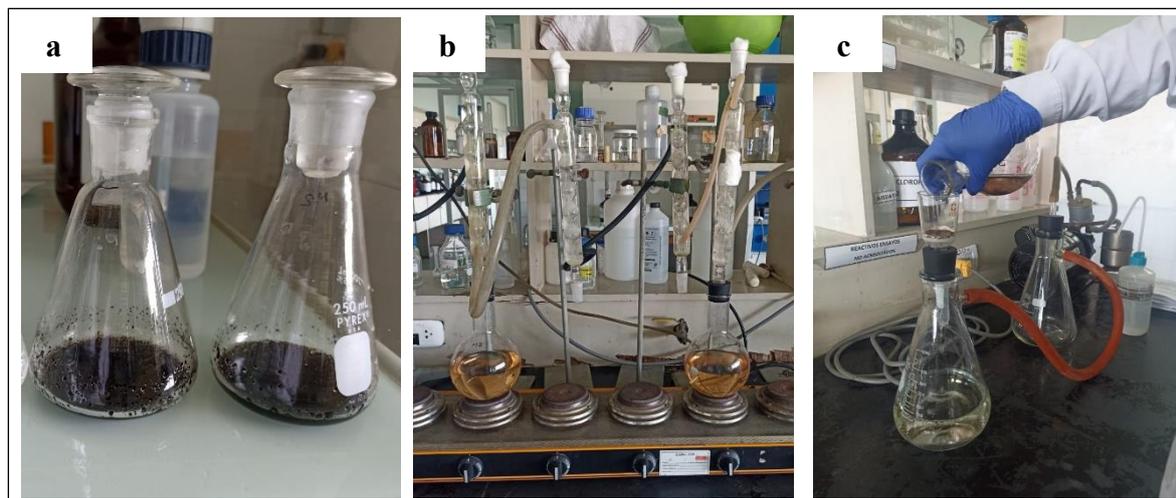
Determinación de Fibra: (a) Digestión de la Fibra con NaOH y H₂SO₄. (b) Filtración. (c) Muestra final después de llevarlo a la mufla.



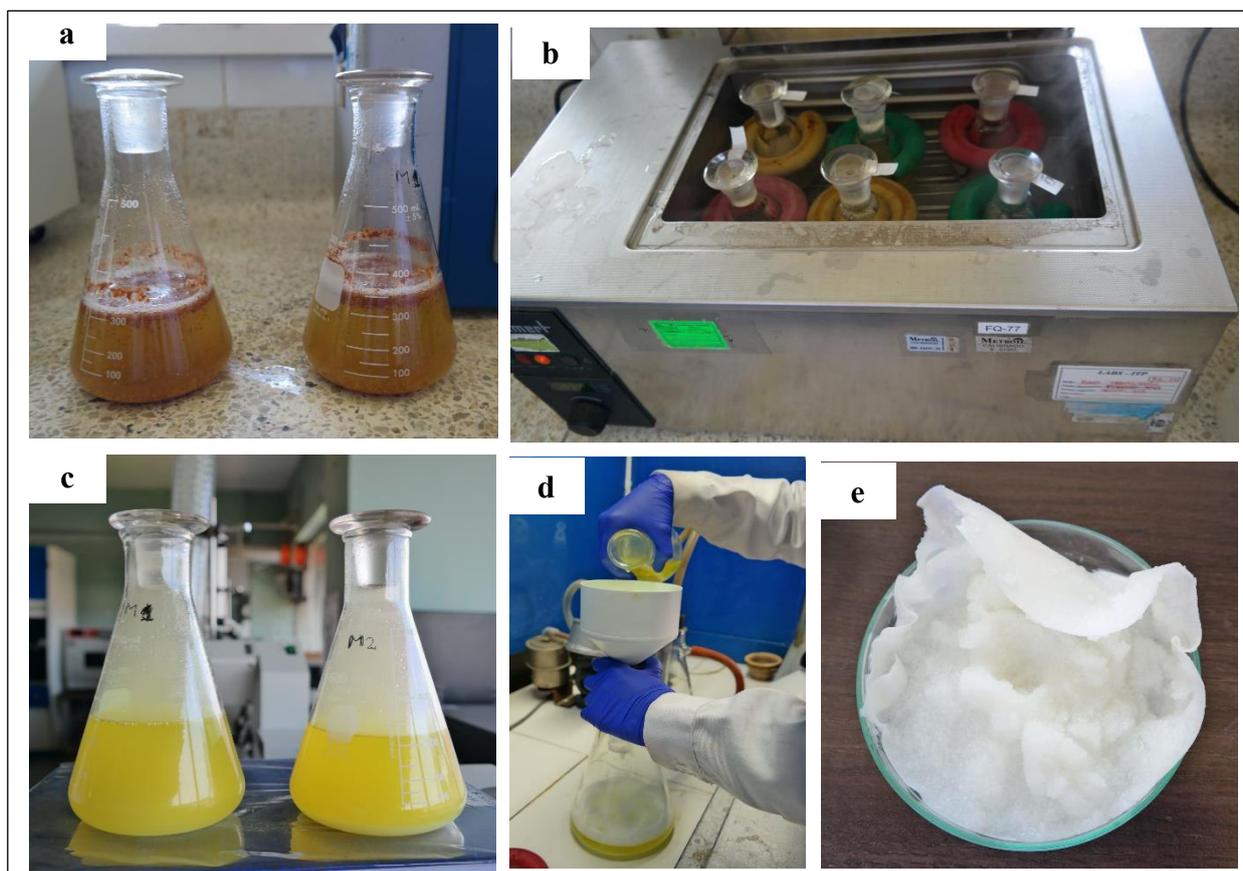
Determinación de Extractos: Muestras en el equipo Soxhlet realizando extracciones con agua y alcohol



Determinación de Lignina: (a) Muestra reposando en una solución de H_2SO_4 . (b) Ebullición con reflujo. (c) Filtración de la muestra.



Determinación de Holocelulosa: (a) Muestra sumergida en solución de ácido acético y clorito de sodio. (b) Matraces en baño de agua a 80°C . (c) Extracción finalizada. (d) Filtrado de Holocelulosa. (e) Holocelulosa.



Determinación de Celulosa: (a) Muestra de holocelulosa. (b) Muestra con aditivos para determinar la celulosa. (c) Residuo del ensayo.



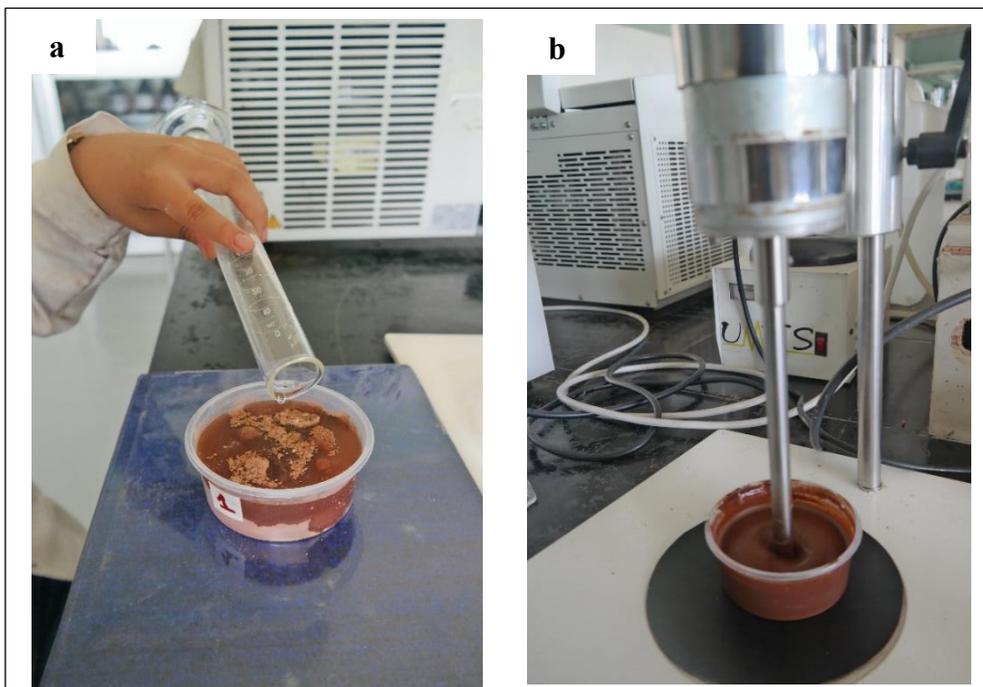
Anexo 2. Acondicionamiento de la cáscara de café y fabricación de bandejas.

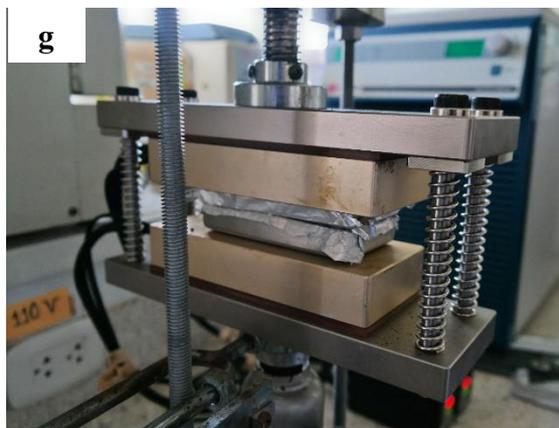
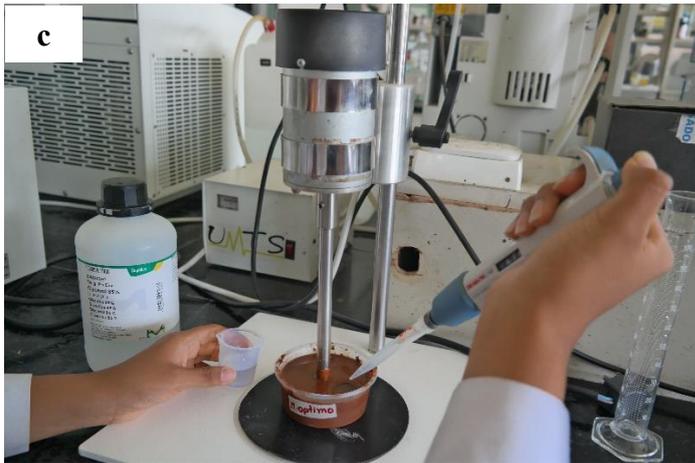
Acondicionamiento de la cáscara de café (fibra): (a) Recepción de la cáscara de café. (b) Secado de la cáscara después del lavado y desinfección. (c) Molienda en martillo de Molino. (d) Molienda en molino ultracentrífugo.



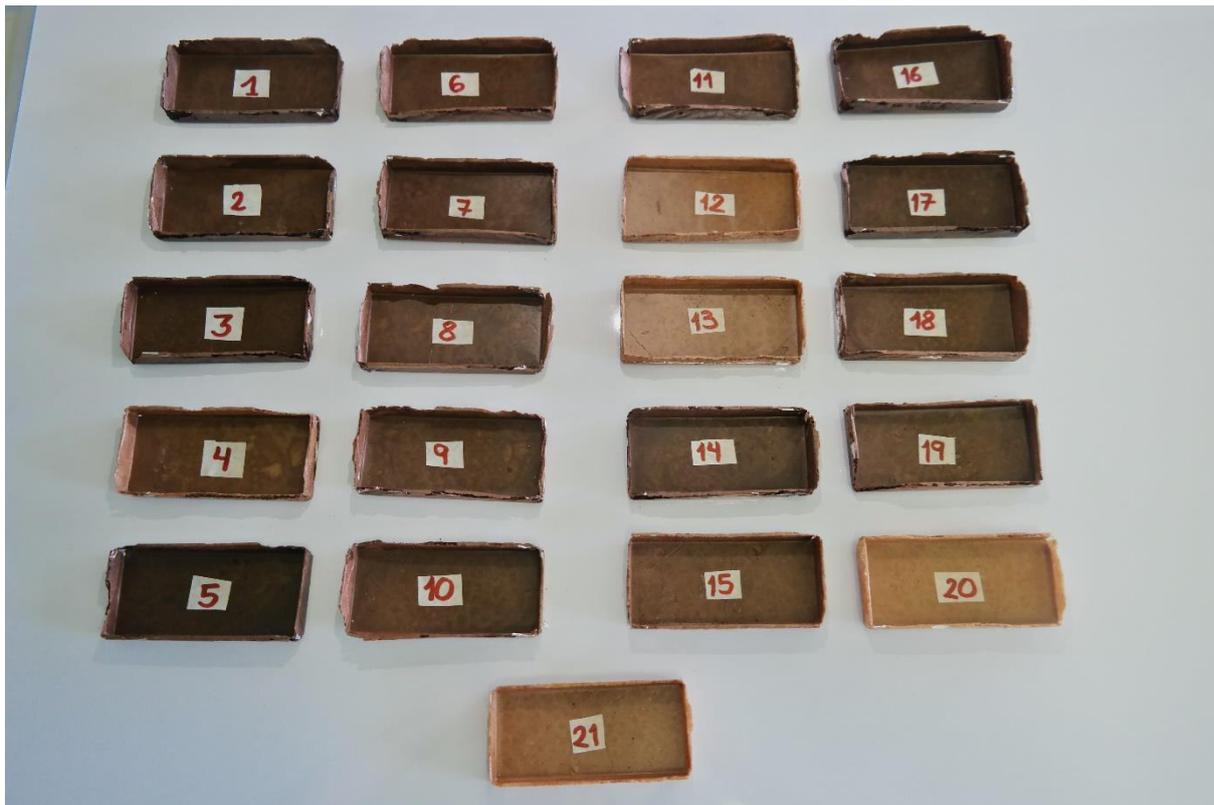


Fabricación de bandeja: (a) Mezcla de componentes y agua. (b) Primer mezclado con aditivos. (c) Incorporación del glicerol. (d) Ajuste de consistencia. (e) Pesado de la mezcla en el molde. (f) Termoprensado. (g) Molde durante el termoprensado. (f) Almacenamiento de bandejas.



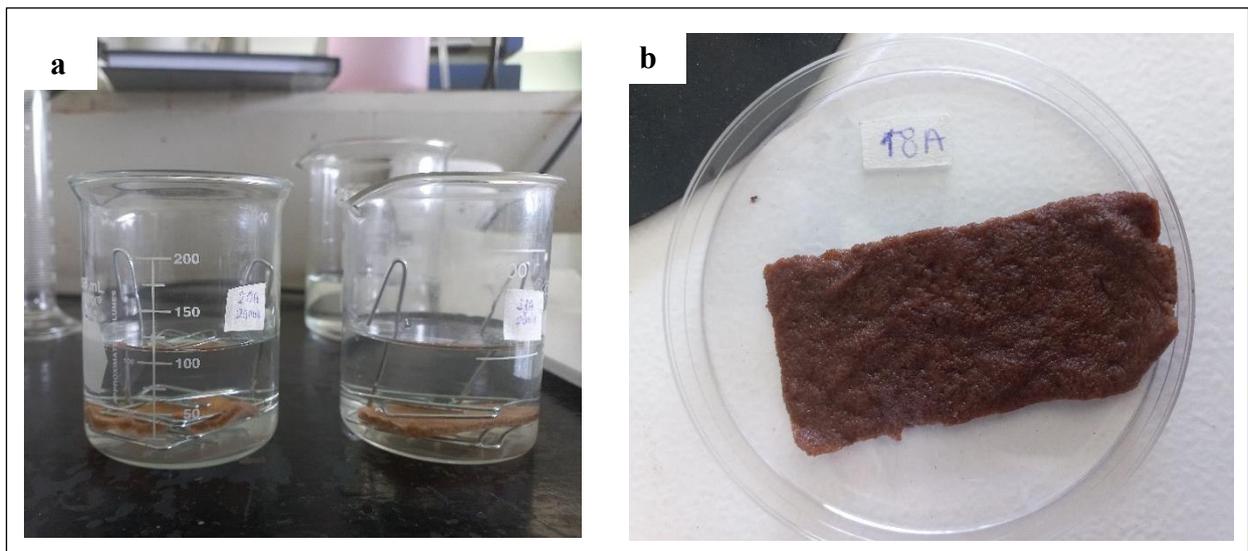


Bandejas para los 21 tratamientos

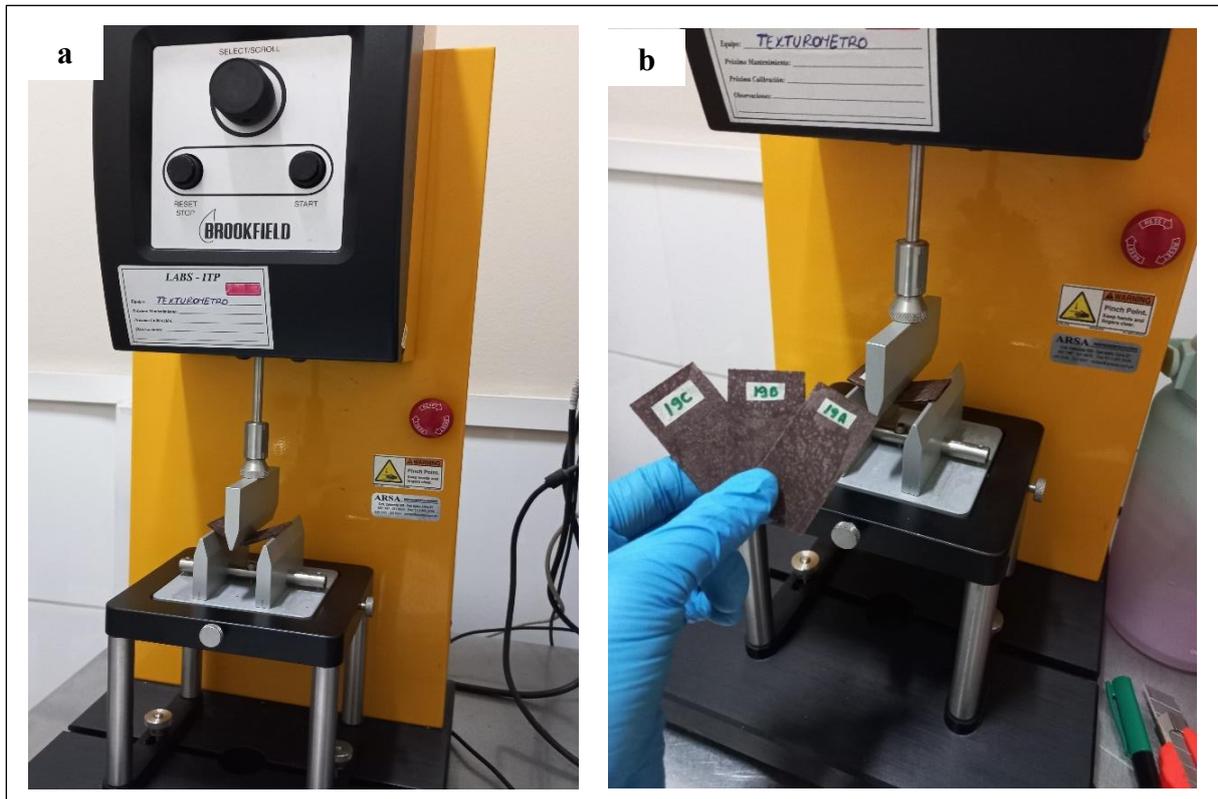


Anexo 3. Ensayos físicos y mecánicos realizados a la bandeja.

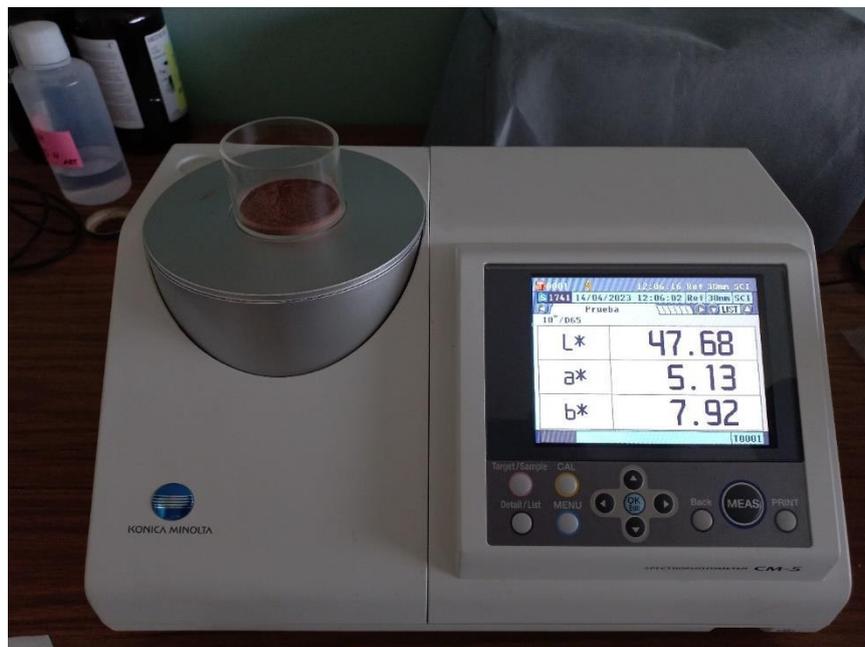
Absorción de agua: (a) Muestra sumergida en 100 mL de agua. (b) Muestra luego de retirarse del agua.



Resistencia a la flexión: (a) Ensayo de resistencia a la flexión. (b) Muestras cortadas en $2.5 \times 5 \text{ cm}^2$.



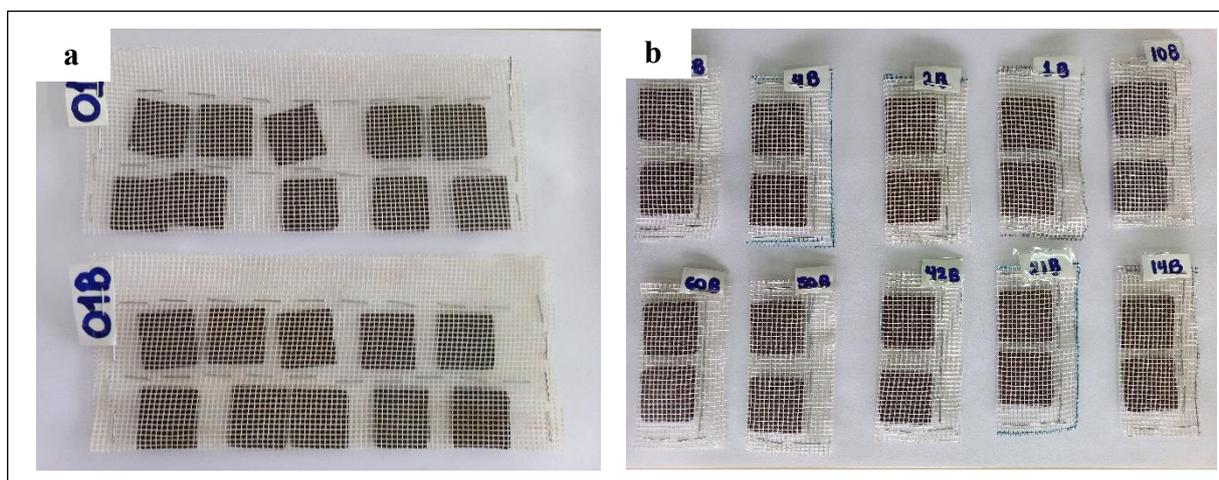
Determinación de parámetros de color

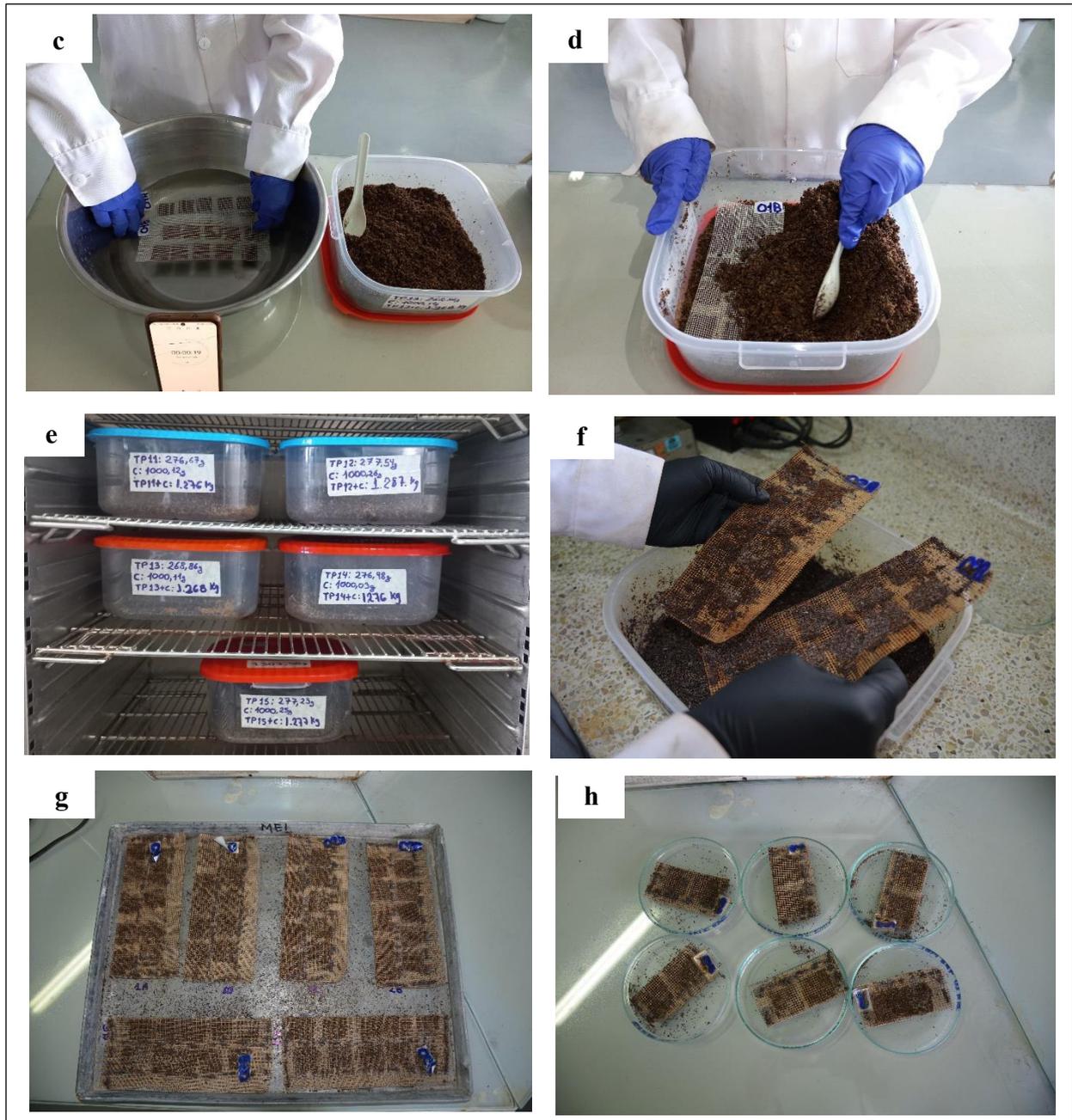


Determinación de espesor y densidad: Muestras cortadas en cuadrados de 2.5 cm de lado, Vernier y micrómetro.

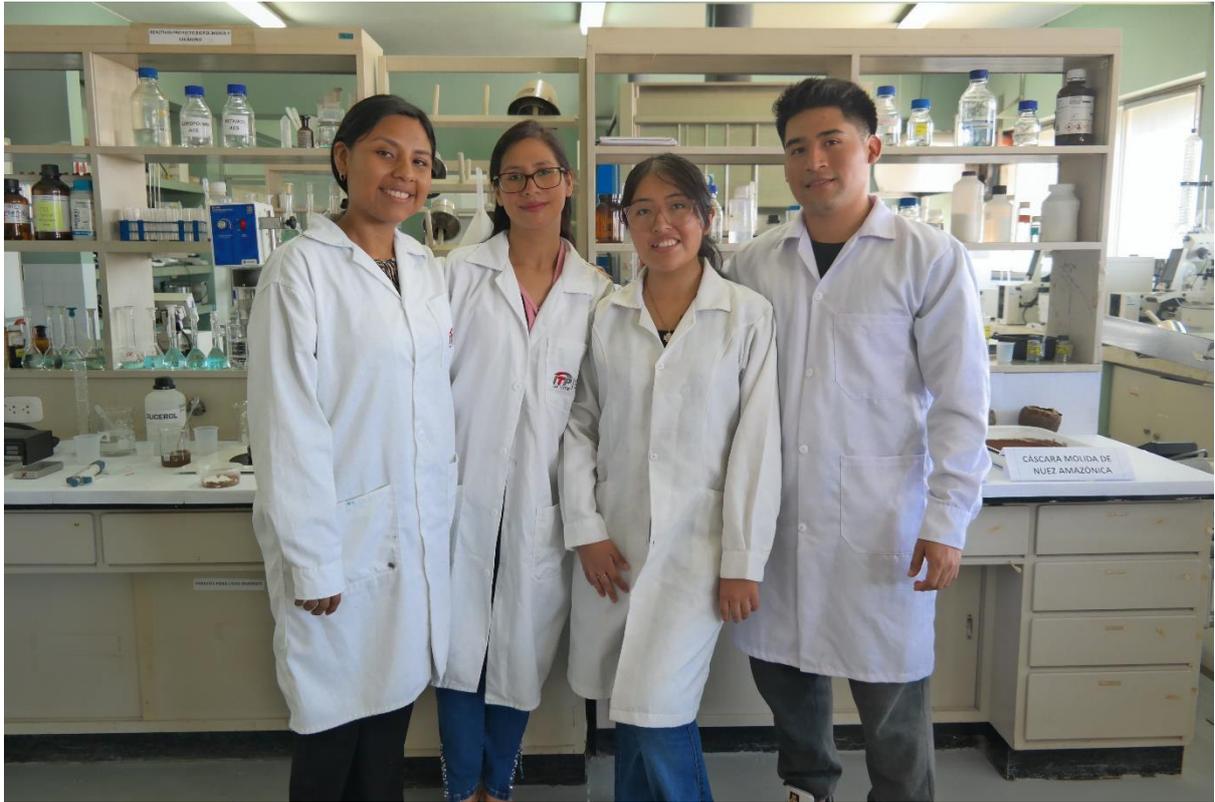


Grado de desintegración: (a) Muestras para el ensayo de grado desintegración. (b) muestras para realizar el monitreo de pérdida de peso durante el compostaje. (c) Muestras sumergidas en agua antes de colocar en el reactor. (d) Colocación de muestras en el reactor. (e) Reactores en la estufa a 58°C. (f) Desenterramiento de las muestras a los 60 días. (g) Muestras del grado de desintegración al finalizar los 60 días de compostaje. (h) Muestras del día 60 para el control de peso.









VII. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) (1999). Papel e cartão - Determinação da capacidade de absorção de água - Método de Cobb. NBR NM-ISO 535. <https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/11177/nbrnm-iso535-papel-e-cartao-determinacao-da-capacidade-de-absorcao-de-agua-metodo-de-cobb>
- Ai, Y., & Jane, J. (2018). Understanding Starch Structure and Functionality. *Starch in Food*, 151–178. doi:10.1016/b978-0-08-100868-3.00003-2
- Aguilar, G. J., & Tapia-Blácido, D. R. (2023). Evaluating how avocado residue addition affects the properties of cassava starch-based foam trays. *International Journal of Biological Macromolecules*, 240, 124348. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124348
- Aguirre, E., Domínguez, J., Villanueva, E., Ponce-Ramirez, J. A., de Fátima Arevalo-Oliva, M., Siche, R., ... & Rodríguez, G. (2023). Biodegradable trays based on Manihot esculenta Crantz starch and Zea mays husk flour. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101129. doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101129
- Andrade, A. P. (2009). *Análise química e avaliação do potencial alelopático da casca do café (Coffea arábica)*, [Tese de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia]. <http://www.sbicafe.ufv.br:80/handle/123456789/5843>
- Aranda, J. y Bocanegra G. (2018). *Evaluación de parámetros durante la extrusión de una mezcla de harinas de tarwi (lupinus mutabilis) y arroz (oryza sativa) para la producción de un snack*. [Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero Agroindustrial, Universidad Nacional del Santa]. <https://repositorio.uns.edu.pe/handle/20.500.14278/3052>
- Arya, S. S., Venkatram, R., More, P. R., & Vijayan, P. (2022). The wastes of coffee bean processing for utilization in food: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 1-16.. doi.org/10.1007/s13197-021-05032-5

- Badui Dergal, S. (2006). *Química de los alimentos*. México, Pearson Educación.
- Basiri, S., Tajbakhsh, S., & Shekarforoush, S. S. (2022). Fortification of stirred yoghurt with mucilage-free flaxseed and its physicochemical, microbial, textural and sensory properties. *International Dairy Journal*, *131*, 105384. doi.org/10.1016/j.idairyj.2022.105384
- Belitz, H. -D., Grosch, W. y Schieberle, P. (1997). *Química de los alimentos (2ª ed.)*. Heidelberg: Springer.
- Bergel, B. F., Osorio, S. D., da Luz, L. M., & Santana, R. M. C. (2018). Effects of hydrophobized starches on thermoplastic starch foams made from potato starch. *Carbohydrate polymers*, *200*, 106-114. doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.07.047
- Bergel, BF, Araujo, LL y Santana, RMC (2021). Efectos de la adición de fibras de algodón y microfibras de algodón sobre la estructura y propiedades mecánicas de espumas de almidón elaboradas a partir de fécula de patata. *Tecnologías y aplicaciones de polímeros de carbohidratos* , *2* , 100167. doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100167.
- Berthet, M. A., Angellier-Coussy, H., Guillard, V., & Gontard, N. (2016). Vegetal fiber-based biocomposites: Which stakes for food packaging applications?. *Journal of Applied Polymer Science*, *133*(2). doi:10.1002/app.42528
- Bertoft, E. Comprensión de la estructura del almidón: avances recientes. *Agronomía* **2017** , *7* , 56. https://doi.org/10.3390/agronomy7030056
- Bharath, K. & Basavarajappa, S. (2016). Applications of biocomposite materials based on natural fibers from renewable resources: a review. *Science and Engineering of Composite Materials*, *23*(2), 123-133. doi:10.1515/secm-2014-0088

- Biliaderis, C. (1991). Non-equilibrium phase transitions of aqueous starch systems. *Water Relationships in Foods: Advances in the 1980s and Trends for the 1990s*, 251-273. doi.org/10.1007/978-1-4899-0664-9_14
- Bonilla, V. A., Duarte, W. F., & Schwan, R. F. (2014). Utilization of coffee by-products obtained from semi-washed process for production of value-added compounds. *Bioresource technology*, 166, 142-150. doi.org/10.1016/j.biortech.2014.05.031
- Briassoulis, D., Dejean, C., & Picuno, P. (2010). Critical review of norms and standards for biodegradable agricultural plastics part II: Composting. *Journal of Polymers and the Environment*, 18, 364-383. doi:10.1007/s10924-010-0222-z
- Cabanillas, A., Nunez, J., Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Blácido, D. R., Arteaga, H., & Siche, R. (2019). Pineapple shell fiber as reinforcement in cassava starch foam trays. *Polymers and Polymer Composites*, 27(8), 496-506. doi.org/10.1177/0967391119848187
- Carmen, M. T., Lorena, Z. C., Alexander, V. A., Amandio, V., & Raúl, S. (2020). Coffee pulp: An industrial by-product with uses in agriculture, nutrition and biotechnology. *Reviews in Agricultural Science*, 8, 323-342. doi.org/10.7831/ras.8.0_323
- Chandramohan, D., & Marimuthu, K. (2011). A review on natural fibers. *International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences*, 8(2), 194-206. http://www.arpapress.com/Volumes/Vol8Issue2/IJRRAS_8_2_09.pdf
- Chotiprayon, P., Chaisawad, B., & Yoksan, R. (2020). Thermoplastic cassava starch/poly (lactic acid) blend reinforced with coir fibres. *International journal of biological macromolecules*, 156, 960-968. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.121
- Collazo-Bigliardi, S., Ortega-Toro, R., & Chiralt, A. (2019). Improving properties of thermoplastic starch films by incorporating active extracts and cellulose fibres isolated

from rice or coffee husk. *Food Packaging and Shelf Life*, 22, 100383. doi: 10.1016/j.fpsl.2019.100383

Cruz-Tirado, J. P., Siche, R., Cabanillas, A., Díaz-Sánchez, L., Vejarano, R., & Tapia-Blácido, D. R. (2017). Properties of baked foams from oca (*Oxalis tuberosa*) starch reinforced with sugarcane bagasse and asparagus peel fiber. *Procedia engineering*, 200, 178-185. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.026

Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Blácido, D. R., Angelats-Silva, L. M., & Siche, R. (2019). The addition of sugarcane bagasse and asparagus peel enhances the properties of sweet potato starch foams. *Packaging Technology and Science*, 32(5), 227-237.

Cruz-Tirado, J. P., Vejarano, R., Tapia-Blácido, D. R., Barraza-Jáuregui, G., & Siche, R. (2019). Biodegradable foam tray based on starches isolated from different Peruvian species. *International journal of biological macromolecules*, 125, 800-807. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.12.111

Czekała, W., Łukomska, A., Pulka, J., Bojarski, W., Pochwatka, P., Kowalczyk-Juśko, Oniszczyk, A. & Dach, J. (2023). Waste-to-energy: Biogas potential of waste from coffee production and consumption. *Energy*, 276, 127604. doi.org/10.1016/j.energy.2023.127604

Dana, B. (1992). Manual de Laboratorio de Ciencias de los Alimentos. *Editorial Acribia. Zaragoza. España.*

Dergal, S. B., Rodriguez, H. B., & Morales, A. A. (2006). *Química de los alimentos* (No. 04; TX354 B3 2006.). Pearson educación.

Díaz, C. y Carmen, M. (2017). *Línea de base del sector café en el Perú*. [Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo – PNUD]. <https://camcafeperu.com.pe/admin/recursos/publicaciones/Linea-base-del-sector-cafe-en-Peru.pdf>

- Duangjai, A., Suphrom, N., Wungrath, J., Ontawong, A., Nuengchamnonng, N., & Yosboonruang, A. (2016). Comparison of antioxidant, antimicrobial activities and chemical profiles of three coffee (*Coffea arabica* L.) pulp aqueous extracts. *Integrative medicine research*, 5(4), 324-331. doi.org/10.1016/j.imr.2016.09.001
- Emma, A., Alangar, S. & Yadav, A. (2022). Extraction and characterization of coffee husk biodiesel and investigation of its effect on performance, combustion, and emission characteristics in a diesel engine. *Energy Conversion and Management: X*, 14, 100214. doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100214
- EN 13432 (2001), Envases y embalajes. Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. Programa de ensayo y criterios de evaluación para la aceptación final del envase o embalaje.
- Engel, J., Ambrosi, A. & Tessaro, I. (2019). Development of biodegradable starch-based foams incorporated with grape stalks for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 225, 115234. doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115234
- Esquivel, P., & Jimenez, V. M. (2012). Functional properties of coffee and coffee by-products. *Food research international*, 46(2), 488-495. doi:10.1016/j.foodres.2011.05.028
- Evon, P., Vandebossche, V., Pontalier, P. Y., & Rigal, L. (2010). Thermo-mechanical behaviour of the raffinate resulting from the aqueous extraction of sunflower whole plant in twin-screw extruder: manufacturing of biodegradable agromaterials by thermo-pressing. *Advanced Materials Research*, 112, 63-72. doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.112.63
- Fan, G., Peng, Q., Chen, Y., Long, Y., Bai, J., Song, G., & Cheng, Q. (2023). Preparation of biodegradable composite films based on carboxymethylated holocellulose from wheat

- straw. *International Journal of Biological Macromolecules*, 242, 124868. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124868
- Ferreira, A. M., Martins, J., Carvalho, L. H., & Magalhães, F. D. (2020). Biosourced disposable trays made of brewer's spent grain and potato starch. *Polymers*, 11(5), 923. doi.org/10.3390/polym11050923
- Ferreira, S. (2007). *Pectinas: aislamiento, caracterización y producción a partir de frutas tropicales y de los residuos de su procesamiento industrial*. Universidad Nacional de Colombia. <https://acortar.link/qeSUiC>
- Franca, A. & Oliveira, L. (2009). Coffee processing solid wastes: current uses and future perspectives. *Agricultural wastes*, 9, 155-189. <https://acortar.link/MGQG5p>
- Gemechu, F. G. (2020). Embracing nutritional qualities, biological activities and technological properties of coffee byproducts in functional food formulation. *Trends in food science & technology*, 104, 235-261. doi.org/10.1016/j.tifs.2020.08.005
- Gurram, R., Al-Shannag, M., Knapp, S., Das, T., Singaas, E., & Alkasrawi, M. (2016). Technical possibilities of bioethanol production from coffee pulp: a renewable feedstock. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 18, 269-278. doi: 10.1007/s10098-015-1015-9
- Gutiérrez Carmona, Tomy José; Alvarez, Vera Alejandra; Eco-friendly films prepared from plantain flour/PCL blends under reactive extrusion conditions using zirconium octanoate as a catalyst; Elsevier; Carbohydrate Polymers; 178; 17-9-2017; 260-269 doi.org/10.1016/j.carbpol.2017.09.026
- Gutiérrez, H. y De la Vara, R. (2008). *Análisis y diseño de experimentos*. 2 ed. Distrito Federal, MX. McGraw-Hill Interamericana.

- Hejna, A. (2021). Potential applications of by-products from the coffee industry in polymer technology—Current state and perspectives. *Waste Management*, *121*, 296-330. doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.018
- Hoseini, M., Cocco, S., Casucci, C., Cardelli, V., & Corti, G. (2021). Coffee by-products derived resources. A review. *Biomass and Bioenergy*, *148*, 106009. doi.org/10.1016/j.biombioe.2021.106009
- Hoyos, B., Cieza, E. & Castro, R. (2021). Ecological trays based on banana (*Musa paradisiaca*) and achira (*Canna indica*) leaf blades: Physical, mechanical and chemical characteristics. *Agroindustrial Science*, *11*(1), 87-96. doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.11
- Hu, S., Gil-Ramírez, A., Martín-Trueba, M., Benítez, V., Aguilera, Y., & Martín-Cabrejas, M. A. (2023). Valorization of coffee pulp as bioactive food ingredient by sustainable extraction methodologies. *Current Research in Food Science*, 100475. doi.org/10.1016/j.crfs.2023.100475
- Huang, D., Li, R., Xu, P., Li, T., Deng, R., Chen, S., & Zhang, Q. (2020). The cornerstone of realizing lignin value-addition: Exploiting the native structure and properties of lignin by extraction methods. *Chemical Engineering Journal*, *402*, 126237. doi.org/10.1016/j.cej.2020.126237
- INACAL (2021). Guía de Implementación de la Norma Técnica Peruana NTP 209.312:2020 CAFÉ. Buenas prácticas agrícolas para prevenir la formación de mohos. <https://n9.cl/0nmzq>
- INIA (2022). Manual del cultivo de café en el VRAEM. <https://repositorio.inia.gob.pe/bitstream/20.500.12955/1625/1/Manual%20del%20cultivo%20de%20caf%C3%A9%20en%20el%20VRAEM.pdf>

- Innocenti, F. D. (2003). Biodegradability and Compostability: The International Norms. In *Biodegradable polymers and plastics* (pp. 33-45). Boston, MA: Springer US. doi:10.1007/978-1-4419-9240-6_2
- ISO 178:2003. Plastics – Determination of flexural properties. British Standards. <https://img42.chem17.com/5/20120529/634738817689531250.pdf>
- ISO 20200:2004. Plastics - Determination of the degree of disintegration of plastic materials under simulated composting conditions in a laboratory-scale test. <https://www.iso.org/standard/34100.html>
- Junta Nacional de Café (2023). <https://juntadelcafe.org.pe/produccion-peruana-de-cafe-alcanzo-las-234-200-toneladas-en-2022-mostrando-una-caida-de-14/>
- Kushwaha, P. K., & Kumar, R. (2010). Effect of silanes on mechanical properties of bamboo fiber-epoxy composites. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 29(5), 718-724. <https://doi.org/10.1177/0731684408100691>
- LEY N° 30884. Ley que regula el plástico de un solo uso y los recipientes o envases descartables. 19 de diciembre de 2018. D.S.N° 006-2019-MINAM. <https://www.gob.pe/institucion/congreso-de-la-republica/normas-legales/1122664-30884>
- Lisi, M. (2012). *Caracterización de almidones de maíz: nativo y modificados*. [Tesis de Maestría, Universidad Católica de Córdoba]. <http://pa.bibdigital.ucc.edu.ar/id/eprint/28>
- Luna, P., Darniadi, S., Chatzifragkou, A., & Charalampopoulos, D. (2021, May). Biodegradable foams based on extracted fractions from sorghum by-products. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 749, No. 1, p. 012057). IOP Publishing. Doi:10.1088/1755-1315/749/1/012057
- Luzi, F., Fortunati, E., Puglia, D., Petrucci, R., Kenny, J. M., & Torre, L. (2015). Study of disintegrability in compost and enzymatic degradation of PLA and PLA

- nanocomposites reinforced with cellulose nanocrystals extracted from *Posidonia Oceanica*. *Polymer degradation and stability*, 121, 105-115. doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2015.08.016
- Machado, C., Benelli, P. & Tessaro, I. (2019). Constrained mixture design to optimize formulation and performance of foams based on cassava starch and peanut skin. *Journal of Polymers and the Environment*, 27, 2224-2238. doi.org/10.1007/s10924-019-01518-8
- Machado, C., Benelli, P. & Tessaro, I. (2020). Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 1343-1353. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098
- Machado, C., Benelli, P., & Tessaro, I. (2017). Sesame cake incorporation on cassava starch foams for packaging use. *Industrial crops and products*, 102, 115-121. doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.03.007
- Mangaraj, S., Yadav, A., Bal, L., Dash, S. y Mahanti, N. (2018). Application of Biodegradable Polymers in Food Packaging Industry: A Comprehensive Review. *Journal of Packaging Technology and Research*, 3(1), 77–96. doi:10.1007/s41783-018-0049-y
- Marcia, F. (2003). *Agregación en gránulos de almidón* (Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro). qro.cinvestav.mx/~aherrera/tesisEstudiantes/tesisMarciaCanonico.pdf
- Mayu, J. & Sabu, T. (2008). Biofibres and biocomposites. *Carbohydrate polymers*, 71(3), 343-364. doi:10.1016/j.carbpol.2007.05.040
- Mello, L. R., & Mali, S. (2014). Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 55, 187-193. doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.015

- Merino, D., Bellassi, P., Paul, U. C., Morelli, L., & Athanassiou, A. (2023). Assessment of chitosan/pectin-rich vegetable waste composites for the active packaging of dry foods. *Food Hydrocolloids*, *139*, 108580. doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.108580
- MIDAGRI (2023). Obsevatorio de commodities, café. Dirección de estudios económicos, Dirección general de políticas agrarias. https://repositorio.midagri.gob.pe/bitstream/20.500.13036/1406/1/Observatorio%20Commodities%20Caf%C3%A9_%20jul-set%202022.pdf
- Mincetur (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo) .(2016). Análisis integral de la logística en el Perú, 5 cadenas de exportación https://www.mincetur.gob.pe/wp-content/uploads/documentos/comercio_exterior/facilitacion_comercio_exterior/P_Cafe.pdf
- Mohanty, A. K., Misra, M., & Drzal, L. T. (2002). Sustainable bio-composites from renewable resources: opportunities and challenges in the green materials world. *Journal of Polymers and the Environment*, *10*, 19-26. doi:10.1023/a:1021013921916
- Mondal, A., Uddin, M., Sujan, S., Tang, Z., Alemu, D., Begum, H., Li, J., Huang, F. & Ni, Y. (2023). Preparation of lignin-based hydrogels, their properties and applications. *International Journal of Biological Macromolecules*, 125580. doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.125580
- Montgomery, D. (2011). Diseño y análisis de experimentos. 2 ed. Distrito Federal, MX. Limusa.
- Mugwagwa, L. & Chimphango, A. (2022). Physicochemical properties and potential application of hemicellulose/pectin/nanocellulose biocomposites as active packaging for fatty foods. *Food Packaging and Shelf Life*, *31*, 100795. doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100795

- Muhie, S. (2022). Strategies to improve the quantity and quality of export coffee in Ethiopia, a look at multiple opportunities. *Journal of Agriculture and Food Research*, 10, 100372. doi.org/10.1016/j.jafr.2022.100372
- NREL/TP-510-42619 (National Renewable Energy Laboratory) (2008). Determination of Extractives in Biomass. <https://www.nrel.gov/docs/gen/fy08/42619.pdf>
- Oliveira, G., Passos, C. P., Ferreira, P., Coimbra, M. A., & Gonçalves, I. (2021). Coffee by-products and their suitability for developing active food packaging materials. *Foods*, 10(3), 683. doi:10.3390/foods10030683
- Oliveira, L. S., & Franca, A. S. (2015). An overview of the potential uses for coffee husks. *Coffee in health and disease prevention*, 283-291. doi.org/10.1016/B978-0-12-409517-5.00031-0
- Panzarini, N., Taveira, J., Luan, R., Giovanetti, M., Kaminski, S. & Carlos, A. (2020). Starch-based foam packaging developed from a by-product of potato industrialization (*Solanum tuberosum* L.). *Applied Sciences*, 10(7), 2235. doi.org/10.3390/app10072235
- Parades, R., Arias, J., Abarca, V. y Montañez, (2022). Cosecha y beneficio húmedo para cafés especiales. [Instituto Nacional de Innovación Agraria – INIA]. <https://acortar.link/j7H9e2>
- Pérez, J., Muñoz-Dorado, J., De la Rubia, T. D. L. R., & Martínez, J. (2002). Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. *International microbiology*, 5, 53-63. doi:10.1007/s10123-002-0062-3
- Polman, E. M., Gruter, G. J. M., Parsons, J. R., & Tietema, A. (2021). Comparison of the aerobic biodegradation of biopolymers and the corresponding bioplastics: A review. *Science of the Total Environment*, 753, 141953. doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141953

- Rebollo, M., Cañas, S., Taladrid, D., Benítez, V., Bartolomé, B., Aguilera, Y. & Martín, M. (2021). Revalorization of Coffee Husk: Modeling and Optimizing the Green Sustainable Extraction of Phenolic Compounds. *Foods* 10, 653. <https://doi.org/10.3390/foods10030653>
- Saes, L., Dos Santos, W., Bonini, E., Ferrarese, O., Kremer, R., Oliveira, R. & Constantain, J. (2010). Lignin: from nature to industry. *Lignin: Properties and applications in biotechnology and bioenergy*. New York: Nova Science Publishers, 419-436. <https://acortar.link/x81IUp>
- Salimi, M., Channab, B. E., El Idrissi, A., Zahouily, M., & Motamedi, E. (2023). A comprehensive review on starch: Structure, modification, and applications in slow/controlled-release fertilizers in agriculture. *Carbohydrate Polymers*, 121326. doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.121326
- Salvatierra, D. (2015). *Determinación de la composición química proximal, carbohidratos totales, azúcares libres y fructanos del tipo inulina – fructooligosacáridos del yacón (Smallanthus sonchifolius (Poepp. et Endl.) H. Robinson)*. [Tesis para obtener el título de licenciado en química, Universidad Peruana Cayetano Heredia]. <https://acortar.link/0ynkEx>
- Sarasa, J., Gracia, J. M., & Javierre, C. (2009). Study of the biodisintegration of a bioplastic material waste. *Bioresource technology*, 100(15), 3764-3768. doi: 10.1016/j.biortech.2008.11.049
- Soykeabkaew, N., Thanomsilp, C., & Suwantong, O. (2015). A review: Starch-based composite foams. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 78, 246-263. doi.org/10.1016/j.compositesa.2015.08.014

- Spada, J. C., Jasper, A., & Tessaro, I. C. (2020). Biodegradable cassava starch based foams using rice husk waste as macro filler. *Waste and Biomass Valorization*, *11*, 4315-4325. doi.org/10.1007/s12649-019-00776-w.
- Talens, C., Lago, M., Simó-Boyle, L., Odriozola-Serrano, I., & Ibarra, M. (2022). Desirability-based optimization of bakery products containing pea, hemp and insect flours using mixture design methodology. *LWT*, *168*, 113878. Machado, CM, Benelli, P. y Tessaro, IC (2017). Incorporación de torta de ajonjolí sobre espumas de almidón de yuca para uso en empaques. *Cultivos y productos industriales*, *102*, 115-121. doi.org/10.1016/j.lwt.2022.113878.
- Tovar, T. (2008). *Caracterización morfológica y térmica del almidón de maíz (Zea mays L) obtenido por diferentes métodos de aislamiento. [Tesis para obtener el título de licenciado en química en alimentos, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo]*. <https://acortar.link/x81IU>
- Velasco, V., Sepúlveda, E., Williams, P., Rodríguez-Llamazares, S., Gutiérrez, C., & Valderrama, N. (2022). Starch-based composite foam for chicken meat packaging. *Journal of Food Science and Technology*, *59*(12), 4594-4602. doi: 10.1007/s13197-022-05538-6
- Vercelheze, A. E., Fakhouri, F. M., Dall'Antônia, L. H., Urbano, A., Youssef, E. Y., Yamashita, F., & Mali, S. (2012). Properties of baked foams based on cassava starch, sugarcane bagasse fibers and montmorillonite. *Carbohydrate Polymers*, *87*(2), 1302-1310. doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.09.016
- Zeng, F., Ye, Y., Liu, J., & Fei, P. (2023). Intelligent pH indicator composite film based on pectin/chitosan incorporated with black rice anthocyanins for meat freshness monitoring. *Food Chemistry: X*, *17*, 100531. doi.org/10.1016/j.fochx.2022.100531

