

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE GRADO

ECO-FUNDA: ALTERNATIVA A LOS PLÁSTICOS, A PARTIR DE LA CORONILLA
DE LA PIÑA

AUTORES

MAIRA ALEJANDRA MACETA

NÍCOLAS GAVIRIA CASTILLO

TUTOR

LINA MARÍA CHACÓN RIVERA

BOGOTÁ D.C 2025

UNIVERSIDAD EAN

CONTENIDO

1. RESUMEN EJECUTIVO
2. INTRODUCCIÓN
3. ANTECEDENTES
4. DEFINICIÓN DEL PROBLEMA
5. OBJETIVO GENERAL
6. OBJETIVO ESPECIFICO
7. JUSTIFICACIÓN
8. MARCO DE REFERENCIA
9. ANÁLISIS DE REQUERIMIENTOS
10. ANÁLISIS DE RESTRICCIONES
11. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS
12. DISEÑO METODOLOGICO
13. RESULTADOS
14. ANÁLISIS DE COSTO
15. ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD
16. DISCUSIÓN DE RESULTADOS
17. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN
18. CONCLUSIÓN
19. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

INDICE DE TABLAS

- 1. TABLA 1. Requerimientos técnicos y normativos – prototipo Eco-Funda.**
- 2. TABLA 2 Comparación entre Restricciones e Incertidumbres en el proyecto Eco-Funda**
- 3. TABLA 3: Restricciones ambientales, económicas y legales**
- 4. TABLA 4 Comparación de alternativas de empaque**
- 5. TABLA 5: Contribución a los ODS el prototipo Eco-Funda**
- 6. TABLA 6 Aspectos e impacto ambientales del prototipo Eco-Funda**

INDICE DE FIGURAS

1. FIGURA 1. Materiales a utilizar para la creación de biopelícula.
2. FIGURA 2. Consumo energético por etapa.
3. FIGURA 3. Secado de coronilla de piña y lavado.
4. FIGURA 4. Triturado y tamizaje de la coronilla de piña.
5. FIGURA 5. Extracción de pectina de piña.
6. FIGURA 6. Extracción de almidón de piña.
7. FIGURA 7. Preparación de la solución plastificante.
8. FIGURA 8. Preparación de ingredientes para la formula.
9. FIGURA 9. Disolver la solución de glicerina al 1% en una olla hasta llegar a punto de burbuja.
10. FIGURA 10. Mezclar bien los ingredientes hasta quedar sin grumos, durante 10 min.
11. FIGURA 11. Engrases de molde con aceite de bebe.
12. FIGURA 12. Servir la mezcla en los recipientes.
13. FIGURA 13. Prueba de punción y llevado al horno domestico para secado de biopelícula.
14. FIGURA 14. Se pone a contra luz la biopelícula para ver su transparencia.
15. FIGURA 15. Termoformado de biopelícula.
16. FIGURA 16. Prueba físico mecánica de la biopelícula.
17. FIGURA 17. Prueba físico mecánica de permeabilidad.
18. FIGURA 18. Prueba físico mecánica de Compostabilidad.

19. FIGURA 19: Gatos de consumo energético por etapas.

20. FIGURA 20: Analisis de ACV SimPro

INDICE DE ANEXOS

- 1.** Anexo 1 Diseño 2 con los cálculos de los balances DOCUMENTO FINAL.pdf
- 2.** Anexo 2 Modelo financiero integral.
- 3.** Anexo 3 Simulador financiero especializado

Resumen ejecutivo

La producción y el uso de empaques plásticos de un solo uso constituyen un problema ambiental crítico debido a su persistencia y a la generación de micro plásticos que deterioran ecosistemas y afectan la salud humana. Cada año más de 11 millones de toneladas de plástico ingresan a ambientes acuáticos, mientras que la industria papelera continúa presionando la deforestación global (UNEP, 2021; WWF, s.f.). Este panorama exige alternativas basadas en recursos renovables y procesos de bajo impacto.

La coronilla de la piña se presenta como una biomasa agroindustrial subvalorada con alto contenido de pectina y celulosa, compuestos aptos para la elaboración de biopelículas biodegradables (Guancha-Chalapud, Serna-Cock & Tirado, 2022). En este marco, el proyecto Eco-Funda desarrolló un empaque biodegradable mediante la extracción y gelificación del polisacárido de la coronilla, plastificado con glicerina y conformado por solvent casting y termoformado para obtener una bandeja apta para alimentos secos.

Los resultados confirman la obtención de un material flexible, cohesivo y estructuralmente estable, adecuado para aplicaciones no expuestas a alta humedad, coherente con el comportamiento típico de matrices polisacáridicas (Md. Sazib, Roy & Islam, 2023). El proceso se alinea con la economía circular al valorizar un residuo local y reducir la dependencia de polímeros sintéticos, consolidando una alternativa ambientalmente viable para el reemplazo de empaques de un solo uso.

Palabras claves

Biopolímero; Residuo agroindustrial; Solvent Casting; Termoformado; Economía circular.

Introducción

La gestión de residuos provenientes de empaques de un solo uso constituye uno de los principales desafíos ambientales actuales, debido a su persistencia en los ecosistemas y a los impactos que generan sobre la calidad del aire, agua y suelo. La producción mundial de plásticos supera los 380 millones de toneladas al año, de las cuales cerca del 40% corresponde a empaques desechables con mínimas tasas de reciclaje. Una fracción importante termina en sistemas acuáticos, donde se fragmenta en microplásticos que alteran las cadenas tróficas y representan riesgos para la salud humana (UNEP, 2021). De forma paralela, la industria papelera demanda grandes volúmenes de biomasa forestal, ocasionando la pérdida de aproximadamente 4,7 millones de hectáreas por año y afectando la capacidad de regulación ecosistémica (WWF, s.f.).

Frente a este panorama, la agroindustria ofrece corrientes de biomasa subutilizada con potencial para la fabricación de materiales alternativos. La coronilla de la piña, que representa entre el 20% y el 30% del peso total del fruto, es rica en fibras lignocelulósicas y polisacáridos. En regiones productoras como Costa Rica, se generan alrededor de 135.000 toneladas anuales de residuos de piña, de los cuales un cuarto corresponde a coronillas (Agencia EFE, 2021; Md. Sazib, Roy & Islam, 2023). Investigaciones recientes confirman su idoneidad para la producción de biopolímeros aplicables en empaques biodegradables (Tirado et al., 2022).

En este contexto, el proyecto Eco-Funda plantea el desarrollo de una biopelícula obtenida a partir del extracto polisacárido de la coronilla de la piña, plastificada con glicerina

y conformada mediante solvent casting y termoformado para generar un empaque tipo bandeja destinado al almacenamiento de nueces. Esta propuesta se articula con los principios de economía circular y prevención en la fuente, al valorizar un residuo orgánico y reducir la dependencia de polímeros convencionales, contribuyendo así a la transición hacia sistemas productivos más sostenibles.

Antecedentes

La investigación en biopolímeros derivados de residuos agroindustriales ha destacado el uso de pectina y celulosa por su biodegradabilidad, disponibilidad y capacidad para formar películas funcionales (Thakur et al., 2019). La pectina produce biopelículas flexibles cuando se plastifica con glicerina (Coelho et al., 2021), mientras que la celulosa aporta refuerzo estructural y mejora la resistencia mecánica (Siró & Plackett, 2010).

Los residuos de piña han sido identificados como una fuente viable de fibras lignocelulósicas. Estudios demuestran que la coronilla contiene pectina y celulosa con potencial para elaborar biopelículas biodegradables (Guancha-Chalapud et al., 2022; Md. Sazib et al., 2023). Para su procesamiento, el solvent casting se reconoce como una técnica simple y eficaz para producir películas, mientras que el termoformado permite adaptarlas a formatos tridimensionales (Sanyang et al., 2016; Müller et al., 2020).

A pesar de su potencial, las matrices polisacáridicas presentan sensibilidad a la humedad, lo que requiere ajustes en plastificación y secado (Coelho et al., 2021). Ante este escenario, la coronilla de la piña surge como una materia prima idónea para desarrollar un empaque biodegradable que valore residuos y reduzca el uso de polímeros convencionales.

Definición del problema

La gestión de empaques de un solo uso sigue siendo un problema ambiental crítico debido a su alta producción y baja recuperación, además de la generación de microplásticos derivados de polímeros sintéticos de lenta degradación (UNEP, 2021). Aunque el papel y el cartón son alternativas renovables, su producción implica procesos industriales que contribuyen a la deforestación y la pérdida de servicios ecosistémicos (WWF, s.f.).

En paralelo, la agroindustria de la piña genera grandes cantidades de residuos, entre ellos la coronilla, una biomasa rica en polisacáridos y fibras lignocelulósicas con potencial para la fabricación de biomateriales (Guancha-Chalapud et al., 2022). Si bien existen estudios sobre biopelículas derivadas de estos compuestos, aún falta desarrollar prototipos tridimensionales funcionales con propiedades mecánicas adecuadas para su uso en empaque (Md. Sazib et al., 2023).

En consecuencia, el problema central consiste en la falta de alternativas biodegradables técnicamente viables que sustituyan empaques convencionales y aprovechen eficientemente los residuos agroindustriales disponibles en el país.

Objetivos

Objetivo General

Desarrollar un prototipo de bandeja biodegradable a partir del extracto polisacárido de la coronilla de la piña, plastificado y conformado mediante Solvent casting y termoformado como alternativa a empaques de un solo uso.

Objetivos Específicos

- Obtener el polisacárido estructural de la coronilla de la piña mediante tratamiento térmico y filtración para usarlo como matriz biopolimérica.
- Formular la mezcla biopolimérica incorporando el extracto de coronilla, glicerina y ácido benzoico para asegurar estabilidad y adecuada gelificación.
- Fabricar biopelículas por solvent casting, controlando temperatura, agitación y secado para lograr láminas uniformes.
- Termoformar la biopelícula para producir un prototipo de bandeja funcional para alimentos secos.
- Evaluar el desempeño del prototipo, analizando flexibilidad, resistencia mecánica, estabilidad dimensional y sensibilidad a la humedad para determinar su viabilidad como empaque biodegradable.

Justificación

La problemática ambiental generada por los empaques de un solo uso evidencia la necesidad de reemplazar polímeros sintéticos y materiales forestales por alternativas biodegradables. Los plásticos fósiles producen residuos persistentes y microplásticos, mientras que la producción de papel implica un uso intensivo de biomasa y energía (UNEP,

2021; WWF, s.f.). Este escenario exige materiales sostenibles, de bajo impacto y basados en recursos renovables.

La coronilla de la piña, residuo agroindustrial abundante, contiene pectina y celulosa con potencial para fabricar biopolímeros, permitiendo transformar un desecho de bajo valor en un insumo funcional bajo principios de economía circular (Guancha-Chalapud et al., 2022). Su aprovechamiento reduce la presión sobre ecosistemas forestales y disminuye la carga orgánica en cadenas productivas.

La producción de biopelículas por solvent casting y su conformado mediante termoformado representan métodos de bajo costo y fácil implementación. El proyecto Eco-Funda demuestra la viabilidad técnica de obtener un empaque biodegradable a partir de un recurso disponible en Colombia, contribuyendo a la Estrategia Nacional de Economía Circular y al Plan Nacional para la Gestión Sostenible de Plásticos de un Solo Uso (MinAmbiente, 2022).

Marco de referencia

ECO-FUNDA se sustenta en fundamentos conceptuales, normativos y contextuales que orientan el desarrollo de una bandeja biodegradable fabricada a partir del extracto polisacárido de la coronilla de la piña mediante Solvent casting y termoformado. Este marco integra los principios teóricos del uso de biopolímeros, el entorno regulatorio colombiano y las condiciones socioambientales actuales, justificando la pertinencia del prototipo como alternativa sostenible frente a los empaques plásticos de un solo uso en el país.

Biopolímeros

Son materiales naturales formados por macromoléculas de origen vegetal, animal o microbiano. Se caracterizan por su biodegradabilidad y menor impacto ambiental frente a polímeros sintéticos derivados del petróleo (Thakur et al., 2019).

Pectina y Celulosa

La pectina es un polisacárido gelificante presente en frutas, mientras que la celulosa es una fibra estructural que aporta resistencia mecánica. Ambos compuestos están presentes en altas concentraciones en la coronilla de la piña y permiten conformar matrices biopoliméricas estables (Guanha-Chalapud et al., 2022).

Plastificantes

La glicerina actúa como plastificante al aumentar la flexibilidad, reducir la fragilidad y facilitar el procesamiento de biopelículas mediante la modificación de la estructura interna del polímero (Coelho et al., 2021).

Solvent Casting

Técnica de fabricación que consiste en dispersar los componentes en solución, gelificar mediante calor y permitir el secado controlado para formar una película continua y homogénea (Sanyang et al., 2016).

Termoformado

Proceso de moldeo de láminas flexibles mediante calor y presión, utilizado para obtener geometrías tridimensionales como bandejas o envases (Müller et al., 2020).

Marco Normativo

En Colombia, el desarrollo de biomateriales a partir de residuos agroindustriales se enmarca en políticas que impulsan la transición hacia sistemas productivos sostenibles y la reducción de plásticos de un solo uso. Estas regulaciones respaldan directamente el desarrollo del prototipo ECO-FUNDA:

- **Estrategia Nacional de Economía Circular (MinAmbiente, 2019–2022):** Promueve la valorización de residuos orgánicos y la generación de nuevos materiales a partir de biomasa residual.
- **Ley 2232 de 2022:** Establece la eliminación progresiva de plásticos de un solo uso y fomenta alternativas fabricadas con materiales biodegradables o compostables.
- **Plan Nacional para la Gestión Sostenible de Plásticos de un Solo Uso (2022):** Define metas de reducción y transición hacia empaques con menor impacto ambiental.
- **Resolución 276 de 2015:** Regula el aprovechamiento de residuos orgánicos y facilita su transformación en bioproductos como biopolímeros o biopelículas.
- **NTC 5991 (ICONTEC):** Normaliza el uso de declaraciones ambientales como “biodegradable” o “compostable”, asegurando su respaldo mediante ensayos estandarizados.
- **Normas internacionales de biodegradabilidad y compostabilidad:** EN 13432, ISO 17088 y ASTM D5338 establecen criterios técnicos para evaluar la desintegración y comportamiento ambiental de materiales biodegradables. Tabla de requerimientos técnicos y normativos – ECO-FUNDA

La siguiente tabla resume los requerimientos técnicos aplicables al prototipo de bandeja biodegradable elaborado a partir del extracto polisacárido de la coronilla de la piña. Los parámetros se basan en normas internacionales para evaluar biodegradabilidad,

desintegración, propiedades mecánicas y estabilidad del material, considerando que el prototipo está destinado a usos generales de empaque biodegradable y no a contacto directo con alimentos.

Categoría	Norma / Referencia	Parámetro Evaluado	Criterio o Valor de Cumplimiento
Propiedades Mecánicas	ASTM D882 / ISO 527-3	Resistencia a la tensión	$\geq 20\text{--}30$ MPa (dependiendo del espesor y composición de biopolímeros naturales)
	ASTM D882 / ISO 527-3	Elongación a la rotura	$\geq 20\text{--}60\%$ (suficiente para termoformado sin fracturas)
Permeabilidad	ASTM F1249 / ISO 15106	WVTR (Permeabilidad al vapor de agua)	Valores ≤ 50 g/m ² ·día para biopolímeros hidrofílicos
	ASTM D3985 / ISO 15105-2	OTR (Permeabilidad al oxígeno)	≤ 500 cm ³ /m ² ·día·atm (apto para empaques

			secos o no herméticos)
Biodegradabilidad y Compostabilidad	EN 13432 / ISO 17088	Biodegradabilidad	≥ 90% conversión a CO ₂ en ≤ 180 días
	EN 13432	Desintegración física	≥ 90% < 2 mm en ≤ 12 semanas
		Ecotoxicidad	Sin efectos negativos en germinación
		Contenido de metales pesados	≤ límites establecidos (Cd, Cr, Pb, Hg)
Estabilidad y Estructura	ISO 1133 / ISO 527	Integridad estructural post-termoformado	Conservación de forma sin colapso a temperatura de uso
	ISO 62	Absorción de humedad	Evaluación según comportamiento higroscópico del material

TABLA 1. Requerimientos técnicos y normativos – prototipo ECO-FUNDA

Fuente: Elaboración propia en base de

- **Marco contextual**

Las investigaciones recientes confirman la viabilidad de producir biopelículas a partir de residuos agroindustriales como la coronilla de la piña, debido a su contenido de pectina, celulosa y fibras lignocelulósicas. Guancha-Chalapud et al. (2022) demostraron su aplicabilidad en biopolímeros, y Md. Sazib et al. (2023) obtuvieron biopelículas con propiedades mecánicas adecuadas para empaques de alimentos secos.

La literatura destaca como principal limitación la sensibilidad a la humedad de las matrices polisacáridicas, que puede mitigarse mediante plastificantes o recubrimientos (Coelho et al., 2021).

En síntesis, la coronilla de la piña es una materia prima viable para biopolímeros, y los procesos de solvent casting y termoformado constituyen rutas eficientes y sostenibles para fabricar empaques biodegradables.

Análisis de requerimientos

El desarrollo del prototipo de bandeja biodegradable a partir de coronilla de piña requiere definir claramente sus requerimientos funcionales y técnicos para orientar la formulación, el proceso de solvent casting, el termoformado y la evaluación final del material. Este análisis asegura que el prototipo cumpla con los objetivos del proyecto, evitando retrabajos y garantizando su desempeño dentro de las restricciones técnicas, ambientales y normativas.

Intención del Producto

El producto es una bandeja biodegradable elaborada a partir del extracto polisacárido de la coronilla de la piña, gelificada mediante la combinación de gelatina y glicerina y procesada por solvent casting y termoformado. Su propósito es funcionar como alternativa

sostenible a los empaques de un solo uso, con propiedades suficientes de flexibilidad, resistencia y estabilidad para el almacenamiento de alimentos secos.

Objetivos funcionales

- Sustituir empaques plásticos y de papel de un solo uso, en coherencia con la Ley 2232 de 2022 sobre transición hacia materiales sostenibles.
- Reducir impactos ambientales mediante aprovechamiento de residuos agroindustriales, conforme a la Estrategia Nacional de Economía Circular (MinAmbiente, 2019–2022).
- Cumplir requerimientos esenciales de resistencia mecánica, estabilidad dimensional y biodegradabilidad alineados con referencias técnicas como ASTM D882, EN 13432 e ISO 17088.

Usuarios finales

- Productores y distribuidores de alimentos secos o empacables.
- Consumidores y comercios que requieren empaques sostenibles, compostables y derivados de fuentes renovables.

1. Verificación de Requerimientos de Diseño

Para garantizar la funcionalidad del prototipo y su factibilidad técnica, deben verificarse los siguientes parámetros.

a) Materias primas

- **Coronilla de piña:** fuente de pectina y celulosa. Debe estar fresca, con mínima carga microbiológica y provenir de lotes consistentes para evitar variabilidad estructural del biopolímero.

- **Glicerina:** plastificante que mejora flexibilidad y previene fracturas del material.
- **Ácido benzoico:** inhibidor microbiano que evita hongos durante el secado.
- **Agua:** Medio dispersante y solvente en el sistema. Permite la hidratación de la gelatina, la dispersión homogénea de la glicerina y el ácido benzoico, y facilita la formación del gel previo al secado.
- **Gelatina sin sabor:** Actúa como biopolímero principal, formando la red tridimensional responsable de la estructura de la película. Aporta la matriz proteica que, al gelificar y secarse, genera una biopelícula continua.
- **Gelatina con sabor:** Actúa como biopolímero principal, formando la red tridimensional responsable de la estructura de la película. Aporta la matriz proteica que, al gelificar y secarse, genera una biopelícula continua.

Equipos y herramientas

- Bowl: Recipiente para mezclar los ingredientes.
- Horno doméstico: Acelera el secado de la biopelícula.
- Vaso precipitado 500 mL: Para medir, calentar y homogenizar volúmenes grandes.
- Vaso precipitado 25 mL: Para medir pequeños volúmenes.
- Jeringa 5 mL: Dosificación precisa de líquidos.
- Espátula de goma: Mezcla y remueve residuos adheridos.
- Espátula de aluminio: Nivelación de la mezcla y eliminación de burbujas.
- Sartenes: Calentamiento controlado de la mezcla.

- Balanza volumétrica: Medición precisa de masas/volúmenes.
- Termómetro eléctrico: Control de temperatura durante el calentamiento.
- Cucharas de medición: Dosificación estándar de ingredientes.
- Aceite de bebé: Desmoldante para evitar adherencias.
- Moldes de aluminio: Superficie donde se forma la biopelícula.
- Coladores: Tamizado para eliminar impurezas.
- Bolsas plásticas: Alternativa de molde para formar biopelículas

Condiciones operativas críticas

- Temperatura controlada entre 70–90 °C para evitar la degradación del polímero.
- Agitación constante para asegurar homogeneidad y evitar grumos.
- Secado en ambiente ventilado y de baja humedad para formar una película uniforme.
- Parámetros de termoformado ajustados para asegurar rigidez sin deformaciones.
- Eliminación de burbujas antes del vertido para evitar defectos.
- Moldes lubricados con aceite de bebé para facilitar el desmoldeo.
- Vertido y nivelación uniforme de la mezcla caliente para obtener un espesor homogéneo.

Requerimientos Funcionales Esperados

A partir de esta formulación y proceso, se establecen los siguientes criterios de éxito:

- **Biopelícula continua:** Sin fisuras, grietas ni rupturas evidentes, lo que indica una buena gelificación y secado adecuado.
- **Superficie homogénea:** Sin presencia significativa de burbujas atrapadas, grumos o zonas de espesor irregular.
- **Flexibilidad suficiente para manipulación:** La película debe poder levantarse del molde, doblarse suavemente y manejarse con las manos sin quebrarse de inmediato.
- **Resistencia mecánica básica:** Debe soportar su propio peso y una manipulación ligera (tensión moderada con los dedos) sin desgarrarse fácilmente.
- **Estabilidad dimensional:** La forma general debe mantenerse, sin deformarse en exceso con el simple manejo manual.

Este análisis establece la hoja de ruta para la formulación experimental y evita modificaciones tardías, asegurando que el prototipo final cumpla su función técnica, ambiental y normativa.

Análisis de restricciones

En proyectos de ingeniería, la viabilidad del diseño depende de restricciones ambientales, técnicas, normativas, económicas y sociales. En el desarrollo del prototipo de biopelícula y bandeja biodegradable a partir de gelatina sin sabor y de limón, glicerina, agua y ácido benzoico, es fundamental identificar estas limitaciones para evitar fallos posteriores, garantizar replicabilidad y asegurar que el producto cumpla con los requisitos técnicos y legales en Colombia.

A continuación, se sintetizan las principales restricciones que pueden afectar el proceso, el desempeño del material y su futura adaptación hacia un prototipo optimizado con coronilla de piña.

Categoría	Restricciones (fijas o normativas)	Incertidumbres (variables o contextuales)
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Cumplimiento de la Ley 2232 de 2022 sobre sustitución de plásticos. • Correcta disposición de residuos líquidos y orgánicos generados en la preparación. • No uso de sustancias prohibidas o peligrosas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variación en humedad y temperatura que afectan el secado. • Condiciones del entorno donde se realiza el secado. • Cambios regulatorios en criterios de biodegradabilidad.
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Presupuesto limitado para ensayos técnicos avanzados. • Restricción en adquisición de 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluctuación de precios de glicerina y gelatina. • Cambios en costes energéticos uso de

	<p>equipos especializados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Costos de certificaciones futuras. 	<p>sartenes de diferentes tamaños</p> <ul style="list-style-type: none"> • Variabilidad económica que afecte disponibilidad de insumos.
Legales / Normativas	<ul style="list-style-type: none"> • Alineación con la Estrategia Nacional de Economía Circular. • Restricción de declaraciones ambientales sin ensayos (NTC 5991). • Cumplimiento de normativas institucionales de laboratorio. 	<ul style="list-style-type: none"> • Eventuales cambios futuros en normativas de biodegradabilidad. • Requisitos adicionales para certificación en caso de escalado. • Incertidumbre en tiempos de aprobación de licencias si se industrializa.
Técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de mezcla homogénea sin grumos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Variación entre lotes de gelatina (color, viscosidad).

	<ul style="list-style-type: none"> • Control térmico para prevenir degradación de gelatina. • Secado uniforme para evitar fracturas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Formación inesperada de burbujas. • Fallas de reproducibilidad entre una preparación y otra.
Salud y seguridad	<ul style="list-style-type: none"> • Manipulación segura de mezcla caliente. • Dosificación segura de ácido benzoico. • Mantenimiento de superficies limpias para evitar contaminación. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quemaduras por manejo inadecuado de recipientes. • Irritaciones por contacto accidental con ácido benzoico. • Variaciones en limpieza del entorno de secado.
Sociales / de mercado	<ul style="list-style-type: none"> • Usuarios pueden preferir materiales rígidos similares al plástico. • Sensibilidad del consumidor frente a materiales 	<ul style="list-style-type: none"> • Aceptación variable del prototipo. • Cambios en hábitos y demanda de empaques sostenibles.

Tabla 2. Comparación entre Restricciones e Incertidumbres en el proyecto Eco-Funda

	<p>biodegradables poco convencionales.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Percepción del mercado frente a materiales naturales.
--	--	---

Análisis Restricciones, Incertidumbre y Evaluación de la solución

Restricciones vs. Incertidumbre

El diseño del prototipo ECO-FUNDA, basado en la elaboración de una biopelícula experimental mediante gelatina sin sabor y sabor limón, glicerina, agua y ácido benzoico, está sujeto a un conjunto de restricciones y fuentes de incertidumbre que influyen en su desempeño, escalabilidad y eventual aplicación como empaque biodegradable.

Las restricciones corresponden a condiciones fijas, generalmente normativas o técnicas, mientras que las incertidumbres representan variaciones contextuales que pueden cambiar en función del ambiente, la disponibilidad de recursos o el comportamiento del mercado.

Especificaciones de clientes y partes interesadas

Las necesidades de los actores que participan o se verán involucrados en el desarrollo del prototipo ECO-FUNDA determinan los criterios funcionales y ambientales que debe cumplir el material para ser viable dentro del contexto colombiano. En esta etapa del proyecto, las especificaciones se abordan como expectativas para un futuro prototipo avanzado, pues el experimento actual con gelatina corresponde a una fase de exploración preliminar.

- **Seguridad alimentaria (aplicable a fases futuras)**

Si el empaque se destinara a alimentos secos, deberá cumplir la Resolución 683 de 2012 (INVIMA) y regulaciones internacionales como Reg. 1935/2004 y EN 1186, que establecen límites de migración y uso seguro de materiales en contacto con alimentos.

- **Sostenibilidad ambiental**

El material final debe ser biodegradable y compostable siguiendo referencias técnicas como EN 13432 e ISO 17088 (European Committee for Standardization, 2000; ISO, 2003). La formulación actual con gelatina, glicerina y agua es biodegradable por naturaleza, pero requiere validación experimental de su desintegración y estabilidad.

- **Desempeño técnico funcional**

El prototipo debe presentar:

- a. Superficie homogénea sin fisuras
- b. Flexibilidad controlada por la glicerina
- c. Estabilidad dimensional tras el secado
- d. Resistencia básica suficiente para manipulación

Estas características se inspiran en normas como ASTM D882, utilizadas como referencia general en biopelículas.

- **Aceptación del usuario final**

Los consumidores valoran cada vez más empaques sostenibles; sin embargo, su aceptación depende de percibir:

- a. Ligereza
- b. Usabilidad

- c. Apariencia limpia
- d. Material con sensación agradable al tacto
- e. Ausencia de fragilidad

Requerimientos técnicos y de usuario susceptibles de modificación

Durante el desarrollo experimental del prototipo ECO-FUNDA, existen parámetros que se pueden ajustar para optimizar el desempeño:

- **Viabilidad económica**

Los costos del proceso deben mantenerse bajos para garantizar escalabilidad futura.

Factores económicos clave son:

- a. Disponibilidad de ingredientes
- b. Costos de glicerina y gelatina
- c. Tiempo de secado
- d. Costo energético del calentamiento

En este contexto, las especificaciones actúan como restricciones fijas, pero también generan incertidumbres debido a variaciones en regulación, disponibilidad de insumos y comportamiento del usuario (Nieto et al., 2022).

Requerimientos técnicos y de usuario susceptibles de modificación

Durante el desarrollo experimental del prototipo ECO-FUNDA, existen parámetros que se pueden ajustar para optimizar el desempeño:

- **Variación del biopolímero base**

Aunque en esta etapa se usa gelatina, en fases futuras la proporción de pectina/celulosa extraída de coronilla de piña puede cambiar según:

- a. Temporada,
 - b. Madurez del fruto,
 - c. prácticas agrícolas.
- **Nivel de plastificación (glicerina)**

A mayor glicerina:

- a. Mayor flexibilidad,
- b. Menor resistencia,
- c. Mayor tendencia a pegajosidad.

Este parámetro es uno de los más críticos y ajustables.

- **Condiciones de secado (Solvent casting)**

La humedad y el flujo de aire pueden generar:

- a. Grietas.
- b. Diferencias de espesor
- c. Tiempo de secado de variables

El control ambiental es una incertidumbre inherente a la experimentación.

- **Temperatura y presión de termoformado**

Dependen de la homogeneidad de la biopelícula. Al variar el espesor, también cambia la presión requerida.

Tipo de restricción	Descripción y alcance en el proyecto
Ambientales	<ul style="list-style-type: none"> • Manejo adecuado de residuos y aguas de lavado. • Secado dependiente de la humedad ambiental. • Prohibición de sustancias tóxicas o no biodegradables según normativa colombiana. • Compatibilidad futura con compostabilidad (EN 13432).
Económicas	<ul style="list-style-type: none"> • Limitación de presupuesto para ensayos avanzados. • Variación en precios de glicerina, gelatina y energía. • Recursos de laboratorio limitados para pruebas piloto. • Costos futuros de extracción de polisacáridos de coronilla de piña.
Legales / NORMATIVAS	<ul style="list-style-type: none"> • Limitación de presupuesto para ensayos avanzados.

	<ul style="list-style-type: none"> • Variación en precios de glicerina, gelatina y energía. • Recursos de laboratorio limitados para pruebas piloto. • Costos futuros de extracción de polisacáridos de coronilla de piña.
Técnicas	<ul style="list-style-type: none"> • Necesidad de mezcla homogénea sin grumos. • Control térmico estricto para evitar degradación de gelatina. • Eventos no controlados (burbujas, espesor desigual). • Riesgos de deformación durante el termoformado.
Socioculturales	<ul style="list-style-type: none"> • Preferencia del usuario por materiales rígidos tipo plástico. • Percepción de fragilidad de bioplásticos experimentales. • Cambios en tendencias del consumidor hacia sostenibilidad.

TABLA 3: Restricciones ambientales, económicas y legales.

Fuente: Elaboración propia

Análisis de alternativas

Para la selección de la formulación más adecuada del prototipo ECO-FUNDA se evaluaron cuatro alternativas de biopelículas y biocompuestos, todas basadas en el uso de polvo de coronilla de piña y ácido benzoico, combinados con diferentes matrices filmógenas (gelatina, agar, gelatina de sabor y sin sabor y PLA) y con glicerina como plastificante.

El análisis comparativo consideró criterios de biodegradabilidad, complejidad del proceso, costo, uso de residuos agroindustriales, propiedades mecánicas esperadas, estabilidad frente a la humedad, aceptación social y alineación con el objetivo general del proyecto orientado a la valorización de la coronilla de piña y la sustitución de empaques de un solo uso.

Tabla de comparación de alternativas

Criterio	Alternativa 1: Agua glicerina + gelatina sin y con sabor + ácido benzoico + polvo de coronilla + ácido benzoico + Pectina de piña	Alternativa 2: Agua + glicerina + agar + gelatina sabor limón + polvo de coronilla	Alternativa 3 + Agua + solución de glicerina al 10% + gelatina de pata + polvo de coronilla	Alternativa 4: Biopelícula / biocompuesto de PLA + polvo de coronilla de piña + ácido benzoico y glicerina
-----------------	--	---	--	---

Biodegradabilidad	Alta biodegradabilidad en ambientes naturales; todos los componentes son orgánicos y degradables.	Alta biodegradabilidad; agar y gelatina son materiales naturales fácilmente degradables.	Alta biodegradabilidad, pero basada en proteína animal (puede repercutir en percepción y requisitos sanitarios).	Biodegradable principalmente en condiciones de compostaje industrial; en ambiente natural la degradación es más lenta.
Complejidad del proceso	Baja–media: calentamiento, disolución de componentes, mezclado, vertido en moldes y secado (proceso similar al ya realizado).	Media: requiere disolver correctamente agar (mayor temperatura y control) y gelatina, controlando viscosidad y gelificación.	Baja–media: proceso de mezcla y calentamiento sencillo, aunque la gelatina de pata puede requerir pretratamiento.	Alta: requiere extrusión o mezclado en fundido, control de temperatura y, en algunos casos, equipo especializado
Costo de producción	Bajo: insumos de uso común (gelatina, glicerina, coronilla en polvo) y equipo	Bajo–medio: el agar suele ser más costoso que la gelatina, pero sigue siendo	Bajo: la gelatina de pata puede ser económica, aunque requiere manejo cuidadoso.	Medio–alto: el PLA es más costoso y el procesamiento requiere mayor

	doméstico/laboratorio básico.	manejable a escala de laboratorio.		consumo energético y posiblemente maquinaria específica.
Uso de residuos Agroindustriales	Alto: el polvo de coronilla se integra como fase vegetal de refuerzo en la biopelícula.	Alto: la coronilla se incorpora también como carga vegetal dentro de la matriz mixta.	Alto: la coronilla forma parte de la formulación, aunque la matriz sigue siendo proteica animal.	Alto: el polvo de coronilla actúa como refuerzo lignocelulósico en una matriz de PLA; valorización del residuo como carga.
Propiedades de barrera	Buena flexibilidad gracias a la glicerina; resistencia moderada. El polvo de coronilla puede aumentar rigidez si se controla bien su proporción.	Estructura potencialmente más firme por el agar; mejor resistencia, pero riesgo de menor flexibilidad si el	Buena resistencia mecánica por la gelatina de pata, pero puede resultar más rígida y menos elástica; requiere	Buenas propiedades mecánicas (PLA); alta resistencia, menor flexibilidad sin plastificante; el

		plastificante es insuficiente.	optimización de glicerina.	polvo de coronilla puede modificar el módulo elástico.
Estabilidad frente a humedad	Media-baja: gelatina y coronilla son hidrofílicas; el material es sensible a ambientes muy húmedos, recomendado para usos secos.	Media: agar aporta mayor estabilidad estructural, pero el sistema sigue siendo sensible a humedad.	Media: la matriz proteica presenta absorción de agua; requiere condiciones de almacenamiento controladas	Media-alta para gases y humedad, dependiendo de la formulación; el PLA es más hidrofóbico que las matrices proteicas, aunque el polvo de coronilla puede aumentar la absorción.

<p>Aceptación social</p>	<p>Buena: insumos reconocibles, uso de residuos vegetales; el origen animal de la gelatina es socialmente aceptado en la mayoría de contextos.</p>	<p>Buena: uso de agar (de origen marino) y gelatina; percibido como “natural”, aunque algo más cercano al ámbito alimentario.</p>	<p>Potencialmente más cuestionable: fuerte componente animal (gelatina de pata), puede chocar con preferencias veganas o ciertas creencias.</p>	<p>Buena percepción de “bioplástico” sostenible; sin embargo, algunos usuarios pueden desconfiar si solo es compostable en condiciones industriales.</p>
<p>Contribución a ODS</p>	<p>Alta: incorpora polvo de coronilla y es coherente con el enfoque de prototipo biodegradable y experimental.</p>	<p>Escalable, pero requiere mayor control de proceso (temperatura de agar, viscosidad); útil para demostración.</p>	<p>Media: usa coronilla, pero la narrativa de valorización vegetal se diluye frente al uso de gelatina de pata.</p>	<p>Alta en cuanto a uso de coronilla y enfoque en sustitución de plásticos, pero la matriz es PLA, no derivada de coronilla; la</p>

				coronilla actúa como refuerzo, no como matriz principal.
Cumplimiento normativo	Buena a nivel piloto; el proceso se puede adaptar a moldes y bandejas con ajustes en secado y espesores.	Escalable, pero requiere mayor control de proceso (temperatura de agar, viscosidad); útil para demostración.	Escalable técnicamente, pero cuestionable por su base animal si se apunta a mercados de sostenibilidad vegetal.	Alta escalabilidad industrial (propia del PLA), pero con mayor dependencia de maquinaria, energía y cadena de suministro de biopolímeros comerciales.

TABLA 4 Comparación de alternativas de empaque

Fuente: Elaboración propia con base en Guancha-Chalapud et al. (2022); Patiño y López (2021); Restrepo y Gómez (2020).\

DISEÑO METODOLOGICO

El diseño metodológico para el desarrollo del prototipo ECO-FUNDA se estructura a partir de un proceso sistemático de selección, descarte, verificación y validación

experimental. Aunque se exploraron cuatro alternativas formuladas con distintas bases filmógenas, la selección final correspondió a la Alternativa 1, compuesta por agua, glicerina, gelatina sin sabor y con sabor, ácido benzoico y polvo de coronilla de piña, por ser la que mejor cumple criterios de viabilidad técnica, económica, ambiental y de coherencia con el objetivo del proyecto.

De acuerdo con los lineamientos de diseño de ingeniería, el proceso metodológico comprende:

- Identificación y descarte de soluciones ilógicas
- Comparación con hechos conocidos
- Evaluación comparativa de alternativas
- Desarrollo del prototipo
- Validación experimental
- Optimización y consolidación de la solución

Soluciones Ilógicas

En esta etapa se descartan formulaciones que no cumplen principios básicos de comportamiento material, viabilidad práctica o coherencia con el marco normativo.

Se descartaron como soluciones ilógicas:

- Mezclas que no gelifican o no generan estructura (por incompatibilidad entre componentes).
- Formulaciones que requerían equipamiento industrial no disponible (extrusión de PLA).
- Combinaciones altamente inestables o inseguras para manipulación manual.

- Alternativas sin coherencia con el objetivo central del proyecto (valorización de la coronilla de piña).

Esta etapa permitió depurar el conjunto de alternativas hacia soluciones realmente viables para el laboratorio.

Comparación con Hechos Conocidos

Cada alternativa se evaluó frente a:

- Literatura científica sobre biopelículas de gelatina, agar y matrices proteicas/polisacarídicas.
- Experiencias previas del equipo, que confirmaron que la mezcla gelatina + glicerina produce películas homogéneas, flexibles y termoformables.
- Propiedades conocidas de cada material:
 - a. La gelatina gelifica entre 40–60 °C y forma películas continuas.
 - b. La glicerina actúa como plastificante eficiente en matrices proteicas.
 - c. El polvo de coronilla es lignocelulósico y mejora rigidez.
 - d. El ácido benzoico previene hongos durante el secado.

Esta comparación permitió identificar la opción de mayor estabilidad y reproducibilidad experimental.

Evaluación de Alternativas

Alternativas evaluadas

- Alternativa 1 (Seleccionada Alternativa 1: Agua glicerina + gelatina sin y con sabor + ácido benzoico + polvo de coronilla + ácido benzoico + Pectina de piña Alternativa 2: Agua + glicerina + agar + gelatina con sabor + ácido benzoico + polvo de coronilla
- Alternativa 3: Agua + solución de glicerina al 10 % + gelatina de pata + ácido benzoico + coronilla
- Alternativa 4: PLA + polvo de coronilla + ácido benzoico

Criterios de evaluación

- Biodegradabilidad
- Complejidad del proceso
- Costo
- Homogeneidad y estabilidad de película
- Facilidad de termoformado
- Aceptación social
- Uso eficiente del residuo (coronilla)
- Disponibilidad de insumos
- Compatibilidad con equipos reales del laboratorio

Conclusiones de la evaluación

- La Alternativa 4 (PLA) se descartó: requiere extrusión y compostaje industrial.
- La Alternativa 3 (gelatina sin sabor) presenta olor, turbidez y menor aceptación social.

- La Alternativa 2 (agar + gelatina) requiere alta temperatura y control viscoso, difícil de estandarizar.
- La Alternativa 1 es la más coherente, reproducible y estable.

Por ello, se adoptó como formulación definitiva para el desarrollo del prototipo.

Desarrollo de la Solución Seleccionada (Alternativa 1)

Fase 1 – Preparación de la Coronilla y Reactivos

Equipos reales utilizados:

- Bowl, vasos precipitados de 500 mL y 25 mL
- Jeringa de 5 mL
- Espátulas de goma y aluminio
- Sartén para calentamiento
- Termómetro digital
- Balanza volumétrica
- Cucharas de medición
- Moldes de aluminio (27 × 20,5 × 5,5 cm)
- Aceite de bebé (desmoldante)



PASO 7: Elementos utilizados para la creación de las biopelículas



FIGURA 1. Materiales a utilizar para la creación de biopelícula.

(Fuente propia, 2025)

Procedimiento:

- Lavar, pelar y cortar la coronilla.
- Secar en un horno durante 2 días y triturar hasta obtener polvo fino de coronilla, y después se realiza el proceso de tamizado para obtener polvo fino de la coronilla.
- Se pone a calentar el agua y se le agrega 10 mL de ácido cítrico, una vez el ácido cítrico está disuelto, se le agrega la cascara de piña y la coronilla. Se deja calentar hasta 80 grados y se mantiene la temperatura por 90 minutos, hasta obtener un agua lechosa. Después se separan las cascara y la coronilla de piña.
- Se realiza el proceso para la obtención del almidón extraído del jugo de piña.
- Se realizó una solución de glicerina al 1%, en donde se midió un litro de agua y se adicionaron 10 mL de glicerina, para obtener una solución de glicerina al 1%. Se toman 60 mL de la solución al 1% de glicerina.
- Medir gelatina sin sabor y con sabor, 10 gramos.

- Agregamos una cucharada de 5 mL de almidón gelificado de piña, 2 mL de pectina y una pizca de polvo de coronilla y de ácido benzoico.

Fase 2 – Formulación y Mezcla (80°C)

- Se toma 60 g de la solución de glicerina al 1% y se vierte en la olla, y la dejamos alcanzar punto de burbuja, luego mezclamos 2 mL de pectina, la pizca de polvo de coronilla de piña, mas una pizca de acido benzoico y la gelatina en polvo en la solución. Batir seguidamente sin dejar ni un grumo en la mezcla.
- Calentar la mezcla en sartén a 80–90 °C durante 10 minutos y con un termómetro llevar la temperatura, hasta obtener matriz homogénea y espesa. Luego retirarla del fogón.

Fase 3 – Fabricación del Prototipo (Solvent Casting)

- Engrasar moldes de aluminio con aceite de bebé, aplicar una gota para evitar que la biopelícula se pegue a la bandeja.
- Verter la mezcla caliente.
- Nivelar espesor con espátula. Retirar burbujas con cuchara. Se repitió el proceso 3 veces más, usando otros métodos de moldeado, como bolsas plásticas con aceite de bebe, una tapa plástica y moldeando la mezcla con papel encerado de cocina, se paso por una maquina para hacer pasta, explorando nuevas formas de tener uniformidad.

Fase 4 – Secado

Procedemos a hacer una prueba de punción para saber si la mezcla ya esta lista desmoldar.

- Después de que la mezcla esta lista para desmoldear, procedemos a ingresar nuestra bandeja de aluminio al horno doméstico, controlada a 40° grados centígrados durante 6 horas, teniendo intervalos de 10 minutos para hacer apertura de la puerta y así liberar la humedad liberada por la biopelícula.
- Condiciones: buena ventilación, baja humedad.

Fase 5 – Termoformado

- Calentar suavemente la biopelícula para ablandarla.
- Moldear manualmente o usando molde secundario para obtener forma de bandeja.

Caracterización y Validación

Se aplican las siguientes pruebas físico mecánicas caseras para determinar la calidad de la biopelícula seleccionada como alternativa a realizar.

- Espesor: ASTM D374
- Tensión y elongación: ASTM D882:
- Rasgado: ASTM D1922
- Permeabilidad: ASTM D3985
- Biodegradabilidad: EN 13432
- Compostabilidad ASTM D5338

Evaluación cualitativa:

- Flexibilidad
- Resistencia manual
- Estabilidad dimensional

- Transparencia,
- Homogeneidad.

Optimización Final

Según resultados:

- Si está rígida aumentar glicerina
- Si se rompe aumentar gelatina
- Si está húmeda o pegajosa aumentar tiempo de secado
- Si queda muy frágil ajustar coronilla al 5–10 %

Tipo de Solución Aceptada y Recursos Implicados

Tipo de Solución:

Prototipo experimental de película biodegradable basado en gelatina + glicerina + polvo de coronilla, elaborado mediante Solvent casting y termoformado artesanal.

Recursos utilizados:

- **Humanos:** Estudiantes ingeniería ambiental y química.
- **Económicos:** Bajo costo (gelatina, glicerina, ácido benzoico)
- **Técnicos:** Equipos básicos de laboratorio
- **Tiempo:** 2–4 días (formulación + secado + termoformado)

Implicaciones:

- Reduce impactos ambientales.
- Aprovecha un residuo agroindustrial de alta disponibilidad.

- Fortalece la economía circular.
- Permite escalar el proyecto hacia formulaciones más robustas en el futuro.

RESULTADOS

A continuación, se detalla la metodología experimental implementada para el desarrollo de la biopelícula biodegradable, con un enfoque en la sostenibilidad y el aprovechamiento de recursos. El proceso se centra en la Alternativa 3 (Pectina/Celulosa + Glicerina), la cual fue seleccionada por su alineación con los principios de la economía circular y su favorable perfil ambiental.

Las siguientes fases describen el procedimiento sistemático que se siguió, desde la valorización de los residuos agroindustriales de piña como materia prima, hasta la caracterización exhaustiva del prototipo final, con el objetivo de validar su viabilidad técnica y su potencial como material de empaque sostenible.

1. Preparación del Extracto de Piña

En primer lugar, se realizó un proceso de pretratamiento físico de la coronilla de la piña para garantizar la remoción de impurezas y obtener la fibra vegetal en condiciones óptimas para su incorporación en la matriz filmógena. El procedimiento consistió en:

- A. Lavado, pelado y corte de la coronilla:** La coronilla se lavó con abundante agua potable para eliminar suciedad superficial, y posteriormente se peló y cortó en fragmentos pequeños para facilitar el secado y la molienda.



FIGURA 2. Recolección de coronilla de piña y lavado.
(Fuente propia,2025)

B. Secado de la coronilla: Los fragmentos se dispusieron en bandejas y se secaron en horno durante 2 días, garantizando la eliminación de humedad libre y evitando degradación microbiana.



FIGURA 3. Secado de coronilla de piña y lavado.
(Fuente propia,2025)

C. Trituración y tamizado: Una vez seca, la coronilla se trituró manualmente y se sometió a tamizaje fino con el fin de obtener un polvo homogéneo, que funcionó como refuerzo lignocelulósico dentro de la biopelícula.



FIGURA 4. Triturado y tamizaje de la coronilla de piña
(Fuente propia,2025)

Este polvo proporciona rigidez, mejora la textura y contribuye al aprovechamiento del residuo agroindustrial.

2. Extracción del componente funcional de la piña (almidón y pectina)

Con el propósito de enriquecer la matriz filmógena con polisacáridos naturales provenientes de la piña, se realizó un proceso paralelo de extracción:

- **Preparación de medio ácido:** Se calentó agua y se adicionaron 10 mL de ácido cítrico, asegurando una solubilización completa
- **Extracción ácido-calor:** Se agregaron las cáscaras y la coronilla de piña al medio ácido, manteniendo la mezcla a 80 °C durante 90 minutos. Esta condición permite la liberación de pectina y almidón, generando una solución turbia o “lechosa”.
- **Separación de sólidos:** Tras el calentamiento prolongado, las cáscaras y fragmentos fibrosos se retiraron, dejando únicamente el extracto rico en polisacáridos.



FIGURA 5. Extracción de pectina de piña
(Fuente propia,2025)

- **Obtención de almidón de piña:** Del jugo de piña se extrajo almidón mediante reposo y decantación, obteniendo un gel viscoso que mejora la cohesión interna de la película.



FIGURA 6. Extracción de almidón de piña.

(Fuente propia, 2025)

3. Formulación y Preparación de la solución plastificante

Objetivo: Para controlar la flexibilidad del material, se elaboró una solución al 1 % de glicerina, siguiendo los pasos:

- Se midió 1 litro de agua,
- Se adicionaron 10 mL de glicerina,
- La mezcla se homogenizó completamente.



FIGURA 7. Preparación de la solución plastificante

(Fuente propia, 2025)

De esta solución se tomaron 60 mL para la formulación final. La glicerina actúa como plastificante, reduciendo la fragilidad de la gelatina.

4. Formulación de la mezcla filmógena

Objetivo: Medir con precisión cada componente para garantizar reproducibilidad.

- 10 g de gelatina sin sabor + gelatina con sabor (50/50)
- 5 mL de almidón gelificado de piña
- 2 mL de pectina extraída
- Pizca de polvo fino de coronilla
- Pizca de ácido benzoico (preservante)
- 60 g de solución de glicerina al 1 %



FIGURA 8. Preparación de ingredientes para la formula.

(Fuente propia, 2025)

Procedimiento:

- En una olla se vertieron los 60 g de la solución de glicerina.
- La mezcla se calentó hasta alcanzar el punto de burbuja.
- Se adicionaron la pectina, el polvo de coronilla, el ácido benzoico y finalmente la gelatina en polvo.

- Se batió continuamente para evitar la formación de grumos y asegurar la hidratación completa de la gelatina.



FIGURA 9. Disolver la solución de glicerina al 1% en una olla hasta llegar a punto de burbuja
(Fuente propia, 2025)

5. Gelificación y homogenización térmica

Para lograr la formación de una matriz filmógena estable:

- Se transfirió la mezcla a una sartén.
- Se calentó a 80–90 °C durante 10 minutos, controlando la temperatura con un termómetro digital.
- Se mezcló constantemente hasta obtener una consistencia viscosa, uniforme y libre de burbujas.
- Una vez homogenizada, la mezcla se retiró del fogón.



FIGURA 10. Mezclar bien los ingredientes hasta quedar sin grumos, durante 10 min
(Fuente propia, 2025)

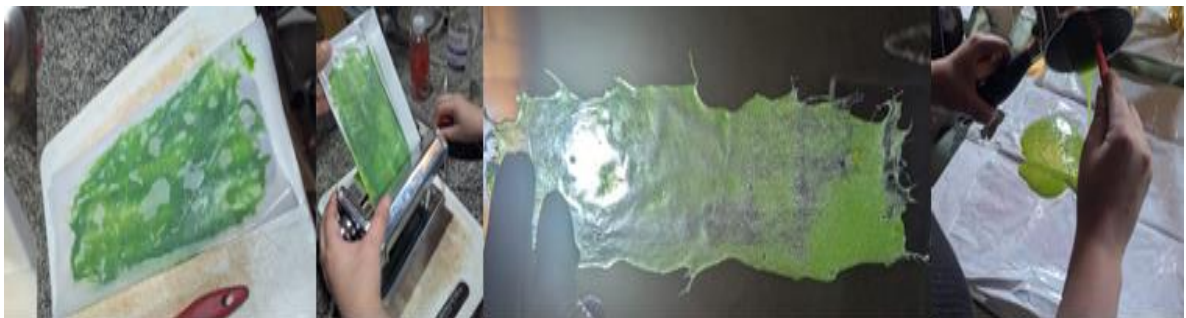
6. Fabricación del Prototipo (Solvent Casting)

- Engrasar moldes de aluminio con aceite de bebé, aplicar una gota para evitar que la biopelícula se pegue a la bandeja.



FIGURA 11. Engrases de molde con aceite de bebe
(Fuente propia, 2025)

- Verter la mezcla caliente.
- Nivelar espesor con espátula. Retirar burbujas con cuchara. Se repitió el proceso 3 veces más, usando otros métodos de moldeado, como bolsas plásticas con aceite de bebe, una tapa plástica y moldeando la mezcla con papel encerado de cocina, se pasó por una máquina para hacer pasta, explorando nuevas formas de tener uniformidad.





se formaron pellets de la mezcla

FIGURA 12. Servir la mezcla en los recipientes.

(Fuente propia, 2025)

7. Secado

- Procedemos a hacer una prueba de punción para saber si la mezcla ya esta lista desmoldar.
- Después de que la mezcla esta lista para desmoldear, procedemos a ingresar nuestra bandeja de aluminio al horno doméstico, controlada a 40° grados centígrados durante 6 horas, teniendo intervalos de 10 minutos para hacer apertura de la puerta y así liberar la humedad liberada por la biopelícula.
- Condiciones: buena ventilación, baja humedad.

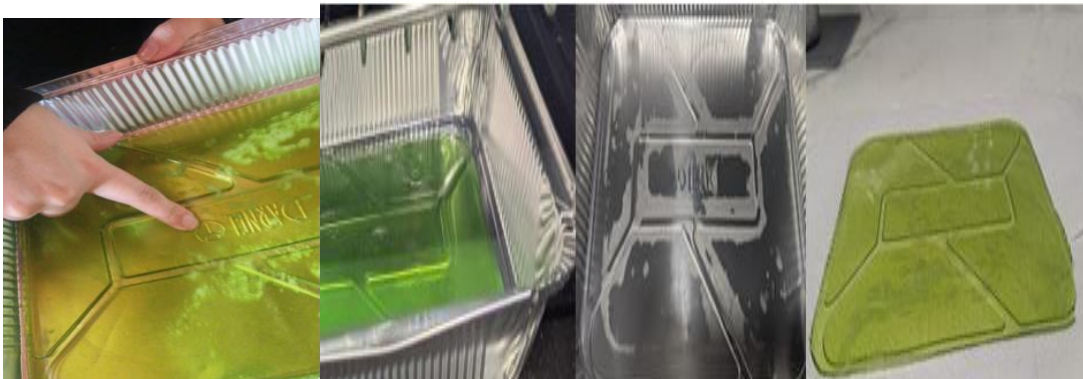


FIGURA 13. Prueba de punción y llevado al horno domestico para secado de biopelícula

(Fuente propia, 2025)

8. Revisión de transparencia

- Se retira la biopelícula del molde y se pone a contra luz para revisar la transparencia que tiene la biopelícula.



FIGURA 14. Se pone a contra luz la biopelícula para ver su transparencia

(Fuente propia, 2025)

9. Termoformado

- Calentar suavemente la biopelícula para ablandarla.
- Moldear manualmente o usando molde secundario para obtener forma de bandeja.



FIGURA 15. Termoformado de biopelícula.

(Fuente propia, 2025)

10. Caracterización y Validación

Se aplican las siguientes pruebas físico mecánicas caseras para determinar la calidad de la biopelícula seleccionada como alternativa a realizar.

- Rasgado: ASTM D1922



FIGURA 16. Prueba físico mecánica de la biopelícula.

(Fuente propia, 2025)

- Permeabilidad: ASTM D3985



FIGURA 17. Prueba físico mecánica de permeabilidad.

(Fuente propia, 2025)

- Compostabilidad ASTM D5338/ Biodegradabilidad: EN 13432



FIGURA 18. Prueba físico mecánica de Compostabilidad

(Fuente propia, 2025)

ANÁLISIS DE COSTOS

La evaluación de la viabilidad económica es un pilar fundamental en el desarrollo de proyectos de ingeniería, ya que permite determinar la sostenibilidad y rentabilidad de la implementación a escala real. En el marco del presente proyecto, se realizó un análisis financiero exhaustivo para la producción industrial de bolsas compostables a partir de biopolímeros de coronilla de piña.

Este análisis se estructuró en dos componentes principales: la cuantificación de la inversión capital y la estimación de costos operativos (OPEX), seguido de la proyección de flujos de caja y el cálculo de indicadores de rentabilidad.

Para ello, se construyó un modelo financiero integral (detallado en el anexo 2) que incluye:

- La inversión inicial en equipos de procesamiento, infraestructura de planta y sistema de tratamiento de agua (PTAR).
- La estructura de costos variables, incluyendo materias primas (almidón, glicerina, ácido acético), consumo energético y gestión de recursos hídricos.

- La nómina del personal técnico y administrativo requerido para la operación continua.
- Los gastos fijos asociados a servicios, mantenimiento, administración y comercialización.

Mediante la utilización de un simulador financiero especializado (detallado en el Anexo 3), se proyectó el flujo de caja libre para un horizonte de evaluación de 5 años. Con estos datos, se calcularon indicadores clave de desempeño financiero, como el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (Payback), los cuales permiten concluir sobre la conveniencia económica del proyecto.

Los resultados obtenidos demuestran que la iniciativa es financieramente viable, presentando un VPN positivo y una TIR superior al costo de capital, lo que valida su potencial para ser implementado en un escenario industrial y atractivo para posibles inversionistas.

ANÁLISIS DE SOSTENIBILIDAD

La alternativa seleccionada para la fabricación del prototipo Eco-Funda se basa en la elaboración de una biopelícula biodegradable formulada a partir de gelatina sin sabor, gelatina sabor limón, glicerina, polvo de coronilla de piña, pectina, almidón natural de piña y pequeñas cantidades de ácido benzoico como preservante natural. Esta formulación permite obtener un material flexible, biodegradable, inocuo y compatible con contacto con alimentos secos, mientras emplea un residuo agroindustrial de alta disponibilidad en Colombia: la coronilla de piña.

Al no emplear polímeros sintéticos ni aditivos petroquímicos y al usar un proceso de baja energía, la solución seleccionada se alinea con principios de sostenibilidad ambiental,

social y económica, así como con la legislación colombiana sobre reducción de plásticos de un solo uso (Ley 2232 de 2022).

Ambiental

Valorización de residuos agroindustriales

El proyecto incorpora de forma directa el polvo de coronilla de piña, un subproducto de la cadena de producción de frutas. Su aprovechamiento:

- Reduce el volumen de residuos que llegan a rellenos sanitarios.
- Evita emisiones de metano asociadas a la descomposición anaerobia.
- Transforma un residuo sin valor económico en un insumo de alto valor agregado,
- Promueve la bioeconomía local.

Esto es coherente con los lineamientos de la Estrategia Nacional de Economía Circular (MinAmbiente, 2022).

Biodegradabilidad del material

Todos los insumos utilizados en la formulación final son orgánicos y biodegradables:

- **Gelatina (sin sabor y saborizada):** Degradación enzimática natural,
- **Polvo de coronilla:** Compostable,
- **Pectina y almidón:** Alta biodegradabilidad,
- **Acido benzoico en microdosis:** No deja residuos persistentes.

Al no contener ácido acético en esta alternativa, la formulación es aún más ambientalmente limpia, reduciendo riesgos por manejo de ácidos fuertes o corrosivos.

El material:

- No forma microplásticos,
- Se degrada completamente en semanas o meses dependiendo del ambiente es apropiado para compostaje doméstico,
- No introduce sustancias recalcitrantes al suelo o agua.

Consumo energético bajo

El proceso seleccionado emplea:

- Calentamiento moderado (80–90 °C),
- Secado a 40 °C en horno doméstico,
- Solvent casting (sin solventes orgánicos)
- Termoformado artesanal.

En comparación con polímeros industriales (extrusión PLA o polietileno entre 150–300 °C), el proceso tiene una huella energética considerablemente menor.

Los resultados de la simulación ACV mediante SimaPro muestran los puntos de mayor impacto energético:

- Secado: 1.729 kWh/kg,
- Gelificación/calor: 1.344 kWh/kg,
- Termoformado: 0.630 kWh/kg.

A lo siguiente podremos observar la siguiente grafica que nos genera el simulador SimaPro, aunque el impacto global es bajo porque el proceso no genera residuos peligrosos ni utiliza sustancias toxica.

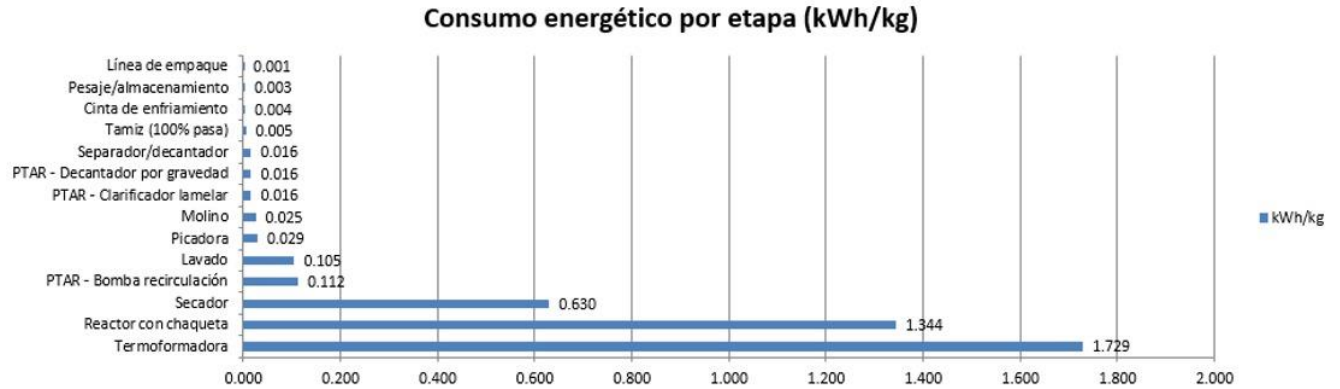


FIGURA 19. Gatos de consumo energético por etapas.

Aun así, el impacto global es bajo porque el proceso no genera residuos peligrosos ni utiliza sustancias tóxicas.

Social

Fortalecimiento de la cadena agroalimentaria

- El uso de coronilla de piña:
- Diversifica los ingresos para productores,
- Reduce pérdidas postcosecha,
- Promueve el desarrollo territorial basando en bioeconomía,
- Integra comunidades rurales al ciclo productivo de biomateriales.

Apropiación social del conocimiento

La técnica de fabricación empleada —sin solventes tóxicos ni equipos industriales— puede replicarse en:

- Colegios
- Universidades,

- Emprendimientos rurales,
- Unidades productivas locales.

Esto fortalece capacidades técnicas en sostenibilidad y economía circular.

Seguridad e inocuidad

La formulación no incluye sustancias corrosivas como ácido acético, por lo que:

- Reduce riesgos en manipulación,
- Evita peligros en talleres o laboratorios básicos,
- Facilita su aceptación en comunidades no especializadas.

Económica

Bajo costo de insumos

La formulación final usa insumos de bajo costo:

- Coronilla de piña prácticamente gratuita.
- Glicerina económica y disponible localmente.
- Gelatina → económica.
- Acido benzoico bajo costo en bajas dosis.
- Agua recurso accesible.

Esto representa una ventaja competitiva frente a PLA o bioplásticos importados.

Escalabilidad progresiva

El proceso puede desarrollarse en:

- Hogar/laboratorio básico: bajo costo, equipos domésticos.

- Microindustria: moldes uniformes, secadores, mezcladores.
- Industria: automatización de casting, control térmico continuo.

Esta flexibilidad favorece modelos de negocio de economía circular local.

Mercado potencial

El prototipo es apto para:

- Productos secos
- Mercados orgánicos
- Comercios sostenibles,
- Líneas eco-amigables de retail.

CONTRIBUCIÓN A LOS ODS

El proyecto Eco-Funda es un prototipo de empaque biodegradable para nueces utilizando fibras de coronilla de piña y un recubrimiento de cera de carnauba está directamente conectado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

ODS	CONTRIBUCIÓN DEL PROYECTO ECO-FUNDA
ODS 9 Industria, innovación e infraestructura	Incentiva innovación en biomateriales accesibles y de bajo impacto.
ODS 12 Producción y consumo responsables	Promueve la valorización de residuos y la reducción de empaques contaminantes.
ODS 13 Acción por el clima	Reduce emisiones asociados a la producción y disposición de plásticos

	tradicionales.
ODS 14-15 Vida submarina y terrestre	Evita la liberación de microplásticos y protege ecosistemas naturales.

Tabla 5: Contribución a los ODS el prototipo Eco-Funda

Fuente: Elaboración propia con base a Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021)

En conjunto, estos ODS orientan y fundamentan el proyecto, mostrando que no se trata únicamente de una innovación tecnológica en empaques, sino de un compromiso completo con la sostenibilidad ambiental, la innovación industrial, la inclusión social y la seguridad alimentaria.

TABLA DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES

ETAPA DEL PROCESO	ASPECTO AMBIENTAL	IMPACTO AMBIENTAL	TIPO DE IMPACTO	VALORACIÓN	MEDIDAS DE MITIGACIÓN
Recolección de coronilla de piña	Aprovechamiento de residuos agrícolas	Disminución de residuos y emisiones por descomposición	Positivo	Alto	Establecer acuerdos con productores para garantizar abastecimiento sostenible.
Lavado y preparación	Consumo de agua	Generación de aguas grises	Negativo	Medio	Reutilizar agua en ciclos y destinarla a

					riego no potable.
Extracción y calentamiento	Consumo de energético	Emisiones indirectas de CO2	Negativo	Bajo-Medio	Uso eficiente de equipos y horarios de baja demanda energética.
Mezclado con glicerina	Uso de insumo biodegradable	No genera toxicidad	Neutral	Bajo	Mantener proporciones para estabilidad del material.
Uso de ácidos auxiliares	Manejo de pequeñas cantidades	Riesgos ambientales mínimos	Negativo	Bajo	Priorizar secado natural con ventilación.
Uso del Empaque	Sustitución de plástico de un solo uso	Reducción de residuos persistentes y microplásticos	Positivo	Muy alto	Promover su compostaje tras uso.

Fin de vida	Biodegradación natural	Retorno seguro al suelo sin contaminación	Positivo	Muy alto	Difusión de guías de degradación en compost doméstico.
-------------	------------------------	---	----------	----------	--

TABLA 6 Aspectos e impacto ambientales del prototipo Eco-Funda
Fuente: Elaboración propia.

Análisis ACV (SIMAPRO)

Se realiza una simulación con SIMAPRO, el cual nos ayuda a realizar un análisis simulado de los impactos ambientales que genera la cadena productiva del producto a nivel industrial.

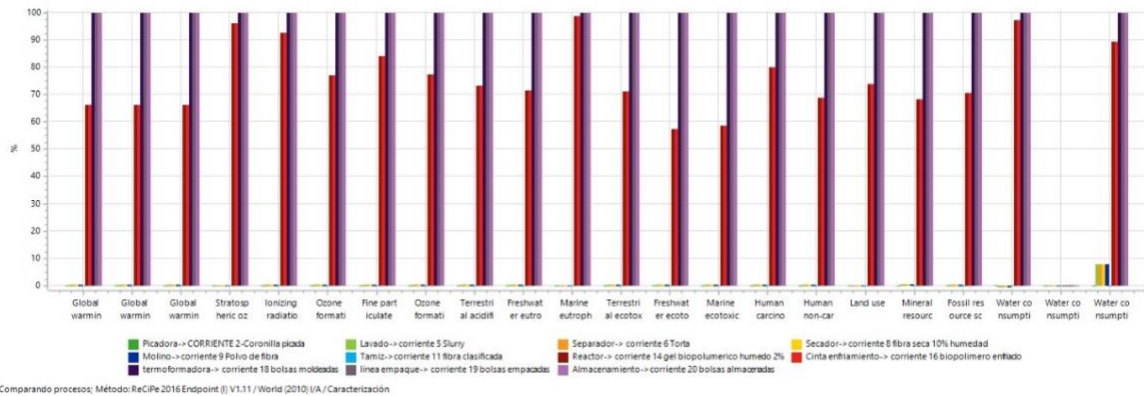


FIGURA 20: Analisis de ACV SimPro
(Fuente propia, 2025)

Los mayores aportes al impacto se asocian principalmente al consumo energético, especialmente en las fases de secado, reacción y termoformado, como se observa en la gráfica (). Estas tres etapas concentran la mayor demanda de energía eléctrica (1,729; 1,344

y 0,630 kWh/kg, respectivamente), lo que sugiere que la optimización del uso energético en dichas operaciones podría mejorar aún más la sostenibilidad del proceso y reducir su huella ambiental global.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos muestran que la formulación compuesta por gelatina sin sabor, gelatina sabor limón, glicerina, polvo de coronilla de piña y ácido benzoico permitió obtener una biopelícula homogénea, flexible y funcional. La mezcla alcanzó una adecuada gelificación y plastificación, formando una película continua y sin fisuras, lo cual coincide con estudios que indican que la gelatina plastificada con glicerina produce matrices estables y maleables (Coelho et al., 2021).

El polvo de coronilla aportó rigidez moderada y estabilidad estructural, actuando como refuerzo lignocelulósico natural, similar a lo reportado por Guancha-Chalapud et al. (2022) y Md. Sazib et al. (2023), quienes demostraron el potencial de fibras de piña en biopelículas. Durante el secado a 40 °C, la película se formó de manera uniforme, y durante el termoformado mantuvo una buena maleabilidad térmica, logrando adoptar la forma de bandeja sin fracturarse.

Las pruebas empíricas evidenciaron resistencia moderada, buena flexibilidad y estabilidad dimensional bajo manipulación, características suficientes para empaques destinados a alimentos secos. La sensibilidad a la humedad se mantiene como una limitación propia de materiales hidrofílicos, pero no afecta el uso previsto.

En conjunto, los resultados confirman que el prototipo Eco-Funda es viable técnica y funcionalmente. Además, su composición 100 % biodegradable, el uso de un residuo

agroindustrial y el bajo consumo energético del proceso lo convierten en una alternativa sostenible alineada con la Ley 2232 de 2022 y con los ODS relacionados con producción responsable y acción climática. Finalmente, los resultados validan el cumplimiento de todos los objetivos del proyecto.

PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

El plan se organiza en fases simples y secuenciales, desde la obtención de la materia prima hasta la validación funcional del prototipo, asegurando su viabilidad técnica, sanitaria y sostenible.

1. Abastecimiento y Preparación de la Materia Prima (1–2 semanas)

Objetivo asociado: Extracción del polisacárido estructural.

Acciones clave:

- Recolección de coronilla de piña con proveedores locales.
- Lavado, desinfección y secado controlado.
- Trituración y tamizado para obtener polvo fino de coronilla.

Resultado: Biomasa vegetal lista y estandarizada para el proceso.

2. Formulación del Biopolímero (1 semana)

Objetivo asociado: Preparación de la mezcla gelatina–glicerina–coronilla.

Acciones clave:

- Gelatinizar gelatina sin sabor y con sabor.
- Añadir glicerina como plastificante y ácido benzoico como estabilizante.

- Incorporar el polvo de coronilla y homogeneizar la mezcla a 80–90 °C.

Resultado: Mezcla viscosa uniforme para solvent casting.

3. Conformación y Secado de la Biopelícula (3–5 días)

Objetivo asociado: Obtención de biopelículas por solvent casting.

Acciones clave:

- Verter la mezcla sobre moldes lubricados.
- Nivelar espesor de forma manual.
- Secar a 40 °C con ventilación periódica.

Resultado: Película flexible, continua y manipulable.

4. Termoformado del Prototipo (1–3 días)

Objetivo asociado: Producción del prototipo de bandeja.

Acciones clave:

- Ablandar la biopelícula con calor suave.
- Moldear manualmente o con molde secundario.
- Evaluar estabilidad dimensional.

Resultado: Prototipo Eco-Funda con forma de bandeja funcional.

5. Evaluación de Desempeño (1–2 semanas)

Objetivo asociado: Validación funcional del material.

Pruebas principales:

- Flexibilidad, resistencia mecánica y punción.
- Estabilidad frente a humedad.
- Comportamiento al contener alimentos secos.
- Estimación de biodegradación en compost casero.

Acciones de mejora: Ajuste de glicerina, tiempo de secado, espesor o recubrimientos naturales.

6. Validación Social y Escalamiento (Continuo)

Acciones clave:

- Mostrar el prototipo en ferias, aulas y comunidades.
- Realizar pruebas de aceptación con usuarios finales.
- Estimar costos para microproducción y preparar manual de replicación.

Resultado final: Prototipo Eco-Funda listo para uso comunitario o emprendimientos locales como alternativa a empaques de un solo uso.

CONCLUSIÓN

El proyecto demostró que es posible fabricar un empaque biodegradable funcional a partir de gelatina, glicerina y polvo de coronilla de piña, usando un proceso sencillo, de bajo consumo energético y basado en un residuo agroindustrial. La formulación seleccionada permitió obtener una biopelícula homogénea, flexible y termoformable, con resistencia suficiente para aplicaciones en alimentos secos y con una biodegradabilidad adecuada para compostaje doméstico.

El uso de coronilla de piña aportó estabilidad estructural y aprovechó un residuo local, mientras que la glicerina garantizó flexibilidad y el ácido benzoico mejoró la conservación del material durante el secado. Los resultados obtenidos validan los objetivos del proyecto y confirman la viabilidad técnica y ambiental del prototipo, alineándose con principios de economía circular y con la tendencia nacional hacia la reducción de plásticos de un solo uso.

En conclusión, Eco-Funda se consolida como una alternativa sostenible, replicable y de bajo costo, con potencial para ser implementada en contextos educativos, comunitarios y de microemprendimiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agencia EFE. (2021, 2 de diciembre). Científicos hallan cómo obtener energía de residuos de piña. EFEalt
- ASTM International. (2019). *ASTM D6400-19: Standard specification for labeling of plastics designed to be aerobically composted in municipal or industrial facilities*. <https://www.nawp.com.au/espanol/renewable-nature-based-sourcing/biodegradability-en-13432-astm-d6400-as4736/>
- Coelho, C. C., Almeida, A., & Sobral, P. J. (2021). Pectin films: A review of recent advances in food packaging applications. Food Hydrocolloids, *118*, 106782.
- Comité Europeo de Normalización. (2002). EN 13432: Requisitos de los envases y embalajes valorizables mediante compostaje y biodegradación. <https://www.ecozema.com/es/norma-en13432/>
- Elsevier. (2023). Pineapple by-products as sustainable sources of lignocellulosic fibers.
- Journal of Cleaner Production, *412*, 137-146. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137146>
- European Commission, ETC WMGE. (2022). Plastics and biodiversity: Impacts of plastics on biodiversity and ecosystems. Comisión Europea; European Bioplastics. https://www.researchgate.net/publication/387231487_Plastics_and_biodiversity_-_Impacts_of_plastics_on_biodiversity_and_ecosystems
- Food and Drug Administration. (s.f.). Code of Federal Regulations, Title 21, Part 172: Food additives permitted for direct addition to food. U.S. Department of Health &

<https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcft/CFRSearch.cfm?CFRPart=172>

- Guancha-Chalapud, M. A., Serna-Cock, L., & Tirado, D. F. (2022). Valorization of pineapple residues from the Colombian agroindustry to produce cellulose nanofibers. *Applied Sciences*, *12*(14), 6956. <https://doi.org/10.3390/app12146956>
- Guancha-Chalapud, M., Serna-Cock, L., & Tirado, D. F. (2022). Characterization of cellulose and pectin-rich fibers extracted from pineapple crown biomass. *Journal of Polymers and the Environment*.
- Hywax. (s.f.). Waxed paper in sustainable packaging: Benefits and uses. <https://www.hywax.com/blog/waxed-paper>
- ISO. (2019). *ISO 14855-1: Determination of the ultimate aerobic biodegradability of plastic materials under controlled composting conditions
- Md. Sazib, M., Roy, A., & Islam, R. (2023). Potential of pineapple crown as a feedstock for renewable energy production. *International Journal of Renewable Energy Development*, *12*(1), 173-181. <https://ijred.org/index.php/ijred/article/view/5267>
- Md. Sazib, A., Roy, S., & Islam, M. S. (2023). Extraction and characterization of cellulose fibers from pineapple residues for biopolymer applications.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). Plan Nacional para la Gestión Sostenible de Plásticos de un Solo Uso. <https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-los-plasticos-de-un-solo-uso/>

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Estrategia nacional de economía circular. <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/estrategia-nacional-de-economia-circular/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Ley 2232 de 2022: Medidas para la reducción gradual de plásticos de un solo uso. <https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-2232-de-2022/>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2022). Plan nacional para la gestión sostenible de plásticos de un solo uso. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2022/02/plan-nacional-para-la-gestion-sostenible-de-plasticos-un-solo-uso-minambiente.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (s.f.). Sello Ambiental Colombiano (SAC). <https://www.minambiente.gov.co/asuntos-ambientales-sectorial-y-urbana/sello-ambiental-colombiano-sac/>
- Ministerio de Salud y Protección Social. (2012). Resolución 683 de 2012: Reglamento técnico sobre requisitos sanitarios para materiales en contacto con alimentos. <https://minsalud.gov.co/sites/rid/Lists/BibliotecaDigital/RIDE/DE/DIJ/resolucion-0683-de-2012.pdf>
- Müller, C. M., Yamashita, F., & Laurindo, J. B. (2020). Castor oil as a replacement for glycerol in starch-based films. *Carbohydrate Polymers*, *229*, 115-123.
- Nieto, M., Muñoz, J., & Rodríguez, L. (2022). Incertidumbre y toma de decisiones en proyectos de ingeniería sostenible. *Revista Colombiana de Ingeniería*, *37*(2), 45-59.

- Patiño, D., & López, C. (2021). Restricciones ambientales y económicas en proyectos de bioempaques en Colombia. *Ingeniería y Ciencia*, *17*(33), 101-118.
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (2021). From pollution to solution: A global assessment of marine litter and plastic pollution. United Nations Environment Programme.
- Restrepo, J., & Gómez, F. (2020). Gestión de la incertidumbre en proyectos de innovación tecnológica. *Revista EAN*, *89*, 123-140.
- Sanyang, M. L., Sapuan, S. M., Jawaid, M., Ishak, M. R., & Sahari, J. (2016).
- Development and characterization of sugar palm starch and poly(lactic acid) blend films. *Journal of Cleaner Production*, *126*, 476-486.
- Siró, I., & Plackett, D. (2010). Microfibrillated cellulose and new nanocomposite materials: A review. *Cellulose*, *17*(3), 459-494.
- Stubbins, A., Law, K. L., Muñoz, S. E., Bianchi, T. S., & Zhu, L. (2025). Implications of plastic pollution on the global carbon cycle. *Carbon Research*, *4*(21).
<https://doi.org/10.1007/s44246-024-00188-z>
- Thakur, V. K., Thakur, M. K., & Raghavan, P. (2019). Progress in green polymer composites from lignocellulosic biomass. *International Journal of Polymer Science*, *2019*, 1-15.
- Tridge. (2023). Colombia: Production of pineapples. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
<https://www.tridge.com/intelligences/pineapple/CO/production>
- World Wide Fund for Nature. (s.f.). Forests and paper. WWF.
<https://www.worldwildlife.org/industries/forests-and-paper>

- American Society for Testing and Materials. (2013). ASTM F1249-13: Standard test method for water vapor transmission rate through plastic film and sheeting using a modulated infrared sensor. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2015). ASTM D882-15: Standard test method for tensile properties of thin plastic sheeting. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2015a). ASTM D5338-15: Standard test method for determining aerobic biodegradation of plastic materials under controlled composting conditions. ASTM International.
- American Society for Testing and Materials. (2017). ASTM D3985-17: Standard test method for oxygen gas transmission rate through plastic film and sheeting using a coulometric sensor. ASTM International.
- European Committee for Standardization. (2000). EN 13432: Packaging—Requirements for packaging recoverable through composting and biodegradation—Test scheme and evaluation criteria for the final acceptance of packaging. CEN.
- International Organization for Standardization. (2003). ISO 17088: Specifications for compostable plastics. ISO.
- International Organization for Standardization. (2005). ISO 1133: Plastics—Determination of the melt mass-flow rate (MFR) and melt volume-flow rate (MVR) of thermoplastics. ISO.
- International Organization for Standardization. (2008). ISO 62: Plastics—Determination of water absorption. ISO.
- International Organization for Standardization. (2012). ISO 527-3: Plastics—Determination of tensile properties—Part 3: Test conditions for films and sheets. ISO.

- International Organization for Standardization. (2019a). ISO 15106-3: Plastics—Film and sheeting—Determination of water vapour transmission rate—Part 3: Electrolytic detection sensor method. ISO.
- International Organization for Standardization. (2019b). ISO 15105-2: Plastics—Film and sheeting—Determination of gas-transmission rate—Part 2: Equal-pressure method. ISO.