





Optimización de bandejas biodegradables con almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) por termoformado

Optimization of biodegradable trays with residual potato starch (*Solanum tuberosum*) and passion fruit waste flour (*Passiflora edulis*) by thermoforming

 Any Córdova-Chang
acordova@uns.edu.pe
Universidad Nacional del Santa, Perú

 Elsa Aguirre
eaguirre@uns.edu.pe
Universidad Nacional del Santa, Perú

Resumen

El objetivo de esta investigación fue optimizar la formulación de bandejas biodegradables elaboradas a partir de almidón de papa residual (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) mediante la técnica de termoformado. El estudio, de enfoque hipotético-deductivo, diseño básico, transversal y alcance explicativo, aplicó una metodología de diseño de mezclas con 15 corridas experimentales. La muestra estuvo constituida por 5 kg de almidón de papa y 5 kg de harina de maracuyá. El análisis estadístico se realizó con el software Design Expert 13 mediante ANVA y optimización numérica, mientras que la representación gráfica se efectuó con Statística 10. Los resultados mostraron una formulación óptima compuesta por 45.1% de almidón, 5.3% de harina de maracuyá y 49.7% de agua, alcanzando alta dureza, baja fracturabilidad y adecuadas propiedades físicas. Los modelos cuadráticos y lineales presentaron elevada confiabilidad ($R^2 > 0.90$). Se concluye que la combinación de almidón de papa residual y harina de maracuyá permite obtener bandejas biodegradables con propiedades mecánicas y funcionales satisfactorias, constituyendo una alternativa viable y sostenible frente a los envases plásticos convencionales.

Palabras claves: almidón de papa, residuos agroindustriales, biodegradabilidad, termoformado, envases sostenibles.

Abstract


The objective of this research was to optimize the formulation of biodegradable trays made from residual potato starch (*Solanum tuberosum*) and passion fruit residue flour (*Passiflora edulis*) using thermoforming. The study, with a hypothetical-deductive approach, basic design, cross-sectional scope, and explanatory level, applied a mixture design methodology with 15 experimental runs. The sample consisted of 5 kg of potato starch and 5 kg of passion fruit flour. Statistical analysis was performed with Design Expert 13 using ANOVA and numerical optimization, while graphical representation was carried out with Statística 10. The results indicated an optimal formulation composed of 45.1% starch, 5.3% passion fruit flour, and 49.7% water, achieving high hardness, low fracturability, and adequate physical properties. Quadratic and linear models showed high reliability ($R^2 > 0.90$). It is concluded that the combination of residual potato starch and passion fruit flour allows the production of biodegradable trays with satisfactory mechanical and functional properties, representing a viable and sustainable alternative to conventional plastic packaging.

Keywords: potato starch, agro-industrial waste, biodegradability, thermoforming, sustainable packaging.



Publicado: 15/10/2025
Aceptado: 15/10/2025
Recibido: 09/09/2025

Open Access
Article scientific

 <https://doi.org/10.47422/jstri.v6i2.66>





INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el incremento sostenido en la producción y consumo de plásticos se ha convertido en uno de los principales retos ambientales. Solo en 2022, la producción mundial alcanzó aproximadamente 400 millones de toneladas, de las cuales cerca del 30% se destinó a envases y embalajes, un sector en el que predominan polímeros derivados del petróleo como el polietileno (PE) y el polipropileno (PP) (Plastics Europe, 2023).

La acumulación de estos materiales genera graves problemas ambientales, pues una gran proporción termina en vertederos, incineradoras o, en el peor de los casos, en ecosistemas terrestres y marinos. Su degradación incompleta produce macro y microplásticos que se han detectado en suelos, agua dulce, océanos e incluso en cadenas alimentarias, representando riesgos potenciales para la biodiversidad y la salud humana (Geyer et al., 2017; Andrady, 2017; Zhang et al., 2022; Shen et al., 2023).

Frente a este panorama, la búsqueda de alternativas sostenibles ha impulsado el desarrollo de biopolímeros y materiales biodegradables de origen natural, que buscan reemplazar o complementar a los plásticos convencionales (Ribeiro et al., 2021). Estos materiales, al estar compuestos de polisacáridos, proteínas y fibras, presentan la capacidad de descomponerse en condiciones ambientales mediante la acción de microorganismos, humedad y calor, reduciendo significativamente su impacto ambiental (Emadian et al., 2017). Paralelamente, se han establecido marcos regulatorios que limitan el uso de plásticos de un solo uso y fomentan el empleo de envases biodegradables.

En Perú, la Ley N.º 30884, promulgada en 2018, constituye un hito en este proceso, ya que establece la prohibición progresiva de bolsas plásticas y tecnopor (poliestireno expandido), medidas que reflejan un compromiso con la transición hacia una economía circular y el uso de materiales sostenibles (Ministerio del Ambiente, 2021).

El almidón es considerado uno de los materiales más prometedores para el desarrollo de envases biodegradables, debido a su abundancia, bajo costo, capacidad de gelatinización y propiedades filmogénicas (Sanyang et al., 2021; Yildiz et al., 2022). Sin embargo, su uso aislado puede presentar limitaciones, como fragilidad o alta absorción de agua, por lo que su combinación con fibras y otros aditivos de origen agroindustrial constituye una estrategia eficaz para mejorar sus propiedades mecánicas y de resistencia (Li et al., 2020; Bergel et al., 2017).

En este sentido, los subproductos agroindustriales ofrecen una oportunidad doble: por un lado, aportar compuestos funcionales (fibra, celulosa, proteínas) que mejoren las

propiedades de los biopolímeros; y por otro, valorizar residuos que de otro modo serían desechados. Un ejemplo de ello son las cáscaras de maracuyá, ricas en fibra dietética y con potencial para la elaboración de materiales biodegradables (Chauhan et al., 2021). Asimismo, los almidones residuales de papa nativa, obtenidos tras procesos de selección y comercialización, constituyen una materia prima abundante en regiones altoandinas del Perú que actualmente carece de un aprovechamiento industrial adecuado. En este contexto, la presente investigación se centra en la optimización de bandejas biodegradables elaboradas a partir de almidón residual de papa (*Solanum tuberosum*) y harina de residuos de maracuyá (*Passiflora edulis*) mediante la técnica de termoformado. Se busca no solo desarrollar un material alternativo a los envases plásticos tradicionales, sino también promover el aprovechamiento de materias primas locales de bajo costo, integrando criterios de sostenibilidad, economía circular y valorización de residuos agroindustriales.

METODOLOGÍA

2.1. Materiales y Reactivos

Se utilizó papa residual o rastrojo (20kg) se obtuvo de la Asociación de productores y agropecuarios ecológico del ingenio, en Huancayo del departamento de Junín. Los residuos de maracuyá (50 kg) se obtuvieron del subproducto del proceso de pulpa de maracuyá en una agroexportadora en la Provincia de Casma en Ancash. El procesamiento de las materias primas tuvo lugar en el laboratorio de Microbiología y toxicología de productos agroindustriales de la Escuela Profesional de Ingeniería Agroindustrial de la Universidad Nacional del Santa, en Chimbote, región Áncash, Perú.

2.2. Metodología para la obtención de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá

La obtención del almidón se presenta en la Figura 1a, después de la selección continua el lavado de la papa residual, seguido del pelado y troceado para retirar impurezas. Luego, la papa se tritura y la suspensión obtenida se deja sedimentar a 4 °C durante 24 horas para separar el almidón. El sedimento se seca a 60 °C por igual periodo, reduciendo la humedad y asegurando su conservación. Posteriormente, se muele y tamiza con malla de 300 µm para lograr un producto homogéneo.

La metodología de la obtención de harina de residuos de maracuyá se presenta en la Figura 1b, consistió en ser seleccionadas y lavadas para eliminar impurezas. Estas se secan en estufa a 60 °C por 24 horas y luego se someten a molienda. Finalmente, el material se tamiza (300 µm) para uniformizar el tamaño de partícula.



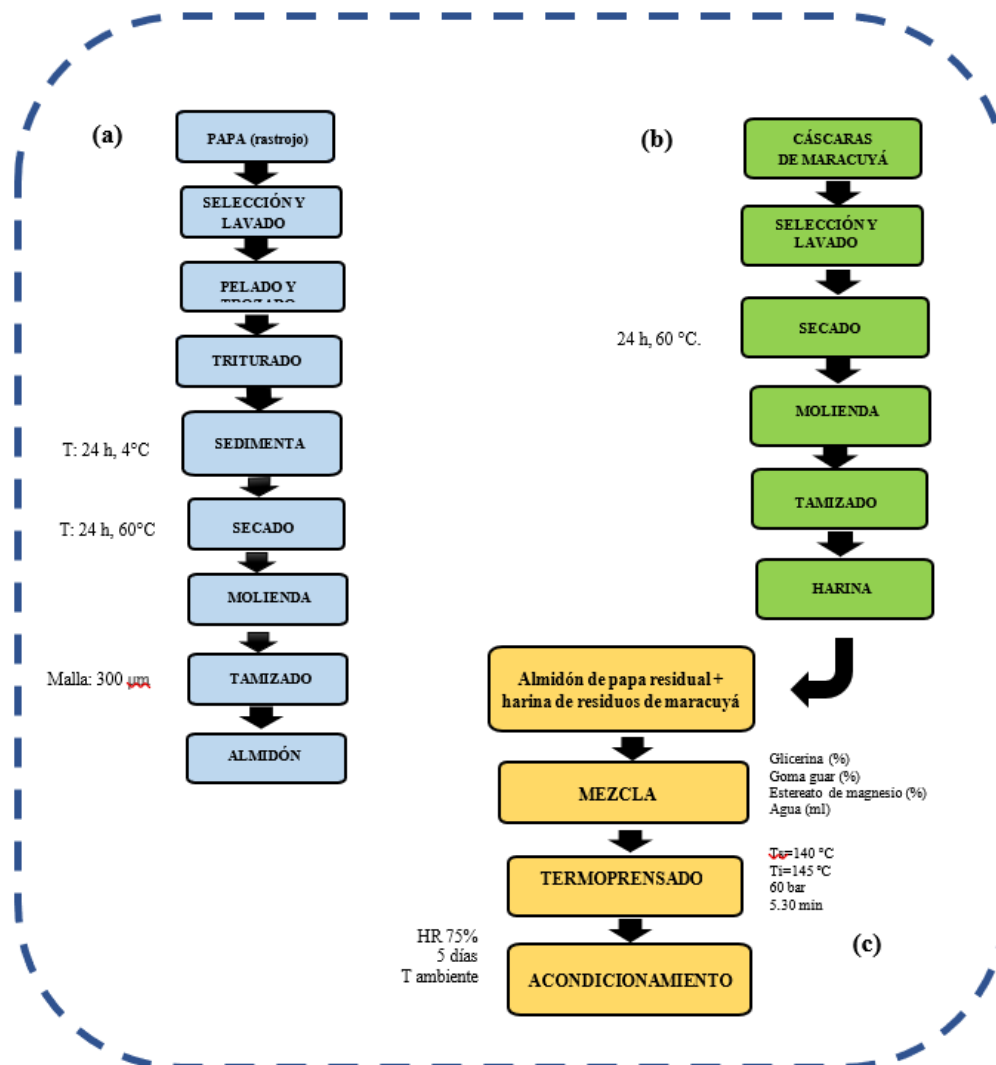
2.3. Producción de Bandejas

Se consideró 15 formulaciones distintas de almidón de papa residual, harina de cáscara de maracuyá y agua destilada, detallado en la Tabla 1. Se realizó el pesado en la balanza analítica (OHAUS, modelo PX323); se mezclaron los insumos (estearato de magnesio 6%, glicerol 7%, goma guar 1%) y las formulaciones con una batidora manual (IMACO, HM 3025, Perú) buscando la

homogenización. El termoformado (Figura 1c) se realizó empleando cerca de 80 gr de la mezcla homogénea, la cual se prensó en una termoprensa (Reles, MS3 Digital, Perú) a 145 °C en la placa superior y 140 °C en la inferior, con un tiempo de moldeo de 5,5 minutos. Las bandejas son acondicionadas a temperatura ambiente (25 °C) y 75 % de HR durante 72 hora para luego ser envasadas en bolsas de polipropileno de alta densidad.

Figura 1

Proceso para la obtención de (a) almidón de residuo de papa, (b) harina de cáscara de maracuyá y (c) bandejas biodegradables



2.4. Caracterización química de las materias primas

La caracterización química consistió principalmente en la determinación del contenido de humedad (NTP 206.011) utilizando el horno (INDULAB PERÚ, modelo 3511-1), cenizas (AOAC 935.398) utilizando la mufla (THERMO SCIENTIFIC) a 550° durante 6 horas y fibra utilizando el método AOAC. 920.87 (AOAC, 2005a).

2.5. Caracterización de bandejas biodegradables

Las características de color se determinaron con un colorímetro marca KONICA MINOLTA, modelo CR-400, usando el método CIELAB (L*, a*, b*), L* luminosidad (Negro 0/Blanco 100), a* (verde-/rojo+) y b* (azul-/amarillo+). Minolta (1993). El análisis físico-mecánico de las bandejas incluyeron distintas determinaciones.



El espesor se registró con un micrómetro portátil (Mitutoyo, número 147-106) con rango de medición: 0 - 5". La humedad se cuantificó por el método de secado en horno, sometiendo 5 g de muestra molida a 105 °C durante 3 h. La densidad aparente (g/cm³) se calculó según el procedimiento descrito por Aguirre et al. (2023), mientras que la capacidad de absorción de agua se evaluó conforme a la norma ABNT NBR NM ISO 535 (2014). Por su parte,

los ensayos de tracción y elongación se efectuaron con un analizador de textura (TA. HD Plus; Stable Micro System, Surrey, Reino Unido), siguiendo la norma ASTM D828 y la metodología de Mello y Mali (2014). Finalmente, las propiedades de dureza y fracturabilidad se determinaron empleando el accesorio HDP/FSR integrado al mismo equipo.

Tabla 1

Tratamientos del diseño de mezclas

Orden estándar	Almidón de papa	Harina de residuos de maracuyá	Agua destilada
1	0.550179	0.0428402	0.406981
2	0.527732	0.044978	0.42729
3	0.452482	0.0439716	0.503546
4	0.452482	0.0439716	0.503546
5	0.452482	0.0439716	0.503546
6	0.412862	0.0552226	0.531915
7	0.373156	0.0666856	0.560159
8	0.550179	0.0428402	0.406981
9	0.506383	0.0468085	0.446809
10	0.506383	0.0468085	0.446809
11	0.506383	0.0468085	0.446809
12	0.412862	0.0552226	0.531915
13	0.412862	0.0552226	0.531915
14	0.373156	0.0666856	0.560159
15	0.373156	0.0666856	0.560159

2.6. Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) y termogravimétrico (TG)

Las vibraciones moleculares de los compuestos presentes en las bandejas se caracterizaron mediante espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), empleando un equipo Nicolet™ iS20 (Thermo Scientific, EE. UU.) con accesorio de reflectancia total atenuada (ATR). El análisis se efectuó en la región del infrarrojo medio, comprendida entre 4000 y 500 cm⁻¹, utilizando una resolución espectral de 4 cm⁻¹. El análisis termogravimétrico (TGA) se llevó a cabo en atmósfera de nitrógeno, calentando las muestras desde 30 hasta 700 °C a una velocidad de 10 °C/min. Se registró la pérdida de masa y la curva derivada (DTG) para identificar las etapas de

degradación térmica, siguiendo la metodología descrita por Nurazzi et al. (2021).

2.7. Microscopía electrónica de barrido (MEB)

La morfología de las bandejas se examinó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM, Tescan VEGA-3 LMU, República Checa), previo recubrimiento con una fina capa de oro (~40–50 nm). Las muestras se fijaron en soportes metálicos con cinta de doble cara y se analizaron a 20 kV.

2.8. Análisis estadístico

El diseño fue experimental y se recurrió al diseño de mezclas porque las variables independientes del estudio



son proporciones de tres componentes que deben sumar 1, se implementó en Design-Expert versión 13.

Se trabajó con 15 corridas aleatorizadas para garantizar ajuste estadístico y estimación del error puro en los modelos (ANOVA y ajuste de R^2 mostrados en el documento).

Resultados y Discusión

3.1. Caracterización de materia prima

La Tabla 2 muestra la composición proximal del almidón de papa residual y la harina de cáscaras de maracuyá. El almidón presentó bajo contenido de humedad (10.12%), grasa (0.07%) y cenizas (0.44%), además de un alto nivel

de carbohidratos (89.14%), semejante al 85% reportado por Ambigaipalan et al. (2019), características que confirman su pureza y capacidad filmógena (Ovando-Martínez et al., 2021; Singh et al., 2019). En la harina de maracuyá destacó el elevado contenido de fibra dietética (66.15%) y un menor porcentaje de carbohidratos (31.33%), en concordancia con lo reportado en otros subproductos agroindustriales (Hernández et al., 2020). Esta composición le confiere propiedades de refuerzo estructural y mejora de la biodegradabilidad del material. Ambos componentes ofrecen un perfil complementario: el almidón como matriz formadora y la fibra de maracuyá como refuerzo, lo que sustenta su potencial en la elaboración de bandejas biodegradables.

Tabla 2

Composición proximal del almidón de papa nativa y harina de cascara de maracuyá. (g/100g)

	Almidón de papa residual	Harina de cáscaras de maracuyá
Humedad (%)	10.12 ± 0.211	11.13 ± 0.10
Grasa (%)	0.07 ± 0.03	0.57 ± 0.04
Cenizas (%)	0.44 ± 0.04	0.54 ± 0.01
Fibra dietética total (%)	3.18 ± 0.01	66.15 ± 0.02
Carbohidratos (%)	89.14 ± 0.09	31.33 ± 0.29

3.2. Caracterización de bandejas biodegradables

3.2.1. Propiedades físicas

Los parámetros de color de las bandejas (L^* , a^* , b^* , C^*) variaron significativamente con la proporción de harina de cáscara de maracuyá en las formulaciones ($p < 0.05$). El aumento de fibra redujo los valores de luminosidad ($L^* = 57-63$) (Tabla 3) y elevó los parámetros a^* y b^* , generando tonalidades más oscuras y amarillas conforme aumentan las concentraciones de los residuos de maracuyá, debido a la existencia de pigmentos naturales en su matriz. (Figura 2). Este comportamiento se relaciona con la presencia de compuestos fenólicos, carotenoides y flavonoides propios

de la cáscara de maracuyá, en concordancia con lo reportado por Cazón et al. (2017). La mayor saturación del color ($C^* = 79-83$) en formulaciones con mayor fibra refuerza la hipótesis de que los pigmentos vegetales actúan como moduladores cromáticos de la matriz amilácea (Shafiei et al., 2021).

La Tabla 4 muestra el análisis físico de las bandejas biodegradables. La densidad aparente osciló entre 0.21 y 0.48 g/cm³, las formulaciones con mayor contenido de fibra presentaron densidades más elevadas, al restringir la expansión de la matriz, mientras que aquellas con mayor proporción de almidón fueron más porosas.

Tabla 3

Parámetros de color promedio L^ , a^* , b^* y diferencial d color*

Tratamientos	L^*	a^*	b^*	COLOR
T1	72.05	1.43	11.48	82.9
T2	72.15	1.47	11.44	79.56



T3	64.66	2.56	16.2	79.1
T4	64.91	2.35	16	79.21
T5	63.58	2.55	16.28	82.68
T6	57.31	2.8	15.74	81.1
T7	63.5	3.13	16.43	79.88
T8	71.69	1.48	11.59	79.01
T9	64.08	3.09	16.07	82.72
T10	63.35	2.9	15.96	79.7
T11	62.99	2.92	16.45	79.93
T12	57.44	2.66	14.43	81.02
T13	62.53	2.88	14.96	79.91
T14	61.36	2.9	16.25	81.64
T15	58.57	3.26	16.78	79.12

Tabla 4

Propiedades Físicas de las bandejas biodegradables

Formulación	Densidad (g/cm ³)	Espesor (mm)	Humedad (%)	Capacidad de absorción de agua (%)
1	0.21	2.5	6.22	65.18
2	0.22	2.48	6.34	66.8
3	0.4	2.23	7.24	60.48
4	0.4	2.31	7.05	68.86
5	0.39	2.18	7.14	66.94
6	0.46	2.44	7.32	58.26
7	0.42	2.61	8.14	36.5
8	0.24	2.53	6.28	66
9	0.41	2.1	7.72	46.19
10	0.42	2.01	7.38	52.09
11	0.38	2.18	7.55	47.45
12	0.45	2.42	7.23	61.37
13	0.48	2.53	7.28	62.48
14	0.45	2.73	7.14	37.61
15	0.41	2.55	7.64	35.62

Los valores del espesor de las bandejas variaron entre 2.01 y 2.73 mm. Se observó una tendencia a espesores mayores en formulaciones con más fibra, atribuida a la acción de la

lignocelulosa como refuerzo estructural que limita la expansión homogénea. Resultados similares han sido reportados en bandejas con residuos agroindustriales por



Mello & Mali (2014) y Ferreira et al. (2020). El contenido de humedad se ubicó entre 6.22 y 8.14%, valores que se encuentran dentro de lo señalado por Aguirre et al. (2023) (5.65–9.94%). El incremento de fibra favoreció una ligera retención hídrica, en línea con lo reportado en matrices lignocelulósicas.

El comportamiento de la capacidad de absorción de agua no fue lineal respecto al contenido de fibra (35.62 a 68.86%), lo que evidencia la influencia tanto de la

composición química (celulosa, hemicelulosa, lignina) como de la microestructura final. Mientras algunas formulaciones con fibras hidrofílicas favorecieron una mayor absorción, otras con mayor proporción de compuestos lignificados mostraron reducciones. Esta dualidad coincide con lo descrito por Machado et al. (2020) y Cruz-Tirado et al. (2019), quienes señalan que la interacción entre almidón, tipo de fibra y condiciones de procesamiento determina la magnitud de esta propiedad.

Figura 2

Bandejas Biodegradables elaboradas con almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá.



Tabla 5

Propiedades mecánicas de las bandejas biodegradables

Formulación	Dureza (N)	Fracturabilidad (mm)	Resistencia a la tracción (Mpa)	Elongación (%)
1	84.63	2.14	4.11	1.73
2	90.13	1.99	3.73	1.94
3	57.86	2.42	3.1	1.83
4	63.84	2.64	3.04	2.11
5	56.09	2.71	2.68	2.11
6	61.33	3.25	3.3	2.25
7	50.66	3.2	2.82	1.79
8	79.43	1.88	3.61	2
9	84.53	2.76	3.83	2.19



10	90.71	2.83	3.5	1.89
11	81.4	2.51	2.84	1.63
12	60.1	2.93	3.14	1.93
13	54.9	3.16	2.62	1.86
14	47.46	3.29	2.21	1.45
15	52.41	2.99	2.94	1.85

Tabla 6

Restricciones del procedimiento de optimización numérica

Factor/Respuesta	Objetivo	LI	LS	PI	PS	Importancia
A: Almidón de papa	en rango	0.37	0.55	1	1	3
B: Harina de residuos de maracuyá	en rango	0.04	0.07	1	1	3
C: Agua	en rango	0.4	0.56	1	1	3
Dureza	maximizar	47.46	90.71	1	1	3
Fracturabilidad	en rango	1.88	3.29	1	1	3
L	ninguno	57.31	72.15	1	1	3
a	ninguno	1.43	3.26	1	1	3
b	ninguno	11.44	16.78	1	1	3
Densidad	ninguno	0.21	0.48	1	1	3
Espesor	ninguno	2.01	2.73	1	1	3
Humedad	ninguno	6.22	8.14	1	1	3
Capacidad de absorción de agua	ninguno	35.62	68.86	1	1	3
Resistencia a la tracción	en rango	2.21	4.11	1	1	3
Elongación	ninguno	1.45	2.25	1	1	3

3.2.2. Propiedades mecánicas

La Tabla 5 muestra las propiedades mecánicas de las bandejas biodegradables. Los valores de dureza variaron entre 47.5 y 90.7 N, observándose que las formulaciones con mayor contenido de almidón alcanzaron los valores más altos, mientras que aquellas con mayor proporción de harina de maracuyá presentaron una reducción significativa ($p < 0.05$). Esta tendencia sugiere que las fibras interrumpen la continuidad de la matriz gelatinizada, disminuyendo la resistencia inicial, en concordancia con lo señalado por Cazón et al. (2017). Las bandejas presentaron

fracturabilidad entre 1.88 y 3.29 mm, las que mostraron mayor dureza se fracturaron a menores desplazamientos, mostrando un carácter más frágil, mientras que las de mayor contenido de harina de maracuyá presentaron mayor deformación antes de la ruptura. Este comportamiento refleja el efecto de la fibra insoluble como refuerzo rígido, pero con baja cohesión con el almidón, fenómeno previamente reportado por Hernández et al. (2020) y Pereda et al. (2011). Respecto a la resistencia a la tracción, los tratamientos evaluados alcanzaron fuerzas entre 15 y 30 N antes de la fractura. El control mostró la mayor



resistencia, atribuida a la homogeneidad de la matriz rica en almidón, mientras que el incremento de harina redujo la cohesión y, en consecuencia, la resistencia máxima, lo que coincide con lo observado por Souza et al. (2020). La elongación se situó entre 1.45 y 2.25 mm, con mayores valores en bandejas con alto contenido de almidón y una disminución progresiva al aumentar la fibra, en línea con lo reportado por Ochoa-Yepes et al. (2019). Los resultados confirman que la harina de maracuyá actúa como agente de rigidez y refuerzo estructural, aunque compromete la resistencia y la elasticidad del material.

La formulación óptima requiere un balance entre ambos componentes, tal como sugieren Müller et al. (2022), con el fin de obtener bandejas biodegradables que combinen resistencia, rigidez y flexibilidad.

Con las restricciones del procedimiento de optimización numérica (Tabla 6) se determinó que las condiciones óptimas eran 45.1% de almidón de papa, 5.3% de harina de residuos de maracuyá y 49.7% de agua (deseabilidad igual a 1.00). Y, en peso seco, 89.5% de almidón de papa y 10.5% de harina de residuos de maracuyá. Los modelos de predicción y las superficies de respuesta se generaron mediante el software Design Expert, han permitido reconocer claramente el punto óptimo de formulación.

3.2.3. Vibración molecular

El análisis FTIR de las bandejas biodegradables elaboradas con almidón de papa residual y harina de cáscara de maracuyá permitió identificar las principales bandas de absorción asociadas a los grupos funcionales presentes en la matriz (Figura 3), el análisis se realizó al tratamiento óptimo. Se observaron señales intensas en la región de

3200–3400 cm^{-1} , atribuidas al estiramiento O–H de grupos hidroxilo característicos de los polisacáridos. La mayor intensidad registrada en los tratamientos con niveles altos de harina de maracuyá indica la presencia adicional de compuestos fenólicos y celulósicos, los cuales refuerzan la contribución de la fibra a la estructura de la matriz (Zhang et al., 2020). En el intervalo de 2920–2850 cm^{-1} se identificaron vibraciones de estiramiento C–H, propias de enlaces alifáticos, que confirman la incorporación de componentes lignocelulósicos de la cáscara (Souza et al., 2021). Asimismo, la banda ubicada en torno a 1640 cm^{-1} se asocia a vibraciones de agua fuertemente enlazada y a grupos carbonilo (C=O), vinculados tanto a los polisacáridos como a posibles compuestos bioactivos residuales. Este comportamiento concuerda con lo señalado por Jiménez et al. (2019), quienes reportaron que la adición de fibras vegetales en matrices amiláceas genera señales adicionales en esta región espectral. Se detectaron picos en la zona de 1050–1020 cm^{-1} , característicos de las vibraciones de estiramiento C–O y C–O–C en carbohidratos, lo que confirma la naturaleza polisacáridica de la matriz y la interacción entre almidón y fibra. Esta combinación de bandas evidencia que la harina de maracuyá no solo aporta refuerzo estructural, sino que también introduce variaciones químicas que pueden modificar la cohesión de la matriz. Los resultados muestran que la incorporación de residuos de maracuyá imprime una huella espectroscópica distintiva en las bandejas, reflejando la coexistencia de fases amiláceas y lignocelulósicas. Esta información es clave para comprender los cambios moleculares inducidos por la adición de fibra y su impacto en las propiedades finales del material biodegradable.

Figura 3

Espectros vibracionales moleculares medidos en FTIR para la bandeja biodegradable Optimo.

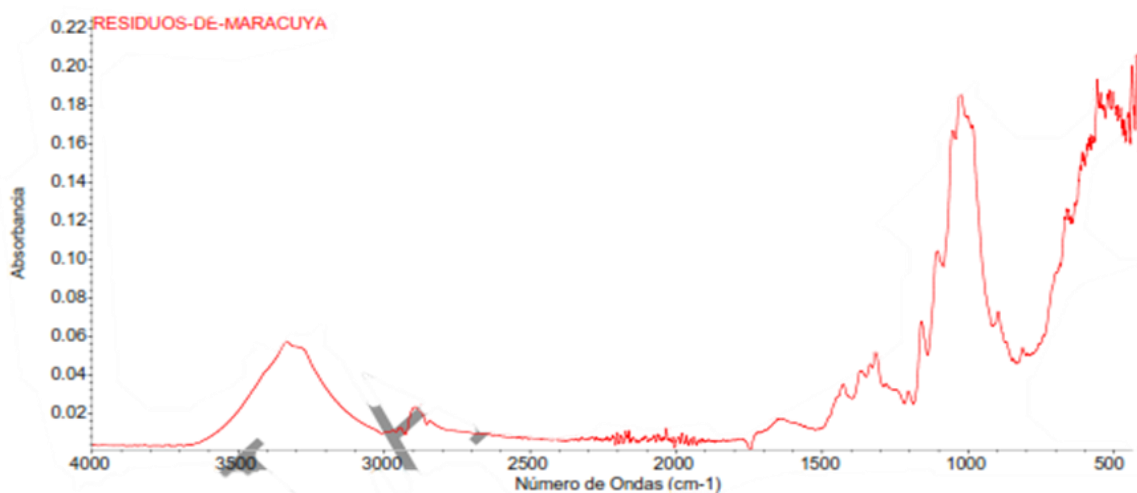




Figura 4

Curvas de análisis termogravimétrico (TGA) y derivada termogravimétrica (DTG) de la bandeja biodegradable optimo elaborada a partir de almidón residual y harina de cáscara de maracuyá.

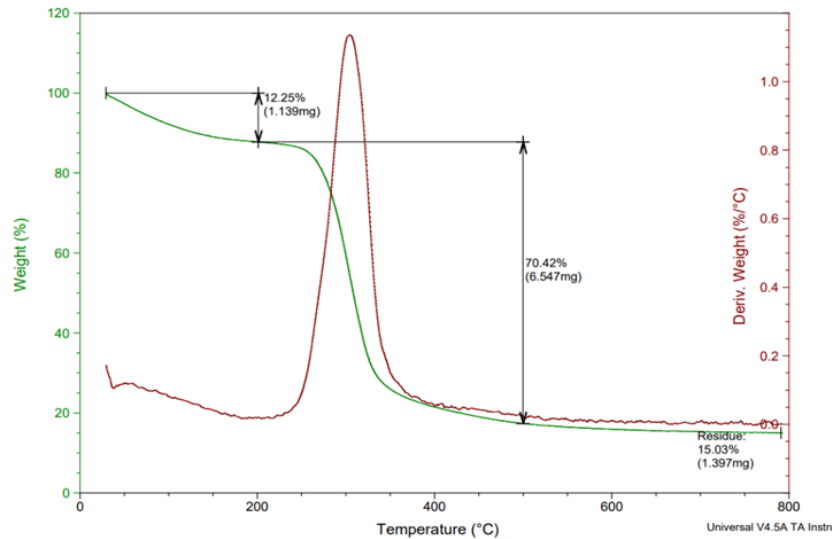
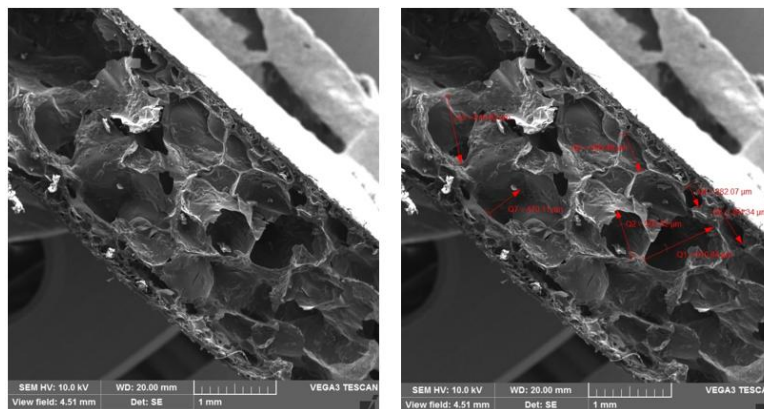


Figura 5

Micrografías obtenidas por MEB para la bandeja biodegradable optimo



3.2.4. Termogravimetría TGA

El análisis termogravimétrico (TGA) mostró un comportamiento térmico típico de matrices amiláceas reforzadas con fibra. Se identificaron tres etapas principales de pérdida de masa (Figura 4). La primera, entre 50 y 150 °C, representó una pérdida del 12,25 %, asociada a la eliminación de humedad y agua débilmente ligada (Sanyang et al., 2021). La segunda etapa, entre 250 y 350 °C, correspondió a la degradación de polisacáridos (amilosa, amilopectina) y hemicelulosas, con una pérdida del 70,42 %, siendo esta la fase de descomposición térmica más significativa. A temperaturas superiores a 400 °C se evidenció la degradación de celulosa y lignina, generando un residuo final del 15,03 %, atribuible a fracciones lignocelulósicas térmicamente estables. La curva DTG confirmó estos eventos térmicos, mostrando picos

máximos en torno a 310 °C en las formulaciones con mayor contenido de almidón (T1, T2, T8), y un desplazamiento hacia 320–330 °C en aquellas con mayor proporción de harina de maracuyá (T6, T7, T14, T15), lo que evidencia el efecto estabilizante de la fibra sobre la matriz polimérica. Este comportamiento concuerda con lo reportado por Pereda et al. (2011) y Shafiei et al. (2021), quienes destacan la mejora en la resistencia térmica de biopolímeros al incorporar refuerzos lignocelulósicos.

3.2.4. Análisis morfológico

Los resultados del análisis MEB correspondientes al tratamiento óptimo (Figuras 5) revelaron una superficie relativamente homogénea y continua, con presencia limitada de poros y fisuras. Esta morfología compacta concuerda con lo señalado por Cazón et al. (2017), quienes destacan que matrices basadas en almidón tienden a formar



estructuras densas debido a la gelatinización y retrogradación de sus cadenas, favoreciendo la cohesión interna y la resistencia mecánica. Asimismo, se observaron partículas fibrosas dispersas dentro de la matriz, atribuibles a los componentes lignocelulósicos de la harina de cáscara de maracuyá, lo cual indica una integración parcial entre las fases amilácea y fibrosa. Esta compatibilidad relativa ha sido reportada por Shafiei et al. (2021) como un factor que contribuye al aumento de rigidez sin comprometer la estructura general. En algunas zonas se identificaron microgrietas y cavidades superficiales, posiblemente generadas por tensiones internas durante el secado y el termoformado. Estas discontinuidades actúan como puntos de iniciación de fractura y pueden incrementar la permeabilidad del material, tal como describen Ochoa-Yepes et al. (2019) y Müller et al. (2022). No obstante, desde una perspectiva ambiental, esta porosidad puede favorecer la biodegradabilidad al facilitar la penetración de agua y microorganismos en la matriz. El análisis MEB del tratamiento óptimo confirma una microestructura equilibrada, donde la matriz de almidón de papa residual aporta cohesión estructural y la harina de cáscara de maracuyá introduce refuerzo fibroso y rugosidad controlada, en coherencia con las propiedades mecánicas y térmicas previamente evaluadas.

Conclusiones

La investigación confirmó la viabilidad de elaborar bandejas biodegradables a partir de almidón de papa residual y harina de residuos de maracuyá mediante termoformado. La caracterización fisicoquímica de las materias primas y la aplicación del diseño de mezclas permitieron establecer la formulación óptima (45.1% de almidón, 5.3% de harina de maracuyá y 49.7% de agua), que alcanzó propiedades mecánicas y funcionales adecuadas, destacando su alta dureza, baja fracturabilidad y buena resistencia estructural.

El estudio aporta evidencia científica y práctica sobre el aprovechamiento de subproductos agroindustriales en la producción de empaques biodegradables, sentando bases para futuras investigaciones orientadas a optimizar su desempeño en condiciones de uso real y explorar su aplicabilidad en la industria alimentaria y no alimentaria.

Referencias Bibliográficas

Aguirre, E., Domínguez, J., Villanueva, E., Ponce-Ramírez, J. A., Arévalo-Oliva, M. de F., Siche, R., González-Cabeza, J., & Rodríguez, G. (2023). Biodegradable trays based on Manihot esculenta Crantz starch and Zea mays husk flour. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101129>

- Aguirre, E., Domínguez, J., Villanueva, E., Ponce-Ramírez, J. A., Arévalo-Oliva, M. de F., Siche, R., González-Cabeza, J., & Rodríguez, G. (2023). Biodegradable trays based on Manihot esculenta Crantz starch and Zea mays husk flour. *Food Packaging and Shelf Life*, 38, 101129. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2023.101129>
- Ambigaipalan, P., Hoover, R., Donner, E., & Liu, Q. (2019). Starch characteristics and properties of potato varieties. *Carbohydrate Polymers*, 211, 304–313. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.02.081>
- Andrady, A. L. (2017). The plastic in microplastics: A review. *Marine Pollution Bulletin*, 119(1), 12–22. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.01.082>
- Bergel, BF, da Luz, LM y Santana, RMC (2017). Estudio comparativo de la influencia del quitosano como recubrimiento de espuma termoplástica de almidón de papa, yuca y maíz. *Prog Org Coat*, 106, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2017.02.010>
- Cazón, P., Vázquez, M., & Velazquez, G. (2017). Biodegradable films based on starch and cellulose nanocrystals for food packaging applications. *Food Hydrocolloids*, 77, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2017.09.003>
- Chauhan, V., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2021). Nutritional composition and bioactive compounds of passion fruit peel: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 58(9), 3293–3302. <https://doi.org/10.1007/s13197-020-04855-3>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.12.111>
- Demirel, B. (2017). Biodegradación de bioplásticos en entornos naturales. *Waste Management*, 59, 526-536. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.10.006>
- Ferreira, D. C. M., Molina, G., & Pelissari, F. M. (2020). Biodegradable trays based on cassava starch blended with agroindustrial residues. *Composites Part B: Engineering*, 183, 107682. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107682>
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. *Science Advances*, 3(7), e1700782. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>
- Hernández, J., Silva, C., & Paredes, J. (2020). Dietary fiber and functional properties of passion fruit peel. *Journal of Food Processing and Preservation*, 44(7), e14456. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14456>
- Jiménez, G. A., Miranda, B., & Moya, G. (2024). Producción de plástico biodegradable a base de almidón de yuca mediante formulación con



- plastificantes. *Revista Ingeniería de Materiales*, 18(1), 23-34. <https://doi.org/10.15517/ri.v35i1.59540>
- Li, S., Wang, Y., Xu, W. y Shi, B. (2020). Elastómero a base de caucho natural reforzado con fibras de colágeno de cuero multiescala modificadas químicamente con excelente tenacidad. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 8(13), 5091-5099. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.9b07078>
- Machado, C. M., Benelli, P., & Tessaro, I. C. (2020). Study of interactions between cassava starch and peanut skin on biodegradable foams. *International Journal of Biological Macromolecules*, 147, 1343-1353. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.10.098>
- Mello, L. R. P. F., & Mali, S. (2014). Use of malt bagasse to produce biodegradable baked foams made from cassava starch. *Industrial Crops and Products*, 55, 187-193. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.02.015>
- Müller, G. A., Asthana, A., & Rubin, S. M. (2022). Structure and function of MuvB complexes. *Oncogene*, 41(21), 2909-2919. <https://doi.org/10.1038/s41388-022-02321-x>
- Nurazzi, N. M., Asyraf, M. R. M., Khalina, A., Abdullah, N., Sabaruddin, F. A., Aisyah, H. A., ... & Lee, C. H. (2021). Thermogravimetric Analysis Properties of Cellulosic Natural Fiber Polymer Composites: A Review on Influence of Chemical Treatments. *Polymers*, 13(16), 2710. <https://doi.org/10.3390/polym13162710>
- Ochoa-Yepes, O., Di Gioglio, L., Goyanes, S., Mauri, A., & Famá, L. (2019). Influence of processing (extrusion/thermocompression, casting) and lentil protein content on the physicochemical properties of starch films. *Carbohydrate Polymers*, 208, 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.12.030>
- Ovando-Martínez, M., Bello-Pérez, L., & Agama-Acevedo, E. (2021). Propiedades fisicoquímicas de almidones nativos de tubérculos. *Journal of Applied Polymer Science*, 138(12), 502-512.
- Pereda, M., Amica, G., & Marcovich, N. E. (2011). Development and characterization of starch-based biocomposites reinforced with natural fibers. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.044>
- Pereda, M., Amica, G., & Marcovich, N. E. (2011). Development and characterization of starch-based biocomposites reinforced with natural fibers. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 329-336. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.04.044>
- Ribeiro, D. S., dos Santos, J. A. B., & de Carvalho, R. A. (2021). Biodegradable films and coatings based on starch: State of the art and future perspectives. *Polysaccharides*, 2(1), 10-31. <https://doi.org/10.3390/polysaccharides2010002>
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2021). Development and characterization of biodegradable starch-based composite films reinforced with sugar palm fibres. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100639>
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2021). Development and characterization of biodegradable starch-based composite films reinforced with sugar palm fibres. *Food Packaging and Shelf Life*, 28, 100639. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100639>
- Shafiei, F. et alii. (2021). Fracture resistance of endodontically treated premolars restored with bulk-fill composite resins: The effect of fiber reinforcement, *Dental Research Journal*, 18(60), pp. 1-8.
- Shen, M., Zeng, Z., Song, B., Yi, H., Hu, T., Zhang, Y., & Chen, M. (2023). Microplastics in the food chain: A review on potential health risks. *Science of the Total Environment*, 865, 161075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161075>
- Souza, F., Almeida, J., & Santos, L. (2021). Structural and thermal properties of passion fruit peel flour. *International Journal of Food Properties*, 24(1), 1123-1135. <https://doi.org/10.1080/10942912.2021.1923342>
- V& Chen, M. (2023). Microplastics in the food chain: A review on potential health risks. *Science of the Total Environment*, 865, 161075. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161075>
- Yildiz, G., Tulay, E., & Turhan, K. N. (2022). Recent advances in starch-based biodegradable materials for food packaging. *Carbohydrate Polymers*, 291, 119592. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119592>
- Zhang, B., Li, X., & Xie, F. (2020). Recent advances in starch-based composites reinforced with plant-derived fibers: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 239, 116230. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116230>
- Zhang, B., Li, X., & Xie, F. (2020). Recent advances in starch-based composites reinforced with plant-derived fibers: Structure, properties and applications. *Carbohydrate Polymers*, 239, 116230. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116230>