



**Desarrollo de biomateriales con cáscara de huevo como alternativa sostenible para la
fabricación de ecoempaques**

Laura Andrea Correa Ruíz

Trabajo de grado de maestría presentado para optar al título de Magíster en Ciencias Naturales y
Matemática

Asesor

Nolber Trujillo Osorio Magíster (MSc) en Biotecnología

Universidad Pontificia Bolivariana
Escuela de Ingenierías
Maestría en Ciencias Naturales y Matemática
Medellín, Antioquia, Colombia
2025

El contenido de este documento no ha sido presentado con anterioridad para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o en cualquiera otra universidad.

Dedicatoria

La presente tesis la dedico con todo mi cariño a mi esposo Juan Felipe Agudelo por ser fuente de inspiración, por su confianza, por acompañarme de manera incondicional y brindarme comprensión en los momentos difíciles.

Al profesor Nolber Trujillo a quien admiro por su calidad humana y sus conocimientos, con los cuales me ayudó a avanzar de manera significativa en mi formación académica y profesional, contribuyendo a cumplir este gran sueño.

Muchas gracias por hacer posible este logro.

Agradecimientos

Gracias a Dios, a mi familia, a las personas con las cuales he compartido en estos años de formación y principalmente a la Universidad Pontificia Bolivariana por permitirme crecer como persona y como profesional.

Tabla de contenido

Resumen	11
Abstract	12
Introducción	13
1 Planteamiento del problema	14
1.1 Antecedentes	16
2 Justificación.....	22
3 Objetivos	23
3.1 Objetivo general	23
3.2 Objetivos específicos.....	23
5 Marco teórico	24
5.1 Contaminación ambiental.....	24
Residuos orgánicos	24
5.2 Sostenibilidad	25
Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)	26
5.3 Materiales	26
5.3.1 Materiales Poliméricos.....	28
5.3.2 Materiales cerámicos	28
Competencia entre los materiales	28
Características del Material.....	29
5.4 Biodegradable.....	30
Biomateriales	30
Beneficios de los Biomateriales	31
Tipos de biomateriales	31
Aplicaciones de los biomateriales.....	33

5.5 Huevo	34
La cáscara de Huevo	34
6 Metodología	37
6.1 Materiales y métodos	37
6.1.1 Recopilación bibliográfica	37
6.1.2 Materiales.....	37
6.1.3 Instrumentos.....	38
6.1.4 Experimentación	39
6.1.4.1 Pretratamiento de la biomasa	39
6.1.4.2 Preparación de la mezcla para obtener el biomaterial	39
6.1.4.3 Preparación de la mezcla de biomaterial con adicción de cáscara de huevo	40
6.1.4.4. Preparación de la mezcla final	41
6.2. Caracterización de los biomateriales	42
6.2.1. Masa.....	42
6.2.2. Volumen.....	43
6.2.3. Densidad	43
6.2.4. Espesor	44
6.2.5. Propiedad Mecánica.....	44
6.2.6 Colorimetría	46
7. Resultados	47
7.1. Preparación de la mezcla de biomaterial con adicción de cáscara de huevo	47
7.1.2 Preparación de la mezcla final	48
7.2. Caracterización de los biomateriales.....	50
7.2.1. Masa.....	50
7.2.2. Volumen.....	51

7.2.3. Densidad	52
7.2.4. Espesor	53
7.2.5. Propiedad Mecánica.....	54
7.2.6. Colorimetría	56
8. Conclusiones	58
9. Recomendaciones.....	60
Referencias	61
Anexos.....	65
Anexo 1	65
Anexo 2	65
Anexo 3	66
Anexo 4	67

Lista de tablas

Tabla 1. Tipos y cantidad de biomateriales según su origen y composición	32
Tabla 2. Composición mineral y química de la cáscara de huevo	36
Tabla 3. Materiales utilizados.	38
Tabla 4. Instrumentos utilizados.	38
Tabla 5. Composición de la mezcla base para el biomaterial.	40
Tabla 6. Materia prima para preparar cada biomaterial.	41
Tabla 7. Biomaterial con las formulaciones FA, FB y FC.	42
Tabla 8. Masa del biomaterial.	51
Tabla 9. Dimensiones y volumen de las formulaciones	52
Tabla 10. Densidad calculada del biomaterial.....	53
Tabla 11. Espesor y dimensiones geométricas.	53
Tabla 12. Propiedades mecánicas de las muestras FA, FB y FC.	55
Tabla 13. Colorimetría.	56
Tabla 14. Test de colorimetría FA, FB y FC.....	65

Lista de figuras

Figura 1. Estructura de la cáscara de huevo	35
Figura 2. Proceso de molienda de la cáscara de huevo	39
Figura 3. Texturómetro	45
Figura 4. Muestras obtenidas del biomaterial	48
Figura 5. Formulaciones FA, FB y FC.....	49
Figura 6. Muestras para la masa de FA (1), FB (2) y FC (3).	50
Figura 7. Probetas de los biomateriales cortados por dimensiones.....	54
Figura 8. Comparativa Fuerza y Tenacidad muestras FA, FB, FC.	65

Siglas, acrónimos y abreviaturas

FA	Formulación base, sin cáscara de huevo
FB	Formulación con cáscara de huevo con un tamaño de 500 μm
FC	Formulación con cáscara de huevo con un tamaño de 75 μm
FENAVI	Federación Nacional de Avicultores
UPB	Universidad Pontificia Bolivariana

Resumen

En la ciudad de Medellín la mayoría de los productos tecnológicos, alimenticios y de aseo que son de uso cotidiano se encuentran empacados en recipientes hechos de plástico, material que tiene ventajas para el mercado porque es versátil para el embalaje y se genera de forma masiva. Sin embargo, el plástico está formado por compuestos derivados del petróleo y polímeros que le otorgan resistencia, lo que implica que no se descompone fácilmente y contamina la flora y la fauna en los distintos ecosistemas.

Por otro lado, cuando el plástico no se recicla adecuadamente, termina mezclado con los residuos orgánicos, como las cáscaras de huevo que son desechadas sucias en vertederos junto con otras sustancias y se descomponen sin un tratamiento oportuno. En Colombia, el huevo es un alimento básico y de amplio consumo, lo que genera una gran cantidad de cáscaras de huevo como residuo. Estas dos problemáticas son el punto de partida de la presente investigación, ya que con las cáscaras de huevo se pueden desarrollar diferentes formulaciones hasta obtener un biomaterial con propiedades mecánicas adecuadas para la fabricación de ecoempaques de uso cotidiano y de esta manera contribuir al desarrollo sostenible.

Palabras clave: cáscaras de huevo, biomaterial, ecoempaque.

Abstract

In the city of Medellín, most everyday technological, food, and personal care products are packaged in plastic containers, a material that offers advantages to the market because it is versatile for packaging and is produced on a massive scale. However, plastic is made up of petroleum-derived compounds and polymers that give it strength, meaning it does not break down easily and pollutes the flora and fauna in various ecosystems.

On the other hand, when plastic is not properly recycled, it ends up mixed with organic waste, such as eggshells that are discarded dirty in landfills along with other substances and decompose without proper treatment. In Colombia, eggs are a staple food widely consumed, which generates a large amount of eggshells as waste. These two issues form the starting point of this research, as eggshells can be used to develop various formulations to produce a biomaterial with mechanical properties suitable for manufacturing eco-packaging for everyday use, thereby contributing to sustainable development.

Keywords: eggshells, biomaterial, eco-packaging.

Introducción

En el contexto actual de creciente preocupación por el manejo de residuos orgánicos y la necesidad de desarrollar materiales sostenibles, este estudio se ubica dentro de la economía circular y la promoción de soluciones innovadoras para la industria de los empaques. Las cáscaras de huevo, como uno de los residuos orgánicos más comunes en la producción alimentaria, constituyen una fuente abundante y desaprovechada de materia prima para la elaboración de biomateriales (Weiss Münchmeyer & Besoain Narvaez, 2022).

El ser humano está inmerso en una cultura de inmediatez, que ha hecho del plástico un material esencial para la vida, ya que todo material o elemento del supermercado está empacado en diferentes bolsas resistentes a la degradación y derivados del petróleo. Sumado a esto, la cantidad de residuos procedentes de la cocina que terminan en la basura contribuyen a la contaminación (Caraig et al., 2023); por lo tanto, en esta investigación se considera como alternativa de solución utilizar las cáscaras de huevo para el desarrollo de biomateriales para eco empaques, evaluando su viabilidad como alternativa ecológica a los materiales tradicionales.

La investigación se centra en la caracterización de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales obtenidos. Además, el enfoque del estudio se alinea con los principios de sostenibilidad y la responsabilidad ambiental, promoviendo el uso de recursos renovables y la reducción del desperdicio en la cadena de producción, integrando este conocimiento en iniciativas educativas y de divulgación científica, con el objetivo de fomentar la conciencia ambiental desde edades tempranas.

1 Planteamiento del problema

En el mundo, cada minuto se utilizan un millón de bolsas, equivalentes a 500 mil millones y un billón de bolsas de plástico al año, cifras alarmantes si consideramos que los plásticos se derivan del petróleo. Sin embargo, prohibir el uso del plástico no es una opción efectiva para reducirlo, porque los plásticos tienen diferentes usos en la cotidianidad, al ser duraderos, versátiles para el embalaje y económicos para producirlos en grandes cantidades; sin embargo, estas cualidades también son desventajas porque son elaborados con polímeros, algunos están compuestos por Tereftalato de Polietileno (PET), componentes inorgánicos que son casi imposibles de descomponer, lo que indica que muchos plásticos permanezcan después de ser utilizados en el medio ambiente contaminando afluentes de agua y ecosistemas (Caraig et al., 2023).

Con motivo de la producción y el consumo desmedido del plástico, algunos países incorporan leyes, establecen impuestos y prohíben el uso de bolsas, pero estas medidas no son suficientes. El problema implica que, aunque existen tipos de plásticos que se pueden reciclar, muchos terminan mezclados con los residuos orgánicos en la basura (*Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*, 2016). Por consiguiente, es necesario desarrollar alternativas de empaques biodegradables que se puedan descomponer más rápido y no liberen sustancias nocivas. Ahora bien, para buscar una solución, se trae a colación un segundo problema: el desperdicio de los residuos orgánicos, seleccionando a la cáscara de huevo, residuo directamente proporcional al consumo de este alimento.

Teniendo en cuenta que América Latina es la región donde más se produce y se consume huevo, con un promedio de 270 huevos per cápita. Conmemorando el Día Mundial del Huevo, con el fin de promover su consumo por nutrientes que aporta al ser humano. El Instituto Latinoamericano del Huevo (ILH) mencionó que en Latinoamérica hay 630'000.000 habitantes y 605.000.000 gallinas, equivalente a 0,93 gallinas por habitante (Bedoya-Salazar & Valencia-González, 2020).

Así pues, la Federación Nacional de Avicultores (FENAVI) indica que Colombia cuenta con 676 municipios avícolas. Durante el año 2025, el consumo per cápita de huevo fue de 366, para un total de 19.402 millones de huevos. En el año 2024, la producción de huevos fue de 18.019 millones de unidades, evidenciando un consumo per cápita de 342 huevos, lo que da cuenta de un crecimiento del 6,8%, comparado con el año 2023, con una producción de 16.864 millones. Con los resultados anteriores, Colombia se ubicó como el tercer país que más consume huevo en el mundo, incrementando anualmente el volumen de cáscara de huevo (FENAVI, 2025).

Entonces las cifras anteriores del consumo de huevo sirven como indicadores por individuo, que es el significado de la locución latina per cápita (per-preposición, y plural acuciosa caput, capitis “cabeza”) (FENAVI, 2025). Lo que permite predecir la cantidad aproximada de cáscaras de huevos resultantes a nivel internacional y nacional. Desde la década de los setenta Colombia presenta una tendencia al incremento del consumo de huevo, información respaldada por entidades del estado como la DIAN, el DANE y por supuesto el medio avicultor.

Dado que los huevos se consumen con frecuencia, las cáscaras de estos son un residuo cotidiano en los hogares, que no siempre se separa en la fuente. Es ahí donde cobra sentido la idea de los biomateriales con el propósito de reemplazar materiales como los plásticos de un solo uso que son contaminantes por otros elaborados empaques a partir de materias primas asequibles en el contexto, que se puedan descomponer en menos tiempo, sin dejar una huella negativa en el medio ambiente.

1.1 Antecedentes

Una investigación realizada en el año 2022 por autores de la Universidad de Filipinas y del Lejano Oriente, sobre la creación de plástico biodegradable a partir de la cáscara de huevo de gallina y el jacinto de agua (*Eichhornia crassipes*), que es una planta invasora, en la que analizaron los porcentajes de cáscara de huevo y de jacinto para elaborar plástico biodegradable, para distinguir su durabilidad, ductilidad, elasticidad y solubilidad. Considerando que es importante mantener un 50% de cáscara de huevo y un 50% de jacinto de agua para que el plástico sea resistente y flexible (Caraig et al., 2023).

Simultáneamente analizaron el impacto del uso de los plásticos en relación con su producción masiva, generando una necesidad cotidiana para el ser humano que no se puede eliminar por completo, pero es posible reemplazarlos con plásticos biodegradables compuestos por materiales orgánicos que puedan ser degradados por microorganismos. Considerando que los bioplásticos existieron primero que los plásticos convencionales, Maurice Lemoigne fue el inventor del primer plástico biodegradable, llamado también polihidroxibutirato (PHB), procedente de la bacteria *Bacillus megaterium*, pero su descubrimiento no permaneció en el tiempo debido a la producción de plásticos más económicos derivados del petróleo (Caraig et al., 2023).

Puesto que los plásticos convencionales son un factor importante en la contaminación, es necesario retomar los plásticos biodegradables a partir de ácido poliláctico (PLA), es decir, empaques, con base en almidones de yuca, maíz y papa (Felipe & Cadavid, n.d.). Aprovechando la baja toxicidad de dichos materiales. En la investigación utilizaron el almidón de yuca como aglutinante, porque es más resistente a la disolubilidad que el de maíz, y descubrieron que al agregar material de relleno al bioplástico se refuerza y se aumenta la resistencia a la tracción, como por ejemplo agregando cáscara de huevo y la celulosa de jacinto de agua. Evaluando en el estudio la compatibilidad de las materias primas y la cantidad que se requiere de cada una (Caraig et al., 2023).

Por consiguiente, utilizaron el método experimental de investigación cuantitativa, para obtener datos y evaluar si las propiedades del bioplástico se afectan al cambiar la cantidad que se incorpora de cáscara de huevo y de jacinto de agua. Siendo estas las variables independientes, ya que afecta a las variables dependientes: durabilidad, elasticidad, ductilidad y solubilidad. Realizando cuatro pruebas por muestra de bioplástico desarrollada. Aplicando un análisis ANOVA unidireccional (Caraig et al., 2023).

Por otro lado, científicos de la Universidad de Tuskagee (Alabama, EE. UU.) realizaron un estudio sobre el uso de nanopartículas de cáscara de huevo en bioplástico para fabricar mejores materiales de embalaje. Eligieron las cáscaras de huevo, porque son porosas, ligeras y tienen una composición principal de carbonato de calcio. Además, sus partículas en tamaño nanométrico hacen que el bioplástico tenga más resistencia y sea un poco más flexible comparado con otros bioplásticos, características que, sumadas con la biodegradabilidad, pueden hacer de este una alternativa, según Rangari, profesor del Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Es importante considerar que la mayoría de los biomateriales no tienen elasticidad y resistencia para ser incorporados en la industria del empaque (Rangari, 2016).

Estos científicos pretenden crear un biomaterial de embalaje que se doble sin quebrarse fácilmente. En el proceso, las cáscaras de huevo fueron lavadas, trituradas y se expusieron a ondas ultrasónicas que descompusieron los fragmentos más de 350.000 veces más pequeños que el diámetro de un cabello, infundiéndolos a la mezcla de 70 % de tereftalato de adipato de polibutirato (PBAT), polímero derivado del petróleo, y 30 % de ácido poliláctico (PLA), polímero de almidón de maíz. Logrando que el bioplástico sea 700% más flexible comparado con otros bioplásticos (Rangari, 2016).

En el Instituto Valenciano de Competitividad e Innovación (IVACE), el proyecto BIOPROCESS, liderado por AIMPLAS, empresa que se dedica a innovar en plásticos para el futuro, el proyecto busca mejorar las propiedades mecánicas y de barrera en los bioplásticos. “En

el proyecto BIOPROCESS, AIMPLAS ha aplicado la tecnología de extrusión por MDO (Machine Direction Orientation) con diferentes bioplásticos comerciales para obtener es flexibles biodegradables y compostables y ha desarrollado, además, nuevas formulaciones de polímeros naturales, como polisacáridos y proteínas animales y vegetales, para el estudio de la modificación de sus propiedades mecánicas y barrera al ser procesados por extrusión de lámina no orientada y extrusión MDO” (González, 2025).

En el departamento de Ciencias Animales de la Universidad de Egerton en Kenia, realizaron un estudio para descubrir los posibles usos de la cáscara de huevo en medicina y nutrición para evitar desperdiciar este residuo. Determinando que una cucharadita de polvo de cáscara de huevo equivale a media cáscara de huevo. Además, este residuo puede ser utilizado en el suelo como fertilizante, reemplazando la cal. Si las industrias y restaurantes que usan el huevo a diario depositaran el residuo lavado en un recipiente específico, sería más fácil su recolección y se podría dar un uso efectivo para elaborar productos, reduciendo costos y mejorando la calidad del medio ambiente. Sin embargo, cuando se eliminan junto con los desechos en vertederos, atraen moscas y son abrasivos, contaminando el medio ambiente (Macharia & Ori, 2017).

En la investigación sobre “las cocinas, residuos e impresión 3D”. En “Biomateriales basados en cáscaras de huevo y conchas de mejillón”, la cocina es utilizada como un laboratorio transformador de alimentos, donde proceden los residuos orgánicos comunes que se convierten en materia prima para experimentar. Descubriendo posteriormente que los productos cotidianos como la ropa, las bolsas, los elementos decorativos del hogar, también se pueden elaborar con base en los residuos orgánicos que son descartables, como cáscaras de huevo o de naranja, entre otros; complementando si se quiere con pigmentos naturales (Otero, 2022).

Actualmente, los materiales biodegradables son conocidos como biomateriales en el contexto de diseño, arquitectura y sobre todo científico, por colectivos que reflexionan sobre nuevas formas de crear materiales a partir de residuos orgánicos, como lo hace en Chile el laboratorio de biomateriales de Valdivia (LABVA), que se encarga de investigar, experimentar y transformar residuos orgánicos, hongos y bacterias en nuevos materiales, con el lema: “El futuro será biomaterial” (Weiss Münchmeyer & Besoain Narvaez, 2022).

En el ámbito educativo y artístico, Leona Flóres aborda la crisis climática desde el diseño textil y la ciencia de los materiales, al identificar el impacto ambiental de la moda rápida que termina formando islas de ropa en países como Chile, por esto Flóres incorpora biomateriales a la ropa que es una de las industrias que más contamina y que puede cambiar con los biomateriales su forma de producción masiva, en el curso que imparte en la página de Domestica enseña lo básico en cuanto a los materiales que se requieren para formar bioplásticos con gelatina, glicerina y agua destilada y para los biocompuestos que vienen siendo materiales cerámicos, utiliza alginato proveniente de algas y cáscaras de huevo o de residuos como la cáscara de naranja.

Asimismo, en el contexto latinoamericano, Laura Messing de Argentina destaca por su labor como artista visual y docente que desarrolla una práctica investigativa de diferentes biomateriales desde el año 2018. A través de la exploración y el aprovechamiento de residuos orgánicos para conformar materiales sostenibles y funcionales; en este proceso, Messing descubrió un mundo de posibilidades para reemplazar contaminantes como plásticos, cueros curtidos, cerámica y cemento. Asegura que los productos cotidianos se pueden elaborar a partir de biomateriales con base en la mezcla de diferentes residuos orgánicos que son descartables, como cáscaras de huevo. A nivel internacional, es referente porque afirma que los biomateriales son una actividad científica y ha contribuido al desarrollo de múltiples proyectos sostenibles. Es fundadora de la empresa verde llamada MOEBIO®, que colabora con diseñadores, organismos, instituciones y emprendedores que desean escalar procesos productivos innovadores y minimizar los impactos ambientales negativos. (Messing, 2023)

Además, la científica, bióloga y arquitecta Neri Oxman es pionera en biomateriales; en el libro *Material ecology*, propende por un futuro diferente. Como profesora del MIT Media Lab, influye en la arquitectura sostenible, abordando la bioarquitectura y la bioimpresión. Oxman se enfoca en elaborar diseños a partir de la naturaleza, utilizando procesos biológicos, integrando la biotecnología para preservar el medio ambiente. Explora las posibilidades de la biomimética, disciplina que busca inspiración en la naturaleza para dar soluciones a problemas imitando procesos biológicos, como el crecimiento de las plantas o las estructuras de las conchas marinas, entre otros (Doordan, 2021).

En Chile, por ejemplo, existe un restaurante que experimenta no solo con las comidas que crea, sino con los platos que usan para servirles a sus clientes, y comparten una de sus recetas con cáscara de huevo y alginato, así como vinagre que proporciona un medio ácido para que el calcio de la cáscara pueda ser de utilidad. Es una idea que repercute en el medio ambiente, pero a su vez genera una experiencia diferente para quienes visitan sus instalaciones(Future Materials Bank, 2024).

Otras investigaciones muestran como la cáscara de huevo ha sido utilizada como material de relleno en la producción de plásticos biodegradables, específicamente el poliláctico (PLA), mostrando buena resistencia (Cree, 2017). “En conclusión, se puede afirmar que diferentes industrias junto con la academia investigan el potencial de la cáscara de huevo considerada materia prima, pero los estudios realizados no son suficientes comparados con la cantidad de residuos que se genera cada día en el mundo, así como los costos de transformación y manejo de estos. Evidenciando que, al ser de origen animal, presenta “baja toxicidad química y ausente de microorganismos patógenos, al ser sometida a tratamientos apropiados que garanticen su inocuidad” (Bedoya-Salazar & Valencia-González, 2020).

El Centro de Investigación en Química Aplicada de México en el año 2022 realizó una revisión a las regulaciones y clasificaciones de los bioplásticos. Reconociendo que solo el 9% de los residuos son reciclados y que un 80% de los plásticos terminan en vertederos o en el entorno natural acumulados y aproximadamente un 12% de los desechos es incinerado. Una alternativa a las problemáticas de los plásticos de origen no renovable son los bioplásticos; tienen en cuenta a los biopolímeros que son sintetizados por la naturaleza y biobasados, que son constituidos por pequeñas moléculas de biomasa como residuos agrícolas o alimenticios, caracterizados por la capacidad de degradarse. Lo único negativo es que los bioplásticos presentan altos costos, baja disponibilidad, desinformación para el consumidor y menores propiedades mecánicas. Los bioplásticos se clasifican según su fuente o su capacidad de biodegradabilidad (Fonseca y Peña,2022).

A nivel nacional en la facultad de ingeniería de la sede Cali de la Universidad San Buenaventura realizaron una investigación llamada “Evaluación de propiedades físicas de bioplásticos termo-comprimidos elaborados con harina de yuca”, en este trabajo se estudió el color, la densidad y las propiedades mecánicas de bioplásticos en este caso elaborados con harina de yuca MPER183 gelatinizada reforzando con fibra de fique, para esto aplicaron el modelo de compresión, modificando la presión (0, 20 y 40 psi) y la temperatura (180, 190 y 200°C), analizando los valores obtenidos de la densidad en cada formulación, así como los cambios en las propiedades mecánicas del bioplástico (Paola Navia-Porras & Bejarano-Arana, n.d.).

En síntesis, después de analizar diversas investigaciones, es fundamental valorar los residuos orgánicos como la cáscara de huevo, teniendo en cuenta la posibilidad de desarrollar nuevos materiales biodegradables. No obstante, de acuerdo con el análisis de la información anterior, no basta con experimentar, es necesario estandarizar metodologías para que los biomateriales no se queden en el campo del arte o el diseño y puedan ser competitivos a nivel industrial, reemplazando bolsas y empaques de uso común. Por lo tanto, es imprescindible que, a partir de la experiencia de diversos expertos que se han cuestionado en diversos contextos sobre la creación de nuevos materiales, se establezca una ruta de composiciones químicas y mecánicas precisas con el fin de contribuir con la investigación científica. Esto se logrará al articular el diseño sostenible con los estándares y pruebas que permitan evaluar la calidad del producto o empaque.

2 Justificación

La contaminación por plásticos es una problemática que no se soluciona con restricciones de uso, ya que se ha vuelto indispensable para el transporte de alimentos y la conservación de productos, pero el impacto de estos en el medio ambiente es desfavorable porque pueden durar hasta 1000 años, sin degradarse debido al uso de compuestos derivados del petróleo, lo cual genera la necesidad de utilizar polímeros naturales como la gelatina, que ayuda a que se degrade de forma segura en el medio ambiente y, junto con residuos orgánicos, se puede aprovechar para elaborar nuevos productos (Cabrejos Castillo et al., 2024).

Según la Comisión Europea “el plástico de un solo uso representa el 70% de todas las basuras marinas” y por ahora no se ha encontrado un material que pueda sustituir completamente a los plásticos derivados de petróleo. La Comisión reconoce que con el tiempo los microplásticos presentes en el aire y en agua llegan a afectar la salud del ser humano. Este fenómeno ocurre sobre todo en países subdesarrollados que no logran contar con los recursos tecnológicos para reciclar correctamente (Alcaide et al., 2020).

Ante la problemática descrita, esta investigación busca darle valor a la cáscara de huevo como materia prima con la finalidad de reducir la contaminación ambiental y caracterizar las propiedades mecánicas de este biomaterial.

Actualmente, los biomateriales también se centran en el uso de residuos orgánicos para producir materiales sostenibles que permitan reducir el impacto ambiental de los plásticos convencionales. Los residuos agrícolas y orgánicos (cáscaras de frutas, residuos vegetales, etc.) se utilizan para producir materiales biodegradables (Weiss Münchmeyer & Besoain Narvaez, 2022). Al alinear la investigación con los ODS, no solo se pretende disminuir la dependencia de polímeros derivados del petróleo, sino que se busca dar una alternativa para empaques ecológicos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Desarrollar biomateriales ideales para la fabricación de ecoempaques mediante la incorporación de cáscara de huevo.

3.2 Objetivos específicos

- Obtener biomateriales variando la formulación en cuanto a la adición de cáscara de huevo con diferente tamaño de partícula.
- Caracterizar los biomateriales obtenidos a través de la determinación de diferentes propiedades físicas.
- Establecer la formulación ideal que permite obtener biomateriales adecuados para la fabricación de ecoempaques.

5 Marco teórico

5.1 Contaminación ambiental

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), la contaminación ambiental, en especial del aire, es un gran problema, que incluye a todos los países, porque genera diferentes enfermedades que pueden afectar la salud humana. A partir del año 2019, se estima que la contaminación del aire ambiente (exterior) en las diferentes ciudades causa muertes prematuras, enfermedades cardiovasculares y respiratorias, así como cánceres. Los causantes principales son las industrias y los hogares, porque la descomposición de los desechos orgánicos en los vertederos de basura genera diferentes gases que van a la atmósfera y se acumulan, aportando al efecto invernadero. Por lo tanto, si se les diera otro uso a algunos de los desechos de cocina, se podrían recuperar y reutilizar dichos materiales como materia prima para combatir la crisis climática, que es una tarea de todos (OMS, 2024).

Residuos orgánicos

Los desechos biodegradables de origen vegetal o animal son llamados residuos orgánicos que se descomponen en la naturaleza sin demasiada dificultad y se convierten en otro tipo de materia orgánica. Los residuos orgánicos surgen de diferentes contextos como agricultura, industrias y hogares. Es posible transformarlos en abono como compost o lombricultor, que permitirá que los microorganismos hagan su trabajo para que funcione como nutriente para las plantas. En algunos casos, los residuos orgánicos pueden ser alimento para animales, como ocurre con las hojas de la mazorca o las cáscaras de arveja, que no son consumidos por el ser humano, pero son parte de la dieta de los conejos y las cobayas. Sin embargo, es difícil tener una gestión adecuada y eficiente de los residuos orgánicos, sobre todo en los pequeños apartamentos de la ciudad, lo anterior según la Repsol Compañía Energética Global (Repsol, 2023).

Con la valorización de los residuos se puede dar un tratamiento oportuno de estos, lo que permite la reconversión con un objetivo concreto, en cuyo caso se podrán obtener diferentes

materias primas o productos.(Repsol, 2023) Por supuesto, los residuos orgánicos afectan el medio ambiente cuando no separados de manera oportuna, con malos olores, plagas y gases de efecto invernadero, pérdida de recursos valiosos para las plantas como los fertilizantes naturales, teniendo un impacto negativo en la biodiversidad. Por esto, los gobiernos de países como España y Colombia fomentan leyes sobre el manejo de residuos, en algunos casos de la mano de comparendos ambientales, donde es importante la valoración de los residuos, que pretenden regenerar los suelos y ayudar a la economía circular con la prevención, reparación, reciclado y valoración. Teniendo presente que residuo es cualquier sustancia u objeto que un sujeto deseche.

Como lo establece la Ley 1259 (2008) en Colombia da cuenta de los tipos de residuos y define algunos términos en el artículo 2: El residuo sólido se refiere a cualquier material, ya sea orgánico o inorgánico, de naturaleza compacta, que ha sido desechado una vez que ha perdido su función original. Residuo sólido recuperable. Es todo tipo de residuo sólido que, mediante un tratamiento adecuado, puede recuperar su utilidad inicial o adquirir una nueva utilidad. Residuo sólido orgánico. Son los residuos generados por seres compuestos de órganos naturales.

Es posible reconocer cuatro tipos de residuos orgánicos. Los primeros son los restos de comida: como cáscaras de huevo o frutas, semillas, aceite, huesos, vegetales, así como desperdicios de comida. En segundo lugar, están los residuos vegetales: restos de la poda de plantas (hojas o plantas). En tercer lugar, están los restos de materiales y naturaleza: se incluyen el algodón y las prendas de ropa elaboradas con este material y con gasa, las ropas confeccionadas con pieles de animales y los restos de animales muertos. Y por último los residuos de papel: papel y cartón, servilletas y toallitas de papel (Repsol, 2023).

5.2 Sostenibilidad

Hablar de sostenibilidad es creer que existen otras formas de pensar y de ver el mundo, actuando con cuidado de no dañar y de aprovechar muy bien los recursos, considerando que estos no son infinitos, para prever y, si es posible, evitar los grandes daños ambientales en el futuro. El respeto por el medio ambiente es fundamental para lograr la sostenibilidad y es necesaria la clasificación en la fuente de los residuos y el aprovechamiento para fines cotidianos que contribuye

directamente con la disminución de los desperdicios, aportando a la Agenda 2030 y a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), Por lo tanto en esta investigación se tienen en cuenta principalmente: el número once, ciudades y comunidades sostenibles; el número doce, producción y consumo responsables, el número trece, llamado acción por el clima (ONU, 2015).

Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

A continuación, se describirá la pertinencia de cada objetivo que se relaciona con la presente investigación de los 17. El Objetivo 11; pretende lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles. Las ciudades representan el futuro del modo de vida global. Con esto es seguro pensar que los gases de efecto invernadero pueden aumentar de manera significativa, por lo que es fundamental plantear prácticas más sostenibles (ONU, 2015).

El Objetivo 12; busca garantizar modalidades de consumo y producción sostenibles, algo fundamental para mantener los medios de subsistencia de las generaciones actuales y futuras. Este objetivo invita a cambiar los hábitos y niveles de consumo, en las empresas y como individuo, para reducir y pensar bien antes de comprar (ONU, 2015).

El objetivo 13, llamado acción por el cambio climático, plantea que el problema del cambio climático afectará a todas las personas a nivel global de alguna manera. Se avecina un cataclismo climático y no estamos preparados para las consecuencias. Lo cual hace necesario implementar acciones concretas, lo que cada uno hace cuenta para nuestra casa común, es decir, el planeta. (ONU, 2025) Ser sostenible es aplicar las tres R: reducir, reciclar y reutilizar, mitigando el impacto ambiental con los recursos que se tienen (ONU, 2015).

5.3 Materiales

Los materiales permiten creer en posibilidades de vida en otros planetas, porque gracias a la ciencia y la ingeniería de materiales se creó el robot científico llamado “El Phoenix Mars Lander” para la misión de la NASA del programa de exploración a Marte, más allá de las metas de la misión,

como entender el clima o descubrir si alguna vez hubo vida en el planeta. El desafío era ganar conocimiento, entendiendo las propiedades del material como la resistencia, la fuerza y la capacidad para soportar diferentes temperaturas, entre otras características evaluadas previamente para que funcione correctamente. Las principales categorías de materiales incluyen metales, polímeros, cerámicas, compuestos y materiales electrónicos (Smith, 2014). Esta misión empleó los materiales para conocer el espacio, pero también para saber la resistencia y las propiedades de estos, poniendo a prueba conocimientos y capacidades humanas para predecir el alcance del material.

El ser humano y los materiales no dejan de evolucionar, así como la ciencia y la ingeniería; el progreso depende de las transformaciones de los materiales. El hombre prehistórico estaba limitado a los materiales de la naturaleza y aún hoy en día estamos limitados por los materiales que se obtienen en la corteza terrestre y en la atmósfera. Según el diccionario Webster: “Los materiales son sustancias con las que algo está compuesto o hecho”(Smith, 2014). Una parte de la economía actual la constituye la fabricación de materiales hasta convertirlos en productos, por lo cual es importante conocer la estructura interna de estos y sus propiedades, para elegir su aplicación y los métodos de procesamiento. Los ingenieros expertos en investigación crean nuevos materiales o modifican los existentes. La Estación Espacial Internacional (ISS, por sus siglas en inglés) es un ejemplo de la implementación de los materiales.(Smith, 2014).

La búsqueda de nuevos materiales es permanente; la ciencia de los materiales tiene por objetivo el conocimiento básico de la estructura de los materiales, junto con sus propiedades para su elaboración, mientras que la ingeniería de materiales tiene por objetivo emplear el conocimiento fundamental de los materiales para convertirlos en objetos necesarios para la sociedad. Por lo tanto, ciencia e ingeniería de materiales se relacionan entre sí y son: “El conocimiento resultante de la estructura, propiedades, elaboración y comportamiento de los materiales de ingeniería” (Smith, 2014).

Los distintos elementos y sustancias, simples o compuestas, utilizados para hacer un objeto se llaman materiales. Estos materiales pueden ser de diversa naturaleza, y clasificarse por las propiedades o las características que cambian su forma física, química, conducción eléctrica o

estructura (Álvarez, 2024). Los materiales son elementos que tienen posibilidades de cambio al ser flexibles, rígidos, frágiles o elásticos, y es posible agruparlos en conjuntos; por ejemplo, los materiales escolares o de laboratorio pueden ser de origen natural, artificial o sintético. De acuerdo con lo anterior, también se puede afirmar que hay una ciencia de materiales y una ingeniería de materiales que se utiliza principalmente en la industria.

5.3.1 Materiales Poliméricos

Los tipos de materiales en ingeniería se dividen en tres grupos principales: metálicos, poliméricos y cerámicos. “Los materiales poliméricos constan de largas cadenas o redes moleculares que frecuentemente se basan en compuestos orgánicos (precursores que contienen carbono)”. A nivel estructural, la mayoría no son cristalinos, pero algunos constan de mezclas que pueden o no serlo; la resistencia y ductilidad cambian considerablemente. La mayoría no conduce electricidad; en general tienen bajas densidades y temperaturas de descomposición bajas (Smith, 2014).

5.3.2 Materiales cerámicos

Los materiales cerámicos que son inorgánicos que pueden tener gran dureza y resistencia, “la mayoría de estos materiales están hechos mediante la aglomeración de partículas, las materias primas varían, dependiendo de la pieza que se quiere realizar, los ingredientes pueden ser húmedos o secos” (Smith, 2014). También están los materiales compuestos que son dos o más materiales que se integran para formar un nuevo material, este material tendrá propiedades distintas a las que lo constituyen, pueden ser fibrosos o particulados.

Competencia entre los materiales

Los materiales compiten entre sí; a lo largo del tiempo se puede considerar sustituir un material por otro, teniendo en cuenta factores como el costo según la forma de procesar dicho material o descubrir un material nuevo con propiedades específicas para algunas aplicaciones. Por

ejemplo, la elaboración del automóvil en Estados Unidos con la incorporación de diferentes materiales pudo cambiar su peso para que este sea más liviano (Smith, 2014).

Los materiales inteligentes y los nanomateriales son quienes afectan las diferentes industrias con el fin de revolucionar el futuro de los materiales. Los materiales inteligentes son materiales que ya existían pero que hoy se están encontrando diferentes aplicaciones para estos, “tienen la capacidad de detectar estímulos ambientales externos (temperatura, esfuerzo, humedad, luz, campos eléctricos y magnéticos) y como respuesta pueden modificar sus propiedades, estructura o funciones” (Smith, 2014). Los nanomateriales tienen una escala de longitudes que los caracteriza, con tamaño menor a 100 nm, pueden ser metálicos, poliméricos, cerámicos, electrónicos o compuestos. Los dos tipos de materiales mencionados tienen ejemplos de aplicaciones en la medicina, pero pueden repercutir en todos los campos, como la creación de pinturas y otros objetos. La imaginación es el único límite cuando se trata de las futuras aplicaciones de estos materiales, que está ligada a la capacidad de producirlos de manera eficiente y económica.

El diseño y la selección de los materiales por sus propiedades, estructuras y métodos de fabricación, así como el componente ambiental y económico, son aspectos para analizar sobre los materiales. Empezar por preguntarse para qué se utilizará dicho material, qué requisitos o funciones debe cumplir; eso es en parte lo que se espera de la investigación: lograr entender qué se puede hacer con el material resultante de la experimentación.

Características del Material

Todo material tiene unas características o propiedades generales y específicas y en este caso, el material a elaborar debe ser biodegradable, lo que implica que se descomponga de forma natural en poco tiempo, dependiendo de factores ambientales como la humedad o el calor, así como el clima del lugar. Este tipo de materiales es vulnerable al contacto con el agua, por lo general. Otra propiedad es la resistencia; si bien el material biodegradable se podrá utilizar para reemplazar un objeto determinado, como por ejemplo una azucarera que se podrá compostar al terminar su vida

útil. La elasticidad es otra característica que se genera al mezclar la cáscara de huevo con gelatina o polímeros y que al final se puede endurecer, lo que permite obtener el objeto deseado.

5.4 Biodegradable

“La biodegradación o degradación biótica es una propiedad específica de ciertos materiales plásticos, es decir, de los polímeros que estos materiales tienen. Es un proceso mediante el cual un polímero o el material se descompone bajo la influencia de elementos bióticos (organismos vivos). Microorganismos (bacterias, hongos, algas)” (Vroman & Tighzert, 2009). Los materiales biodegradables no pueden ser solo un proceso de experimentación, sino que deben llevar a un proceso de registro y de evolución. La cocina es un lugar clave para recolectar los residuos y generar materiales biodegradables (Otero, 2022). Este será el punto de partida para analizar al momento de recolectar residuos orgánicos apropiados para elaborar muestras en la presente investigación.

Biomateriales

El primer uso histórico de los biomateriales se remonta a la antigüedad, cuando los antiguos egipcios utilizaban suturas hechas de tendones animales. El campo moderno de los biomateriales combina medicina, biología, física y química, e influencias más recientes de la ingeniería de tejidos y la ciencia de los materiales. El campo ha crecido significativamente en la última década debido a los descubrimientos en ingeniería de tejidos, medicina regenerativa y más (U.S. Department of Health & Human, 2024). Según la Real Academia de la Lengua Española (RAE), “el biomaterial es un material tolerable al organismo”. Pero los materiales evolucionan constantemente y no solo se pueden utilizar en este campo, sino que pueden ser llevados a la industria.

Los biomateriales, a diferencia de los materiales tradicionales a base de petróleo, que pueden tardar siglos en degradarse y liberar sustancias tóxicas en el medio ambiente, están diseñados para integrarse de forma segura y rápida en el ciclo natural de nutrientes. La profesora Laura Messing considera que la lista de materiales es infinita porque se pueden fabricar con

cualquier residuo orgánico, como por ejemplo cáscaras de fruta o cáscaras de huevo (Messing, 2023). Además, los biomateriales son considerados materiales del futuro porque buscan la transición hacia la sostenibilidad; aunque antes el término solo se utilizaba en medicina, actualmente el biomaterial está cobrando vida en diferentes contextos, haciendo parte de los materiales para diferentes industrias (Weiss, 2022).

Beneficios de los Biomateriales

El origen de los biomateriales es biológico, se utilizan recursos renovables como plantas, algas, hongos o residuos orgánicos en su elaboración. Se pueden compostar, lo que indica que se descomponen mediante la acción de microorganismos en un período de tiempo relativamente corto o en pocos meses. Por lo tanto, no liberan sustancias tóxicas y se transforman en nutrientes para el suelo. Lo mejor de todo es que son sostenibles porque no incluyen ninguna materia prima extractivista. “Tanto las materias primas como los procesos se ajustan al ciclo de economía circular en la que los residuos se convierten en productos y, al cabo de su vida útil, en tierra fértil para dar paso a nuevas materias primas” (Messing, 2025).

Tipos de biomateriales

Los biomateriales apoyan la transición hacia una práctica más sostenibles; para esto es necesario observar, investigar y documentar el proceso, identificar los descartables a utilizar según la disponibilidad del contexto para aportar al medio ambiente, desarrollando ensayos de prueba y error con los materiales orgánicos, verificando cuáles se pueden replicar.

Existen alrededor de 434 materiales que se han podido transformar junto con diferentes creadores en todo el mundo, según el banco de materiales del futuro (Fundación Future Materials, 2024). En la siguiente tabla se muestran los diferentes biomateriales que la fundación ha ido clasificando según su procedencia y la cantidad que existe para cada categoría. Podemos encontrar biomateriales de origen biológico, reciclados, pinturas, textiles, entre otros. Esto nos permite obtener una visión general de la diversidad y variedad de biomateriales disponibles.

Los materiales biodegradables apoyan la transición hacia una práctica más sostenible; para esto es necesario observar, investigar y documentar el proceso, identificar los descartables a utilizar según la disponibilidad del contexto, desarrollando ensayos de prueba y error con los residuos orgánicos u otras materias primas. Existen alrededor de 434 biomateriales que se han podido transformar gracias a diversos creadores en todo el mundo, de los cuales 254 son materiales biodegradables, como se observa en la **Tabla 1**, donde se encuentran las cantidades de los tipos de biomateriales según el banco de materiales del futuro (Future Materials Bank, 2024).

Tabla 1. *Tipos y cantidad de biomateriales según su origen y composición*

Tipo de Biomaterial	Cantidad de Biomateriales por tipo
Material animal	64
Bacterias	26
Biodegradable	254
Bioplástico	80
Bioresina	21
Material de la placa	31
Circular	238
Limpieza	7
Compuesto	107
Tinte	49
Comercio justo	12
Fibra	75
Glaseado	17
Pegamento	11
Material humano	19
Tinta	20
Aceite	8
Pintura	20
Documento	27
Pigmento	51
De origen vegetal	185

Polímero	42
Reciclable	137
Reciclado	135
Regenerativo	56
Material inteligente	6
Textil	100
Vegano	98
Cera	4

Nota. Adaptada a partir de la recopilación de los tipos de biomateriales de Fundación Future Materials, 2024 (<https://www.futurematerialsbank.com/>).

Aplicaciones de los biomateriales

A nivel de medicina, “los metales, la cerámica, el plástico, el vidrio e incluso las células y tejidos vivos pueden utilizarse para crear un biomaterial”. En ese caso, son rediseñados en piezas moldeadas para dispositivos o productos biomédicos. Por ejemplo: válvulas cardíacas, reemplazos de articulaciones de cadera, implantes dentales. En algunos casos son biodegradables, y bio-absorbibles, lo que significa que se eliminan lentamente del cuerpo al terminar su vida útil (U.S. Department of Health & Human, 2024).

Por otra parte, los biomateriales tienen aplicaciones artísticas, por parte de diseñadores, principalmente en la industria textil, reemplazando materiales como el cuero, con el fin de disminuir el impacto negativo que genera la moda rápida, formando islas y montones de basura en diferentes países. Lo que indica que los biomateriales son empleados en distintos contextos que dan lugar a un tipo de uso, y los avances en la ciencia y en la tecnología han permitido emplear a todos los materiales disponibles y se han desarrollado enorme cantidad de materiales sintéticos (Duffó, 2011).

5.5 Huevo

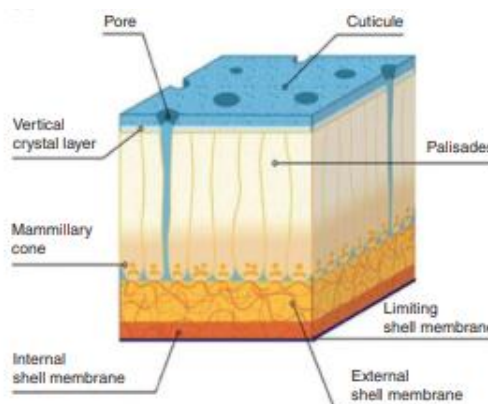
Entender los orígenes del huevo implica conocer la domesticación de la gallina a nivel histórico, aproximadamente entre el 3200 y el 8000 a. C. en la India, mientras que otros establecen que la domesticación fue en la China o en Egipto, presentando pocos detalles de dicha domesticación. En el caso de América, le asignan a Colón la introducción de las gallinas provenientes de Asia (Montes VD, de la Ossa VJ, Hernández HD 2019). "Una teoría afirma que las gallinas llegaron a América durante los primeros viajes de Colón y que por más de 500 años han adaptado, su productividad a estas condiciones medioambientales" (Tovar JL, Narváez-Solarte W, Takahashi SE 2014).

En América, al llegar los españoles, en la ciudad de México, impusieron a las comunidades indígenas que debían criar doce gallinas de origen español y seis de raza criolla, con el fin de proliferar la especie en el territorio conquistado, Se consideró a la gallina como un animal que les proveía alimentos, domesticando a la especie conocida como *Gallus gallus domesticus*. (Mariaca R 2013). El proceso de formación del huevo influye en sus componentes internos y externos, proceso que se encarga de desarrollar la gallina de manera natural.

La cáscara de Huevo

La cáscara de un solo huevo representa del 9 al 12% de su peso; durante 10 horas se desarrolla la cáscara en el interior de las gallinas. En la parte más externa se encuentran la cáscara calcificada, la cutícula y el empalizado, que evitan el daño físico y la contaminación microbiana. Al ser porosa, promueve el intercambio de gases y agua. En su interior contiene una yema concéntrica o vitelo, rodeada por la chalaza, cuya función es mantenerla en el centro y que tiene contacto directo con la clara, como se observa en la **Figura 1**, la estructura de la cáscara de huevo presenta una composición compleja de diferentes minerales. (Hinckel MT, Nyes Y, Gautron J, Mann K, Rodríguez-Navarro AB, Mckee MD 2012).

Figura 1. Estructura de la cáscara de huevo



Nota. Tomada de *The genetics of eggshell formation*, por M. T. Hincke et al., 2012, University of Ottawa.

La cáscara de huevo está conformada por un 95% de compuestos minerales y entre un 3,0% y un 3,5% por componentes orgánicos, proteoglicanos y proteínas como ovocleidina 116, ovotransferrina, ovoalbúmina, ovocalixina 32, ovocleidina 17, osteopontina (OPN) y lisozima, que intervienen en la morfología de los cristales de calcita, además en la protección microbiana y regulación de las mineralizaciones de la cáscara (Neunzehn J, Szwart T, Wiesmann HP.2015). Un compuesto como la ovocleidina solo se reportaba en las primeras investigaciones en la membrana de la cáscara de huevo. Pero al utilizar la microscopía electrónica de barrido, se ha mostrado cómo la parte proteica se entrelaza con los cristales de calcita, composición que está relacionada con la dureza de la cáscara, que posee cuatro capas (Bedoya-Salazar & Valencia-González, 2020).

De acuerdo con la Asociación Estadounidense del Huevo "American Egg Board" la cáscara del huevo está compuesta de carbonato de calcio (aproximadamente 94 %) con pequeñas cantidades de carbonato de magnesio, fosfato de calcio, proteínas y otras materias orgánicas. La cáscara de huevo tiene un porcentaje de calcio constante, independientemente de la raza de gallina; este es un material seguro que no perjudica la salud humana porque presenta cantidades bajas de metales pesados (Bedoya-Salazar & Valencia-González, 2020). Como se detalla en la **Tabla 2**, se destaca el contenido mineral que conforma la cáscara de huevo, características fundamentales para determinar si es oportuno incorporarla en un nuevo material.

Tabla 2. Composición mineral y química de la cáscara de huevo

Categoría	Componente	Proporción y observaciones
Componente Mayoritario	Carbonato de Calcio (CaCO ₃)	Predominante (brinda rigidez y formación).
Componentes Minoritarios	Carbonato de Magnesio	1%
	Fosfato de Calcio	1%
Materia Orgánica	Glicoproteínas y Proteoglicanos	3.5% a 4% (incluye arginina y glutamina).
Oligoelementos	Minerales Esenciales	Boro (B), Estroncio (Sr), Cobre (Cu), Hierro (Fe), Manganeso (Mn), Molibdeno (Mo), Azufre (S), Silicio (Si) y Zinc (Zn).
Elementos Pesados	Metales (Valores mínimos)	Plomo (Pb), Aluminio (Al), Cadmio (Cd) y Mercurio (Hg).

Nota. Adaptado de "Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática", por A. Bedoya Salazar y M. P. Valencia González, 2020, Revista Colombiana de Ciencia Animal RECIA,12 (<https://tinyurl.com/mpu727tf>).

6 Metodología

El diseño experimental se fundamentó en la preparación de tres muestras experimentales con la adición de cáscara de huevo, previamente pulverizada y tamizada de la cáscara de huevo. Por lo tanto, se analizó la proporción del residuo orgánico como variable independiente sobre las variables dependientes, clasificadas en propiedades físicas como la masa, el volumen, la densidad y el espesor. Además de medir propiedades organolépticas como el color y mecánicas como la elasticidad. Para las tres muestras experimentales obtenidas, FA, FB y FC, se realizó la caracterización bajo condiciones ambientales controladas, siguiendo los lineamientos de la norma ASTM D882-02, estandarizando los ensayos para evaluar la tracción, lo cual garantizó la estandarización y reproducción de ensayos.

6.1 Materiales y métodos

6.1.1 Recopilación bibliográfica

La investigación se inició con la recopilación bibliográfica para identificar los materiales e instrumentos y seleccionar el residuo orgánico a utilizar, teniendo en cuenta su abundancia en el territorio y sus propiedades para la elaboración del biomaterial.

6.1.2 Materiales

La ejecución de la presente investigación requirió de diferentes recursos y materiales; se valoró la incorporación del residuo orgánico como fase de refuerzo, que se integró a una matriz polimérica. La selección de estos materiales responde a la disponibilidad local y compatibilidad química. En la **Tabla 3** se describe la función del material con su categoría respectiva.

Tabla 3. *Materiales utilizados.*

Categoría	Elemento	Descripción
Sólida	Cáscara de huevo de gallina	Fuente de carbonato de calcio (CaCO_3); aporta rigidez y textura al biomaterial.
Agentes estructurales y Plastificantes	Gelatina sin sabor	Polímero natural que actúa como base aglutinante para formar una película.
Solventes	Glicerina	Proporciona elasticidad.
Conservantes	Agua	Medio de hidratación para los polímeros.
	Ácido acético	Actúa como conservante en la mezcla.

Nota. Tabla diseñada por la autora para describir los materiales utilizados.

6.1.3 Instrumentos

Para la caracterización técnica y el procesamiento del biomaterial se utilizaron diversos instrumentos de alta precisión calibrados previamente, minimizando la incertidumbre en las medidas de las propiedades. En la **Tabla 4** se encuentra la descripción de los instrumentos con su respectivo uso en cada proceso.

Tabla 4. *Instrumentos utilizados.*

Etapas del Proceso	Instrumentación	Función
Preparación de Materia Prima	Molino	Trituración, refinamiento y clasificación granulométrica de la cáscara.
Medición de Masa	Tamiz 500 μm y 75 μm Balanza analítica	Pesaje de precisión para formulaciones y mezclas.
Procesamiento Térmico	Recipiente apto para el calor.	Mezclado y cocción de la formulación polimérica.
Conformado y Corte	Moldes (plástico y metal). Bisturí y regla.	Moldeo de probetas y dimensionamiento de las muestras finales.
Caracterización	Texturómetro, colorímetro y micrómetro	Medición de propiedades mecánicas, apariencia visual y espesor.

Nota. Tabla diseñada por la autora para describir los instrumentos utilizados.

6.1.4 Experimentación

6.1.4.1 Pretratamiento de la biomasa

Para aprovechar el residuo orgánico, se clasificaron las cáscaras de huevo; se realizó un pretratamiento de lavado y desinfección para evitar que se genere una contaminación cruzada al incorporarlas en la mezcla. Además, se secaron a temperatura ambiente durante 24 horas, se molieron con el fin de reducir el tamaño de la partícula hasta obtener un polvo, finalizando con el tamizado del material particulado para lograr una granulometría de mayor a menor dimensión 500 μm y 75 μm , que posteriormente se reservó en un recipiente (**Figura 2**).

Figura 2. Proceso de molienda de la cáscara de huevo



Nota. Fotografía tomada por la autora del proceso de molienda.

6.1.4.2 Preparación de la mezcla para obtener el biomaterial

La mezcla inicial se realizó con agua destilada, gelatina sin sabor y glicerina, base clásica para conformar el bioplástico. La mezcla se depositó en moldes con láminas de acetato y madera MDF, según formulación desarrollada por Miriam Ribul en su publicación. Recipes for Material Design (2014), es considerada la "biblia" moderna del bioplástico casero, donde estandarizó proporciones. Así mismo, Clara Davis (2017), incorporó en plataformas como Materiom información documentada y abierta para el uso de personas que deseen fabricar biomateriales. Las cantidades determinadas para la fabricación se muestran en la **Tabla 5** (Future Materials Bank, 2024).

Tabla 5. Composición de la mezcla base para el biomaterial.

Componente	Cantidad
Agua destilada	120 ml
Gelatina sin sabor	24 g
Glicerina	10 ml

Nota. Tabla diseñada por la autora para reconocer los componentes y las cantidades del biomaterial.

6.1.4.3 Preparación de la mezcla de biomaterial con adicción de cáscara de huevo

Se midieron las cantidades de los materiales utilizando una balanza digital y un vaso de precipitado. Estos se incorporaron en un recipiente resistente al calor, en el siguiente orden: el agua destilada, la gelatina sin sabor previamente hidratada, la glicerina y, por último, se incorporó la cáscara de huevo triturada agitando continuamente. El recipiente se calentó a 140 °C, buscando derretir la gelatina; sin embargo, la mezcla no debe sobrepasar los 80 °C y 90 °C, porque es el punto donde las proteínas de la gelatina pueden empezar a degradarse (Clara Davis et al., 2017). Hasta obtener una consistencia homogénea para ser depositada en moldes. Las muestras se dejaron secar a temperatura ambiente. Se prepararon 7 muestras con diferentes proporciones de cáscara de huevo; la **Tabla 6** muestra la cantidad utilizada en cada experimento.

Tabla 6. *Materia prima para preparar cada biomaterial.*

Biomaterial	Cáscara de huevo (g)	Glicerina (ml)	Gelatina (g)	Agua destilada (ml)
1	0	3.4	8	40
2	2	3.4	8	40
3	6	3.4	8	40
4	8	3.4	8	40
5	10	3.4	8	40
6	15	3.4	8	40
7	20	3.4	8	40

Nota. Tabla diseñada por la autora que contiene la cantidad de materia prima utilizada para la elaboración de las muestras de biomateriales.

6.1.4.4. Preparación de la mezcla final

Con base en la experimentación anterior, en la **Tabla 7**, se establecieron tres variantes experimentales: formulación FA (Formulación base sin cáscara de huevo), y las otras dos formulaciones con incorporación de 120 g de residuo orgánico, correspondiente a cáscara de huevo con dos tipos de tamaño de partícula: formulación FB (Formulación con cáscara de huevo con un tamaño de 500 μm) y formulación FC (Formulación con cáscara de huevo con un tamaño de 75 μm), pasando de mayor a menor tamaño, para evaluar el efecto de la adición de la cáscara de huevo, con diferente tamaño de partícula, en las propiedades fisicoquímicas del biomaterial. A cada muestra se le adicionan 5 ml de Ácido Acético al 4 %v/v, porque al reaccionar con el carbonato de calcio (CaCO_3) facilitó la integración de este en la matriz polimérica, considerando que está sustancia bajó el pH y cambió la acidez del medio, atenuó compuestos orgánicos volátiles, neutralizando olores residuales de origen proteico del residuo avícola. Además, el ácido acético

brindó propiedades fungistáticas que inhiben el crecimiento o reproducción de hongos en el biomaterial, asegurando la integridad biológica durante el tiempo de almacenamiento.(Weiss Münchmeyer & Besoain Narvaez, 2022)

Tabla 7. Biomaterial con las formulaciones FA, FB y FC.

Formulaciones	Partículas (μm)	Cáscara de huevo (g)	Glicerina (ml)	Gelatina (g)	Agua (ml)	Ácido acético al 4 %v/v (ml)
FA	0	0	10,2	24	120	5
FB	500	120	10,2	24	120	5
FC	75	120	10,2	24	120	5

Nota. Tabla diseñada por la autora donde se observa composición de las tres formulaciones FA, FB y FC.

6.2. Caracterización de los biomateriales

6.2.1. Masa

Desde una perspectiva de física y mecánica, la masa se define como una propiedad inherente de la materia que cuantifica la resistencia de un cuerpo a modificar su estado de movimiento, actuando como una medida de la inercia (Serway et al., 2018). En este estudio, se determinó la masa de los biomateriales mediante una balanza analítica utilizando tres muestras de cada formulación, con dimensiones de 2 cm x 2 cm. Esta medición es fundamental para asegurar la reproducibilidad y la calidad del material, ya que constituye un parámetro esencial para el cálculo de la densidad. La masa está relacionada con otras propiedades físicas como la porosidad y la resistencia mecánica, lo cual permite realizar comparaciones entre las formulaciones FA, FB y FC.

Por lo tanto, el control preciso de la masa garantiza la homogeneidad de las probetas, facilitando análisis estadísticos válidos entre las distintas formulaciones experimentales (Serway et al., 2018).

6.2.2. Volumen

El volumen se establece como una magnitud derivada del Sistema Internacional, definida geométricamente a partir del cubo de la longitud (Thompson & Taylor, 2008). Se determinó el volumen aplicando la fórmula geométrica de un sólido regular, que consistió en multiplicar las longitudes de cada lado (dimensiones de largo, ancho y alto), se midió la longitud de cada lado (L) y luego se multiplicó cada uno: $L \times L \times L$. Dado que la cáscara de huevo actúa como relleno mineral, la cuantificación del volumen ocupado por la matriz y el refuerzo permite calcular la matriz geométrica y, por ende, la densidad teórica, e identificar el porcentaje de la porosidad o los vacíos remanentes en la estructura. Este parámetro es un indicador predictivo del comportamiento del material ante esfuerzos de compresión y su permeabilidad, ya que un volumen excesivo de poros suele traducirse en una reducción de las propiedades mecánicas y una mayor susceptibilidad a la absorción de fluidos. Por tanto, el control volumétrico preciso garantiza que las variaciones observadas en los ensayos de tracción se deban a la formulación química y no a defectos estructurales o heterogeneidades en el moldeo de las muestras (Callister et al., 2018).

6.2.3. Densidad

De acuerdo con la norma ASTM D792 (ASTM International, 2020), la medición de la densidad por desplazamiento permite identificar variaciones estructurales internas en polímeros compuestos. Se determinó la densidad como indicador de integridad estructural y homogeneidad del biomaterial, que comprende matrices poliméricas reforzadas con partículas de cáscaras de huevo en el caso de las formulaciones FB y FC. La densidad permite evaluar el grado de compactación alcanzado y la eficacia de la dispersión de la carga mineral. Permite correlacionar la masa con el desempeño mecánico, ya que variaciones en la densidad suelen señalar la presencia de micro cavidades o burbujas de aire atrapadas que actúan como concentradores de esfuerzos. Además, conocer la densidad es indispensable para calcular la relación entre la resistencia y el peso, permitiendo comparar la eficiencia del biomaterial desarrollado frente a polímeros sintéticos

convencionales y determinar su viabilidad técnica para aplicaciones donde el ahorro de peso es un factor determinante (Acosta Medina et al., 2023). Para dicha medida se utilizó la siguiente fórmula de densidad, que consiste en dividir el resultado de la masa y el volumen de cada muestra. Matemáticamente esta propiedad se expresa mediante la Ecuación 1:

Ecuación 1. Densidad

$$\rho = \frac{m}{v}$$

La densidad (ρ) es una propiedad física intensiva definida como la relación entre la masa de un cuerpo, entendida como la medida cuantitativa de su inercia y el volumen o espacio tridimensional que este ocupa (Serway et al., 2018).

6.2.4. Espesor

El espesor es un parámetro de control dimensional para caracterizar las láminas del biomaterial, ya que actúa como factor de normalización que sirve para calcular las propiedades mecánicas. La uniformidad en el espesor es un indicador de calidad, en especial del proceso de vertido y secado, así como de la correcta dispersión de las micropartículas de carbonato de calcio. Se utilizó el micrómetro para medir el espesor de cada muestra, FA, FB y FC. Con el fin de garantizar la homogeneidad, todas las probetas fueron colocadas en un tamaño estándar de largo y ancho (10 cm $\times$ 1 cm) para asegurar la repetibilidad en los experimentos posteriores. El espesor, además, permite evaluar la viabilidad del biomaterial para aplicaciones de empaque, donde la barrera física y la elasticidad dependen estrictamente de esta dimensión.

6.2.5. Propiedad Mecánica

La evaluación de las propiedades mecánicas mediante el ensayo de tracción o tensión es importante para determinar la capacidad de carga y la integridad estructural del biomaterial, porque la medición del esfuerzo de tensión permite determinar la elasticidad y el módulo de frecuencia,

así como cuantificar la eficiencia de la transferencia de carga entre la fase continua y la fase dispersa. Con el texturómetro (*TA.XTplusC de Stable Micro Systems*) (ver **Figura 3**) se estableció el límite de fluencia y el punto de ruptura, parámetros que ayudan a definir la competitividad entre polímeros derivados del petróleo y el rango de aplicación técnica. Se utilizaron las 15 probetas de cada una de las formulaciones, FA, FB y FC en forma de láminas delgadas cortadas de 10 cm x 1 cm, para medir la tensión que puede soportar el material, como lo indica la norma (ASTM D882-02). Este análisis permite identificar si la incorporación de las partículas de cáscara actúa como un agente de refuerzo que incrementa la rigidez o si, por el contrario, genera puntos de concentración de esfuerzos que fragilizan la estructura, permitiendo optimizar la formulación en función de las demandas mecánicas del producto final.

Figura 3. Texturómetro



Nota. Fotografía tomada por la autora del texturómetro utilizado en el ensayo de tensión.

6.2.6 Colorimetría

La colorimetría es una propiedad que permite evaluar la apariencia estética del material, como su homogeneidad antes y después de incorporar el residuo orgánico, Sin embargo, el color no es únicamente un atributo visual, sino que permite identificar oxidaciones y alteraciones térmicas, además de ayudar a cuantificar la opacidad y la transparencia. Por lo tanto, se midieron tres muestras de cada formulación con un colorímetro, teniendo en cuenta las coordenadas del código de color CIE-L*A*B*, siglas que representan: la L (luminosidad de negro a blanco), la A (luminosidad de verde a rojo) y la B (luminosidad de azul a amarillo) para comunicar el color objetivamente de cada formulación FA, FB y FC.

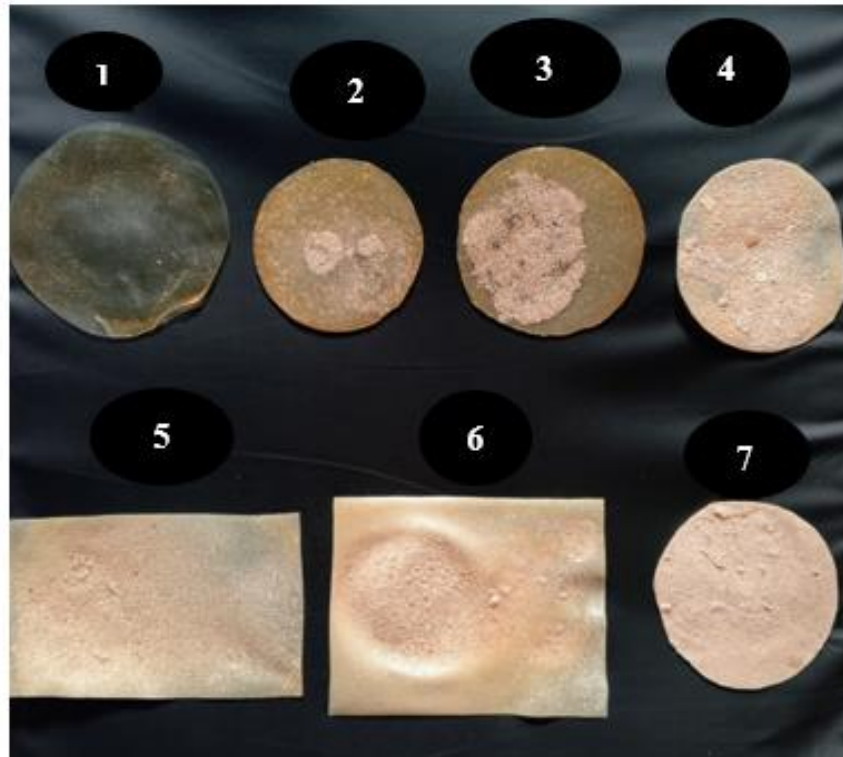
Cabe resaltar que el sistema de color CIELAB es la fuente oficial más rigurosa a nivel internacional; es la Comisión Internacional de la Iluminación (CIE, por sus siglas en francés, Commission Internationale de l'Éclairage), junto con la Organización Internacional de Normalización (ISO). La norma ISO 11664 define los métodos para calcular y expresar el color, desarrollada en conjunto con el CIE. La serie 11664-4 especifica cómo se deben realizar los cálculos matemáticos para transformar la luz medida en coordenadas de color que el ojo humano pueda entender y es la más utilizada en la industria para el control de calidad, incluyendo las correlaciones de luminosidad, croma y matiz. Dependiendo el material que se pretenda medir (International Organization for Standardization, 2019)

7. Resultados

7.1. Preparación de la mezcla de biomaterial con adicción de cáscara de huevo

A partir de la preparación del biomaterial con las formulaciones que se muestran en la **Tabla 7**, se obtuvieron los biomateriales con diferentes consistencias conforme se incrementa el residuo orgánico, identificando a simple vista una transición heterogénea de las partículas que se aglomeraron en el centro o en los bordes del material y dejando una dispersión ineficiente en la etapa sólida, lo anterior se presentó porque la cáscara de huevo no se integró con los demás componentes del material y esto puede ser ocasionado por el tamaño de las partículas (ver **Figura 4**). Además, se observan diferentes texturas: lisa, rugosa y granular, con porosidad interconectada. A nivel macroscópico, el material no tiene un color uniforme porque tiene índices de amarillez y color beige al incorporar el residuo orgánico; se observan algunas grietas en los bordes al retirarse del molde.

Figura 4. Muestras obtenidas del biomaterial



Nota. Fotografía tomada por la autora de las 7 muestras del biomaterial.

A partir de la muestra dos se agregó la cáscara de huevo gradualmente y se observó que este residuo queda encapsulado dentro de la matriz polimérica, generando una mezcla heterogénea debido a la sedimentación del material particulado en la base o en un punto específico del molde. Respecto a su procesamiento, la alta velocidad de enfriamiento de la mezcla exige un vertido rápido para asegurar una distribución uniforme. No obstante, el material presenta propiedades termoplásticas que permiten su reprocesamiento mediante la adición de agua y la aplicación de calor, facilitando así la corrección de defectos de forma.

7.1.2 Preparación de la mezcla final

Con el propósito de caracterizar las propiedades representativas del biomaterial, se escaló el volumen de las formulaciones; dicho incremento permitió corregir las limitaciones observadas

en los ensayos preliminares, donde el tamaño de las probetas impedía un análisis significativo. Asimismo, bajo el criterio de sostenibilidad y viabilidad económica, se sustituyó el uso de agua destilada por agua de la red, minimizando su impacto en el costo de producción. Es importante indicar que no se observan variaciones significativas con el cambio de solvente. Además, se favoreció la homogeneidad de la muestra aumentando el área de extensión del material, empleando unidades de moldeo metálicas rectangulares.

En el protocolo de preparación del biomaterial, se hidrató el agente polimérico en un medio acuoso a temperatura ambiente durante 10 minutos. Posteriormente, se aplicó un tratamiento térmico para facilitar la solubilización, incorporando el plastificante; se consiguió la estabilidad biológica y se mitigó la proliferación de agentes fúngicos, cuando se incorporó el ácido acético, como se observa en la **Tabla 6**, un paso fundamental fue tamizar el residuo orgánico para reducir el tamaño de la partícula, logrando mayor homogeneidad. A su vez, se sostuvo una agitación mecánica que permitió consolidar la uniformidad del material. A continuación, en la **Figura 5**, se observa el biomaterial obtenido con cada formulación: FA, FB y FC, de donde se obtuvieron las probetas para proceder con el análisis de sus propiedades.

Figura 5. Formulaciones FA, FB y FC.



Nota. Fotografía tomada por la autora del biomaterial sin cáscara de huevo (FA), biomaterial con partículas de cáscara de huevo con un tamaño de 500 μm (FB) y biomaterial con partículas de cáscara de huevo con un tamaño de 75 μm (FC).

Se analizó cada biomaterial determinando que la morfología de la Formulación FB presenta una dispersión homogénea de la cáscara de huevo a pesar del uso de una granulometría de 500 μm . Macroscópicamente el material da cuenta de una textura rugosa que se le atribuye al tamaño de la partícula del residuo. Lo anterior permitió comparar las muestras FB y FC, y se estableció una relación inversamente proporcional entre el tamaño de la partícula y la homogenización de la mezcla; a menor diámetro de la partícula, se da mayor continuidad de la matriz polimérica. En la formulación FC se incorporó la cáscara de huevo con un tamaño de partícula de 75 μm . Al comparar el biomaterial obtenido con ambas formulaciones (FB y FC), se observa, en los análisis preliminares, que la formulación FC, con el menor tamaño de partícula de cáscara de huevo (75 μm), presenta una textura lisa, con mayor firmeza y resistencia a la deformación, lo cual se puede observar en la Figura 5.

7.2. Caracterización de los biomateriales

7.2.1. Masa

La determinación de la masa es un paso fundamental para los cálculos posteriores de resistencia del biomaterial. En la **Tabla 8** se muestran los resultados de la masa de las tres formulaciones del biomaterial y proporcionan información clave sobre la viabilidad técnica para someter las muestras a los análisis posteriores; se debe considerar que la muestra que tiene la mayor masa es la formulación FC y la de menor masa es FA, lo que indica que la ausencia de la cáscara de huevo hace que sea más liviana, (ver **Figura 6**).

Figura 6. Muestras para la masa de FA (1), FB (2) y FC (3).



Nota. Fotografía tomada por la autora de las tres muestras con medidas de 2 cm x 2 cm y espesores de 0.26 mm, 1.11mm y 0.80 mm respectivamente, que permitieron obtener la masa.

Tabla 8. Masa del biomaterial.

Formulaciones	Masa (g)
FA	0,193
FB	0,408
FC	0,448
Masa Promedio	0,350
Varianza (σ^2)	0,01875
Desviación Estándar (σ)	0,1369

Nota. Las masas fueron medidas con una balanza analítica. Elaboración propia.

Ecuación 2. Varianza

$$Varianza = \sigma^2 = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$$

Ecuación 3. Desviación Estándar

$$Varianza = \sigma = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

De acuerdo con la tabla 8, la diferencia de cada muestra con respecto a la masa promedio (0,350g) es de alrededor de 0.137g.

7.2.2. Volumen

La determinación del volumen es un paso fundamental para los cálculos posteriores de resistencia del biomaterial. En la **Tabla 9** se muestran los resultados del volumen de las tres formulaciones del biomaterial y proporcionan información clave sobre la viabilidad técnica para someter las muestras a los análisis posteriores; se debe considerar que la muestra que tiene el mayor volumen es la formulación FB y la de menor volumen es FA.

Tabla 9. Dimensiones y volumen de las formulaciones

Formulaciones	Dimensiones (cm)	Volumen (cm ³)
FA	2x2x0,26	1,04
FB	2x2x1,11	4,44
FC	2x2x0,80	3,2
Volumen Promedio		2.89
Varianza (σ^2)		2.96
Desviación Estándar (σ)		1.72

Nota. El volumen se calculó multiplicando el área superficial por el espesor de cada muestra, medido utilizando un tornillo micrométrico. Elaboración propia.

7.2.3. Densidad

La densidad se determinó mediante la relación masa/volumen de las muestras, entendiendo que el valor mínimo obtenido fue de 0,092 g/cm³, correspondiente a la muestra FB; el valor máximo fue de 0,186 g/cm³ en la muestra FA. Los resultados anteriores indican que la muestra FB es menos densa que la muestra FA, aproximadamente en un 50 %, lo cual se debe a la porosidad o formación de burbujas de aire atrapadas en el biomaterial de la formulación FB, así como a la pérdida de humedad desigual durante el secado y a la distribución no uniforme de las cargas minerales atrapadas en el aglutinante. En la **Tabla 10** se presentan los resultados de la densidad de las tres formulaciones. Los tres materiales presentan baja densidad porque oscilan entre el 0,09 y el 0,18 g/cm³, en comparación con la densidad estándar internacional establecida para los productos derivados del Polietileno (PE) que son ampliamente utilizados en la industria, cuyo rango de baja densidad para bolsas o empaques plásticos se ubica entre 0.910 y 0.940 g/cm³, como lo indica la norma ASTM D1248-16 (*Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*, 2016).

Estos rangos de densidad son comparables a los utilizados en la industria de las espumas biodegradables a base de almidón, donde el rango objetivo es de 0.09 g/cm³ – 0.18 g/cm³,

consiguiendo un equilibrio entre la ligereza y la rigidez estructural del material para el uso de empaques protectores (Zhang & Sun, 2007).

Tabla 10. Densidad calculada del biomaterial

Formulaciones	Densidad(g/cm ³)
FA	0,186
FB	0,091
FC	0,140
Densidad Promedio	0,139
Varianza (σ^2)	0,002
Desviación Estándar (σ)	0,047

Nota. Los valores representados en la tabla son el promedio de las tres mediciones. Elaboración propia.

7.2.4. Espesor

Se analizaron los resultados del espesor, dando cuenta de tres resultados distintos: el espesor mínimo fue de la muestra FA con 0,26 mm, el espesor máximo fue de la muestra FB con 1,11 mm, con un espesor promedio de 0,72mm. En la **Tabla 11** se observa que la formulación FB es cuatro veces más espesa que la formulación FA, debido el efecto de la adición de partículas de cáscara de huevo en el espesor de la muestra.

Tabla 11. Espesor y dimensiones geométricas.

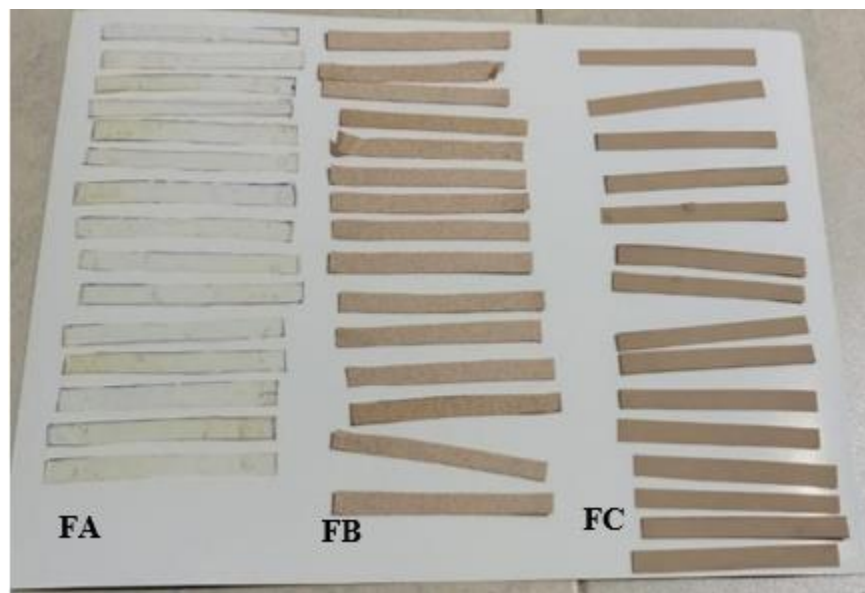
Formulación	Espesor (mm)	Largo(cm)	Ancho(cm)
FA	0,26	10,0	1,0
FB	1,11	10,0	1,0
FC	0,80	10,0	1,0

Nota. Las medidas del espesor corresponden al promedio de tres puntos de la muestra tomadas con un tornillo micrómetro. Elaboración propia.

7.2.5. Propiedad Mecánica

El comportamiento a tensión de las tres formulaciones se determinó con un texturómetro, atendiendo a la norma ASTM D882-02. Para lo anterior, se prepararon 15 muestras de cada formulación con las mismas dimensiones: 10 cm de largo, 1 cm de ancho y el espesor indicado en la Tabla 11. Las muestras obtenidas para la medición en el texturómetro se observan en la **Figura 7**.

Figura 7. Probetas de los biomateriales cortados por dimensiones.



Nota. Las probetas están cortadas en dimensiones estandarizadas para el ensayo de tensión. Elaboración propia.

En términos generales, de las 15 muestras de FA se observa que no hubo ruptura y se conserva parte de la región elástica. Mientras que las 15 muestras de FB se presentan un poco porosas y como un biomaterial más rígido, por ende, menos elástico que la formulación FA que no tiene cáscara de huevo. Los resultados de las diferentes muestras de FB que se observan en la **Tabla**

12 reflejan una mayor consistencia al incorporar las cáscaras de huevo con un tamaño de partícula de 500 μm , evidenciando una dispersión en los valores de rotura que presenta una elasticidad inferior que en las muestras FA y FC al requerir una fuerza de menor magnitud para provocar la rotura. Las 15 muestras de FC presentan mayor rigidez que las muestras FB, pero continúa siendo menos elástico que la formulación FA, sin cáscara de huevo.

Tabla 12. *Propiedades mecánicas de las muestras FA, FB y FC.*

		Propiedades mecánicas		
		Fuerza (MPa)	Deformación de rotura (%)	Tensión (MJ/m³)
FA	Desviación estándar	1,308	34,016	1,369
	Coefficiente de variación	27,619	12,481	34,430
FB	Desviación estándar	0,073	9,566	0,030
	Coefficiente de variación	12,167	8,293	27,414
FC	Desviación estándar	0,164	9,015	0,052
	Coefficiente de variación	8,750	8,801	22,180

Nota. Resultados del ensayo de tracción de las quince muestras formulación FA, FB y FC.
Elaboración propia.

Como se evidencia en la **Tabla 12**, los valores de fuerza requerida para romper la muestra son en promedio de 4,738 MPa, con una variabilidad que oscila entre aproximadamente 2,2 y 6,5 MPa. Lo que además se refleja en la deformación de rotura y la tensión, directamente relacionadas con la fuerza requerida. A mayor fuerza se alcanza una mayor deformación y se tiene una tenacidad más alta. El rango de deformación de las muestras se ubica entre el 219% y 327% aproximadamente, una variación significativa considerando que es la misma muestra. Esto sugiere una gran elasticidad del material, pero con una alta heterogeneidad en la superficie de este causada por factores en su proceso de fabricación y compactación.

Los resultados anteriores presentan una baja variabilidad en la fuerza, tensión y deformación de rotura, tal como se refleja en la **Tabla 12**, lo que constituye a esta muestra como la más consistente entre las tres. Si bien su elasticidad es baja, los valores en la desviación estándar representan un material más uniforme y resistente para un potencial uso en ecoempaques (Acosta Medina et al., 2023).

7.2.6. Colorimetría

Este sistema ayuda a calcular la diferencia exacta de un color entre dos muestras, conocida como ΔE (Delta E), donde valores inferiores a 1 son generalmente imperceptibles para el ojo humano.

Tabla 13. Colorimetría.

Colorimetría	
L*	Luminosidad
a*	Coordenadas rojo / verde (+a indica rojo, -a indica verde)
b*	Coordenadas amarillo / azul (+b indica amarillo, -b indica azul)

Nota: Tabla tomada y adaptada de (Commission Internationale de l'Éclairage [CIE], 2019)

En el análisis del parámetro de colorimetría FA, todos los valores de luminosidad L* (va de 0 hasta 100) están en un rango de 80, lo que indica que son tonos pastel o colores claros. Además, la muestra 1 es más clara, mientras que la muestra 2 es la más oscura de las tres. Por lo tanto, la muestra uno es más brillante y tiene un tono crema o marfil. En la coordenada a* (rojo y verde), todos los valores son negativos pero muy cercanos a cero, lo que indica una tendencia que es casi imperceptible hacia el verde, donde se encuentran los valores negativos, pero en la práctica se consideran tonos neutros en este eje. Es la más "saturada" en amarillo y la menos luminosa. En la coordenada b* (amarillo y azul), todos los valores son positivos; por lo tanto, tienden al amarillo.

En la **Tabla 14** se detallan los valores de los resultados en las pruebas de colorimetría de tres muestras seleccionadas aleatoriamente de cada uno de los biomateriales. De donde se obtiene

que las muestras 1 y 2 poseen una presencia clara de amarillo. Sin embargo, la muestra 3 es fría o neutra porque aproximadamente un 50% de su saturación es amarilla (International Organization for Standardization, 2019).

En el análisis del parámetro de colorimetría FB, todos los valores de L^* (luminosidad) están en un rango de 80, lo que indica que son tonos pastel o colores claros. Además, la muestra 2 es más clara, mientras que la muestra 3 es la más oscura de las tres. En la coordenada a^* (rojo y verde), todos los valores son positivos por lo que tienden al color rojo. En la coordenada b^* (amarillo y azul), todos los valores son positivos; por lo tanto, tienden al amarillo.

En el análisis del parámetro de colorimetría FC, todos los valores de L^* (luminosidad) están en un rango de 80, lo que indica que son tonos pastel o colores claros. Además, la muestra 1 es más clara, mientras que la muestra 3 es la más oscura de las tres. En la coordenada a^* (rojo y verde), todos los valores son positivos por lo que tienden al color rojo. En la coordenada b^* (amarillo y azul), todos los valores son positivos; por lo tanto, tienden al amarillo.

Los resultados anteriores para la colorimetría son congruentes con la Figura 6, ya que se observa que cada muestra presenta un color o transparencia diferente, lo cual se podría esperar al aplicar las pruebas de colorimetría a los materiales allí fotografiados. Se evidencia que el biomaterial FA posee un mayor brillo, alrededor de 80.33 en promedio, frente a FB y FC. Esto indica que el biomaterial FA es significativamente más blanco y brillante. Además, FC presenta el mayor valor en A, lo que señala un tono rojizo más pronunciado debido a una inferior pureza en el color causada por la presencia de la cáscara de huevo en la formulación. Similar comportamiento arroja la medición de B, donde nuevamente FC presenta los valores amarillentos más altos (International Organization for Standardization, 2019).

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede afirmar que cada una de las formulaciones cumple con unas propiedades mecánicas diferentes que serían útiles con base en los requerimientos del producto a empacar; particularmente, la formulación FB está conformada por la proporción ideal de cáscara de huevo para productos ligeros que necesiten protección lumínica, siendo la alternativa más óptima para ecoempaques de productos de aseo como esponjas, cepillos,

paños o incluso para reemplazar las envolturas utilizadas en el empaque de productos enviados por mensajería.

8. Conclusiones

La incorporación de partículas de cáscara de huevo genera un efecto positivo sobre las propiedades mecánicas del biomaterial, al aumentar significativamente la rigidez y aportar una dureza similar a la de productos cerámicos. Sin embargo, este aumento viene acompañado de una disminución de la tensión y la elasticidad del biomaterial, evidenciado en las pruebas realizadas.

Los análisis de las propiedades mecánicas del biomaterial revelaron que las muestras sin cáscara de huevo (formulación FA) presentan mayor elasticidad, en contraste con muestras que incorporan partículas derivadas de la cáscara de huevo (formulaciones FB y FC), cuya menor tensión requiere una menor fuerza para generar la rotura de las muestras.

La incorporación de cáscara de huevo actúa como un agente determinante en las propiedades estéticas y mecánicas del biomaterial. Su uso está justificado por la dureza que aporta, aunque conlleva a una disminución en la elasticidad, aumentando la fragilidad y la susceptibilidad del bioplástico a la fragmentación ante esfuerzos de flexión.

A partir del análisis mecánico, se determinó el efecto dual de la carga orgánica: mientras que concentraciones de partículas de menor tamaño de cáscara de huevo actúan como agente de refuerzo al incrementar la rigidez, un tamaño mayor de estas genera porosidad y puntos de concentración de esfuerzos que fragilizan la estructura.

Con la formulación sin la adición de partículas de cáscara de huevo (FA), se obtiene un material flexible y que, de acuerdo con sus propiedades colorimétricas, permitiría observar el contenido almacenado; mientras que con las formulaciones donde se adiciona cáscara de huevo

con diferente tamaño de partícula (FB y FC), se obtiene un biomaterial con mayor rigidez y que bloquea la luz, siendo útil para almacenar otro tipo de productos.

El uso de residuos orgánicos locales, como la cáscara de huevo, emerge como una alternativa tecnológica viable para empaques de objetos principalmente livianos o productos de aseo y ambientalmente sostenible para reducir la dependencia de plásticos de un solo uso, articulando el crecimiento industrial con los objetivos de desarrollo sostenible en el contexto regional y nacional.

9. Recomendaciones

Profundizar en el desarrollo experimental para determinar las aplicaciones específicas de estos materiales en la industria del embalaje. Es imperativo identificar qué categorías de productos requieren las propiedades fisicoquímicas obtenidas, permitiendo así una transición efectiva de las pruebas de laboratorio a un entorno de uso funcional.

El balance en la cantidad y tamaño de las partículas de cáscara de huevo sugiere considerar optimizar la formulación del biomaterial, ajustando con precisión las necesidades mecánicas requeridas para el producto de interés.

Referencias

- Acosta Medina, J. K., Contreras Pacheco, O. E., & Pedraza Avella, A. C. (2023). Empaques vs Bioempaques para alimentos: Una comparación a nivel técnica, comercial y normativa. *Ingeniería y Competitividad*, 25(3). <https://doi.org/10.25100/iyc.v25i3.13066>
- Alcaide, M., Collado, C., & Sancho, J. (2020). *Bioplástico degradable*.
- Álvarez, D. O. (2024, March 8). *Enciclopedia de Humanidades*. Materiales.
- Bedoya-Salazar, A., & Valencia-González, M. P. (2020). Usos potenciales de la cáscara de huevo de gallina (*Gallus gallus domesticus*): una revisión sistemática. *Revista Colombiana de Ciencia Animal - RECIA*, 12(2). <https://doi.org/10.24188/recia.v12.n2.2020.776>
- Cabrejos Castillo, K. G., Maluquis Sánchez, J. E., Díaz Ruiz, A., & Minchán Velayarce, H. H. (2024). Caracterización de las propiedades mecánicas del bioplástico de almidón de plátano (*Musa paradisiaca* L.) y compuestos celulósicos de café (*Coffea arabica* L.). *Revista Científica Pakamuros*, 12(2), 88–101. <https://doi.org/10.37787/rft0ar53>
- Callister, W. D. ., Rethwisch, D. G. ., Molera, P. ., & Salán Ballesteros, M. N. (2018). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. Editorial Reverté.
- Caraig, R., Carido, I., & Nathan, M. (2023). The Usage of Hen Eggshell and Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*) as Biodegradable Plastic. *BOHR International Journal of Civil Engineering and Environmental Science*, 1, 1–7.
- Doordan, D. (2021). Neri oxman: Material ecology. In *Design Issues* (Vol. 37, Number 1). https://doi.org/10.1162/desi_r_00626
- Duffó, G. S. (2011). *Biomateriales* [Book]. Instituto Nacional de Educación Tecnológica.
- Felipe, J., & Cadavid, M. (n.d.). *EMPLANTAR DESARROLLO DE MATERIAL COMESTIBLE A BASE DE PLÁTANO Y EMPAQUES COMESTIBLES Y BIODEGRADABLES*.
- FENAVI. (2025, September 3). *CONSUMO PER CÁPITA MUNDIAL DE HUEVO*. <https://fenavi.org/>
- Future Materials Bank. (2024). *Materials that support the transition towards a more sustainable artistic practice*.
- González, R. (2025). Improving bioplastics for packaging applications. *Bioplásticos*, 1.
- Macharia, A., & Ori, K. '. (2017). *A Review of the uses of poultry eggshells and shell membranes*. <https://www.researchgate.net/publication/279557572>

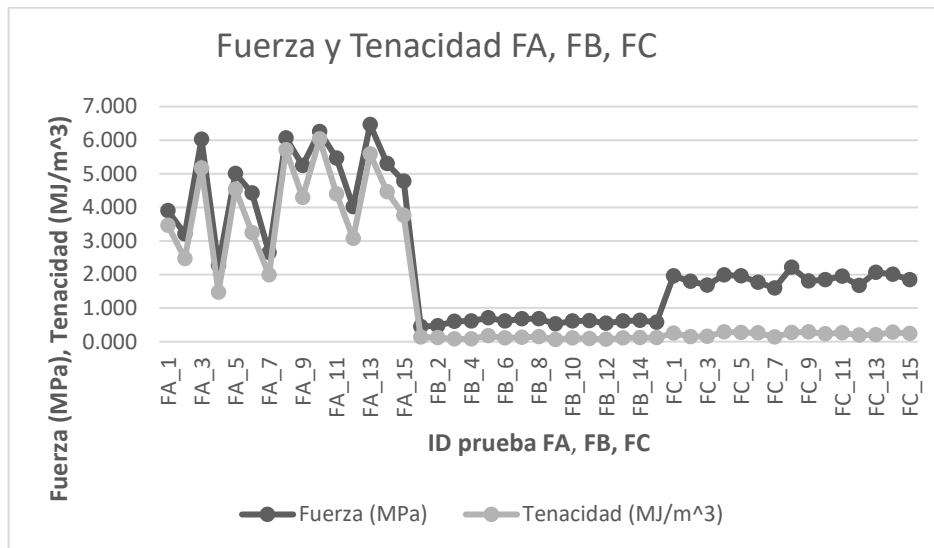
- Messing, L. (2023). *Biografía*. Formación En Biomateriales. *mp_115_noviembre_diciembre_2022-14-17* (1). (n.d.).
- OMS. (2024, October 24). *Contaminación del aire ambiente (exterior) y salud*. [https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-\(outdoor\)-air-quality-and-health](https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health)
- ONU. (2015, September 25). *Naciones Unidas*. Objetivos de Desarrollo Sostenible.
- Otero, A. (2022). Cocinas, residuos e impresión 3D. Biomateriales basados en cáscaras de huevo y conchas de mejillón. *Inmaterial*, 7(13). <https://doi.org/10.46516/inmaterial.v7.145>
- Paola Navia-Porras, D., & Bejarano-Arana, N. (n.d.). EVALUACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS DE BIOPLÁSTICOS TERMO-COMPRIMIDOS ELABORADOS CON HARINA DE YUCA EVALUATION OF PHYSICAL PROPERTIES OF THERMOPRESSING BIOPLASTICS MADE FROM CASSAVA FLOUR AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DE TERMO-COMPRIMIDOS BIOPLÁSTICOS FEITOS A PARTIR DE FARINHA DE MANDIOCA. In *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial* (Vol. 12, Number 2).
- Plastics - Methods for Determining the Density of Non-Cellular Plastics — Part 1: Immersion Method, Liquid Pycnometer Method and Titration Method (2019).
- Rangari, V. (2016). *Bioplastic enhanced with eggshell nanoparticles could make better packaging materials*. 1–1.
- Repsol. (2023, September 11). *Repsol Compañia Energetica Global*. Cómo Gestionar de Manera Eficiente Los Desechos. <https://www.repsol.com/es/index.cshtml>
- Serway, R. A., Jewett, J. W., & Víctor Campos Olguín Traductor profesional Revisión Técnica Misael Flores Rosas, T. (2018). *Séptima edición*.
- Smith, W. (2014). *Fundamentos de la Ciencia e Ingeniería de Materiales* (5th ed.).
- Specification for Polyethylene Plastics Extrusion Materials for Wire and Cable*. (2016). ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D1248-16>
- Thompson, A., & Taylor, B. N. (2008). *NIST Special Publication 811 2008 Edition Guide for the Use of the International System of Units (SI)* SI m A K cd mol kg s.
- U.S. Department of Health & Human. (2024). *National Institute of biomedical imaging and bioengineering*. Biomateriales.

-
- Vroman, I., & Tighzert, L. (2009). Biodegradable polymers. In *Materials* (Vol. 2, Number 2, pp. 307–344). <https://doi.org/10.3390/ma2020307>
- Weiss Münchmeyer, A. J., & Besoain Narvaez, M. J. (2022). Biomateriales basados en el territorio. *Base Diseño e Innovación*, 7(7). <https://doi.org/10.52611/bdi.num7.2022.797>
- Zhang, J., & Sun, X. (2007). Biodegradable foams of poly(lactic acid)/starch. I. Extrusion condition and cellular size distribution. *Journal of Applied Polymer Science*, 106(2), 857–862. <https://doi.org/10.1002/app.26715>

Anexos

Anexo 1

Figura 8. Comparativa Fuerza y Tenacidad muestras FA, FB, FC.



Nota. Grafica diseñada por la autora para observar y comparar los porcentajes de rotura de las muestras FA, FB y FC.

Anexo 2

Tabla 14. Test de colorimetría FA, FB y FC.

Colorimetría FA					
	FA_1		FA_2		FA_3
L	82,33	L	78,27	L	80,40
A	-0,25	A	-0,13	A	-0,3
B	4,35	B	4,73	B	2,48
Colorimetría FB					
	FB_1		FB_2		FB_3
L	73,57	L	73,83	L	72,06
A	5,98	A	5,99	A	6,32

B	12,11	B	12,38	B	12,83
Colorimetría FC					
FC_1		FC_2		FC_3	
L	67,52	L	67,88	L	67,76
A	6,67	A	6,48	A	6,71
B	13,55	B	13,46	B	13,30

Nota. Resultados de la prueba de colorimetría formulación FA, FB y FC. Elaboración propia.

Anexo 3

Evidencia de la divulgación científica

El 27 de noviembre de 2025 en el Parque Explora de Medellín se realizó una ponencia, en el evento llamado FESTIMAE (festival de maestros amigos del parque explora), donde participaron 15 maestros de diferentes zonas de la ciudad, llamada “Biomateriales para entender el universo”. En el encuentro se compartieron los biomateriales desarrollados en la investigación, lo cual permitió escuchar apreciaciones de los asistentes y preguntas que ayudaron a fortalecer la investigación.





Nota. Fotografías tomadas por coordinadores del parque explora.

Anexo 4

Programa de apropiación social del conocimiento.

Taller de biomateriales

Como parte de la importancia de transferir conocimiento se diseñó e implementó un taller piloto de intervención educativa, llamado Taller de biomateriales. La muestra fue conformada por 10 estudiantes de básica primaria de grado 4° con edades que oscilan entre los 9 y 10 años, seleccionados bajo criterio de desempeño destacado en el área de Ciencias Naturales del Colegio de la UPB.

Cronograma y estructura del taller

Sesión	Actividad	Objetivos	Descripción
1	Fundamentación	Identificar el concepto de biomaterial y la economía circular.	Contextualización a los estudiantes sobre la contaminación, los biomateriales y sus posibilidades.
2	Moldes con creatividad	Diseñar pequeños moldes funcionales con materiales cotidianos para depositar el biomaterial.	Elaboración de moldes utilizando acetatos, radiografías recicladas y plastilina.
3	Mezcla y formulación	Practicar el proceso de mezcla y vertido del material.	Preparación de formulaciones basadas en residuos orgánicos como las cáscaras de huevo.
4	Caracterización Sensorial	Identificar propiedades físicas (textura, elasticidad, olor).	Desmolde de piezas y registro de observaciones sobre la morfología final del material.
5	Evaluación	Evaluar la apropiación del conocimiento.	Socialización de resultados y evaluación del impacto ambiental percibido por los estudiantes.

Nota. Tabla diseñada por la autora para describir las sesiones y las actividades desarrolladas.

El taller sirvió para demostrar que el biomaterial es seguro y no es tóxico.



