



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE CIENCIA E INGENIERÍA EN
ALIMENTOS Y BIOTECNOLOGÍA



CARRERA DE BIOTECNOLOGÍA

Elaboración de un bioplástico a partir de colágeno obtenido de residuos de wet blue
proveniente de una curtiembre de la ciudad de Ambato

Trabajo de Titulación, Modalidad Proyecto de Investigación, previo a la obtención de título de Ingeniera Biotecnóloga, otorgado por la Universidad Técnica de Ambato, a través de la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

AUTOR: Sara Noemi Naranjo Moreno

TUTOR: Nelly Esther Flores Tapia, PhD.

Ambato - Ecuador

Septiembre - 2023

APROBACIÓN DEL TUTOR

Ing. Nelly Esther Flores Tapia, PhD.

CERTIFICA:

Que el presente Trabajo de Titulación ha sido prolijamente revisado. Por lo tanto, autorizo la presentación de este Trabajo de Titulación, modalidad Proyecto de Investigación, el mismo que responde a las normas establecidas en el Reglamento de Títulos y Grados de la Facultad de Ciencias e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología.

Ambato, 25 de julio de 2023.

Ing. Nelly Esther Flores Tapia, PhD.

C.I. 1716253305

TUTOR

AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Sara Noemi Naranjo Moreno, manifiesto que los resultados obtenidos en el presente Trabajo de Titulación, modalidad proyecto de investigación, previo a la obtención del título de Ingeniera Biotecnóloga son absolutamente auténticos y personales a excepción de las citas bibliográficas.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sara Noemi Naranjo Moreno', with a long horizontal flourish extending to the right.

Sara Noemi Naranjo Moreno

C.I. 1805453287

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato para que haga uso de este Trabajo de Titulación o parte de él un documento disponible para su lectura, consulta y proceso de investigación, según las normas de la institución.

Cedo los derechos en línea patrimoniales de mi Trabajo de Titulación con los fines de difusión pública, apruebo la reproducción de este, dentro de la Universidad, siempre y cuando no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos como autor.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Sara Noemi Naranjo Moreno', with a long horizontal flourish extending to the right.

Sara Noemi Naranjo Moreno

C.I. 1805453287

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos profesores calificadores, aprueban el presente Trabajo de Titulación, modalidad de Proyecto de Investigación, el mismo que ha sido elaborado de conformidad con las disposiciones emitidas por la Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Ambato.

Para constancia firman:

.....

Presidente del tribunal

.....

Dr. Orestes Darío López Hernández

C.I. 1754784864

.....

Dra. Helena Maritza de la Torre Olvera

C.I. 1309651998

Ambato, 25 de agosto 2023

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado salud, vida y fortaleza, para culminar una gran meta en mi vida.

A mi madre por haberme dado los mejores consejos de vida, el cariño y generarme la valentía necesaria para poder lograr todos mis propósitos.

A mí, quien ha superado obstáculos y abrazado el crecimiento personal con valentía y determinación. Con cariño, para seguir adelante y nunca dejar de creer en mi potencial.

AGRADECIMIENTO

A mi familia, gracias por estar siempre ahí, por escuchar mis alegrías y mis preocupaciones, por comprenderme incluso cuando las palabras no eran suficientes. Su cariño incondicional me ha dado fuerzas para enfrentar los retos y seguir adelante, sabiendo que nunca estoy sola en este camino.

A mi tutora de tesis, Dra. Nelly Flores y al Ing. Giovanni Freire por su paciencia y ayuda brindada para el desarrollo de esta tesis

Al Ing. Andrés Sánchez, quien ha sido un pilar fundamental de mi vida universitaria, iluminando mi camino con sabiduría, paciencia y un corazón bondadoso. Gracias a su inestimable apoyo, he crecido y aprendido de manera valiosa sus enseñanzas y consejos. Con profundo cariño, le dedico mis logros presentes, sabiendo que su influencia perdurará en mi camino hacia el éxito.

A todos mis amigos, en especial a Micaela, Pablo y Daniel por haber compartido tantos momentos de tristeza y alegría, su presencia han sido un consuelo en los días difíciles. En cada risa compartida, en cada abrazo reconfortante y en cada gesto de cariño, se ha tejido una historia única que atesoro con el corazón. Agradezco a la vida el haber cruzado nuestros caminos, porque en ustedes he encontrado un tesoro invaluable.

ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL TUTOR.....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iii
DERECHOS DE AUTOR	iv
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
ÍNDICE GENERAL DE CONTENIDOS.....	viii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN EJECUTIVO	xii
ABSTRACT.....	xiii
CAPÍTULO 1.- MARCO TEÓRICO.....	1
1.1 Antecedentes investigativos	1
1.1.1 Industria de la curtiduría	2
1.1.1.1 Proceso de Curtido	2
1.1.1.2 Tipos de curtido.....	4
1.1.1.3 Impactos Ambientales.....	4
1.1.2 Wet blue	5
1.1.2.1 Producción de las virutas de cuero.....	6
1.1.3 Colágeno	7
1.1.3.1 Fuentes de Colágeno	7
1.1.3.2 Obtención de hidrolizado de colágeno a partir de wet blue.....	8
1.1.4 Almidón	9
1.1.4.1 Almidón de zanahoria blanca (<i>Arracacia xanthorrhiza</i>).....	10
1.1.5 Plastificantes	10
1.1.5.1 Alcohol polivinílico (PVA).....	11
1.1.5.2 Glicerina.....	12
1.1.6 Biopolímeros	13
1.1.6.1 Bioplásticos.....	13
1.1.6.2 Ensayos de caracterización del bioplástico	14
1.2 Objetivos	17
1.2.1 Objetivo General	17
1.2.2 Objetivos específicos	17

1.3 Hipótesis.....	17
CAPÍTULO 2.- METODOLOGÍA	18
2.1 Materiales	18
2.2 Métodos.....	21
2.2.1 Recepción y procesamiento de la materia prima.....	21
2.2.2 Extracción de Hidrolizado de colágeno a partir de wet blue	22
2.2.3 Cálculo del rendimiento del hidrolizado de colágeno.....	22
2.2.4 Análisis de cromo en el Hidrolizado de colágeno.....	22
2.2.5 Formulación bioplástico.....	23
2.2.5.1 Obtención de almidón a partir de zanahoria blanca (<i>Arracacia xanthorrhiza</i>).....	23
2.2.5.2 Formulación de mezclas para obtener bioplásticos.....	24
2.2.6 Ensayos mecánicos para determinar la calidad del bioplástico formado.....	25
2.2.6.1 Ensayo de tracción	25
2.2.6.1.1 Análisis estadístico	25
2.2.6.2 Permeabilidad al vapor.....	26
2.2.6.3 Solubilidad en agua	27
2.2.6.4 Recuperación elástica.....	27
2.2.6.5 Ensayo de biodegradabilidad	28
CAPÍTULO 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN	29
3.1 Análisis y discusión de los resultados.....	29
3.1.1 Extracción de colágeno a partir de wet blue	29
3.1.2 Análisis de cromo en el Hidrolizado de colágeno.....	30
3.1.4 Formulación del bioplástico.....	31
3.1.5 Diseño experimental para la elaboración de los bioplásticos.....	32
3.1.6 Análisis estadístico.....	32
3.1.7 Resistencia a la tracción	38
3.1.8 Permeabilidad al vapor de agua	40
3.1.9 Solubilidad en agua	41
3.1.10 Recuperación elástica.....	42
3.1.11 Módulo de Young	43
3.1.12 Ensayo de biodegradabilidad	45
3.2 Verificación de hipótesis.....	47
CAPÍTULO 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
4.1 Conclusiones	48

4.2 Recomendaciones.....	50
MATERIALES DE REFERENCIA	51
Referencias Bibliográficas	51
Anexos	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Proceso de curtido	2
Tabla 2 Tipos de hidrólisis para la obtención de hidrolizado de colágeno.....	8
Tabla 3 Reactivos de laboratorio.....	18
Tabla 4 Equipos de laboratorio	19
Tabla 5 Insumos de laboratorio.....	19
Tabla 6 Formulaciones del polímero utilizando alcohol polivinílico en partes por peso (PVW)	20
Tabla 7 Formulaciones del polímero utilizando glicerina.....	21
Tabla 8 Determinación de cromo presente en el hidrolizado de wet blue	30
Tabla 9 Datos de resistencia para cada formulación con PVA	32
Tabla 10 Análisis de varianza para la resistencia con PVA.....	33
Tabla 11 Datos de resistencia para cada formulación con glicerina	35
Tabla 12 Análisis de varianza para la resistencia con glicerina.....	35
Tabla 13 Formulaciones con valores significativos	38
Tabla 14 Datos de permeabilidad al vapor de agua	40
Tabla 15 Datos de solubilidad en agua.....	41
Tabla 16 Datos obtenidos de recuperación elástica	42
Tabla 17 Datos obtenidos del Módulo de Young.....	43
Tabla 18 Resultados obtenidos de la degradación en el suelo	45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Virutas de wet blue	6
Figura 2 Hidrolizado de colágeno	9
Figura 3 Estructura del PVA	12
Figura 4 Estructura de la glicerina.....	13
Figura 5 Hidrolizado de colágeno obtenido durante el proceso	30
Figura 6 Interacción de los factores para resistencia.....	34
Figura 7 Diagrama de Pareto de los efectos analizados	36
Figura 8 Interacción de los factores para resistencia con glicerina	37

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio y la elaboración de bioplásticos es un tema importante en el mundo actual, debido a la gran incidencia de los plásticos convencionales en la contaminación ambiental por su acumulación, dado su bajo nivel de degradación y su uso cotidiano tan extendido. Esto causa que millones de toneladas sean producidas al año y otros millones más terminen como desechos en los suelos y océanos. La propuesta de un bioplástico como sustituto de materiales convencionales permitiría una innovación significativa.

La investigación se centra en la línea de investigación biotecnológica con enfoque en medio ambiente y para la elaboración del bioplástico propuesto, se utilizó una formulación basada en colágeno hidrolizado obtenido a partir de virutas de wet blue mediante una hidrólisis con MgO, almidón de zanahoria blanca y plastificantes como alcohol polivinílico y glicerina, el objetivo fue la elaboración de un material con características óptimas de resistencia a la tracción, recuperación elástica, permeabilidad en agua, solubilidad en agua y biodegradabilidad.

El producto fue elaborado con la intención de proponerlo como un reemplazo de las fundas plásticas o el polietileno de baja densidad. Una de sus ventajas agregadas es que contiene en su formulación un desecho que normalmente se descartaría. Además, posee características similares a las del plástico convencional, pero se obtiene a un menor costo y tiene la capacidad de degradarse naturalmente en un periodo de tiempo corto. Esto permitiría una mayor sostenibilidad ambiental y, al mismo tiempo, satisfaría las necesidades de confort humano, mejorando el impacto en el ecosistema.

Palabras clave: wet blue, hidrolizado de colágeno, bioplástico, biodegradabilidad, resistencia mecánica, gestión ambiental.

ABSTRACT

The study and development of bioplastics is an important topic in the current world due to the significant impact of conventional plastics on environmental pollution, caused by their accumulation, low degradation rate, and widespread everyday use. This results in millions of tons being produced annually, with millions more ending up as waste in soils and oceans. The proposal of a bioplastic as a substitute for conventional materials would allow for significant innovation.

The research focuses on the biotechnological research line with an environmental approach, and for the production of the proposed bioplastic, a formulation based on hydrolyzed collagen obtained from wet blue shavings through hydrolysis with MgO, white carrot starch, and plasticizers such as polyvinyl alcohol and glycerin was used. The objective was to create a material with optimal characteristics of tensile strength, elastic recovery, water permeability, water solubility, and biodegradability.

The product was developed with the intention of proposing it as a replacement for plastic bags or low-density polyethylene. One of its added advantages is that it incorporates a waste material that would normally be discarded. Furthermore, it possesses similar characteristics to conventional plastic but is obtained at a lower cost and has the ability to naturally degrade in a short period of time. This would allow for greater environmental sustainability while simultaneously meeting human comfort needs and improving the impact on the ecosystem.

Key words: wet blue, collagen hydrolyzate, bioplastic, biodegradability, mechanical resistance, environmental management.

CAPÍTULO 1.- MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes investigativos

Los plásticos son materiales sintéticos elaborados a partir de derivados de petróleo los cuales se han convertido en una gran opción de uso debido a su durabilidad y bajo costo, este material se ha utilizado en varias aplicaciones como envases, embalajes, cubierta de dispositivos electrónicos y materiales de construcción entre otros (**Benson et al., 2021**). Sin embargo, a pesar de su gran utilidad, los plásticos también han demostrado ser perjudiciales para el medio ambiente y la salud humana (**Tiseo, 2022**).

La mayoría de los plásticos tardan cientos de años en descomponerse lo que causa problemas en océanos, ríos y ecosistemas terrestres. Además, muchos plásticos poseen en su composición químicos como el bisfenol A (BPA) y los ftalatos, que se utilizan para mejorar sus propiedades mecánicas (**Silva et al., 2006**). Sin embargo, estas sustancias pueden filtrarse en los alimentos y bebidas de consumo, lo que representa un riesgo para la salud humana.

La necesidad de materia prima para la producción de plástico es extraordinaria, con un aumento significativo en la producción global desde alrededor de 2 millones de toneladas en 1950 hasta aproximadamente 400 millones de toneladas en 2018 (**Sabbah & Porta, 2017**). Se espera que esta demanda continúe en constante aumento, llegando a superar los 1.000 millones de toneladas para el año 2050.

La generación de residuos provenientes de plástico puede afectar indirectamente a otras localidades. Según lo expuesto, se ha determinado que en el periodo de 2020 a 2021 llegó a las costas ecuatorianas 12,791 toneladas de residuos plásticos traídos por la corriente oceánica. A esto se suman las 531,461 toneladas de plástico generadas localmente (**Jiménez, 2022**). Esto se traduce en una cantidad de desecho exorbitante que no puede contenerse en los rellenos sanitarios dispuestos, debido a que la

generación de basura supera con creces la capacidad gubernamental de disposición final. En parte también, esto se debe a la poca cultura de reciclaje existente en el país y la tecnología obsoleta que hace poco aprovechable a la gran mayoría de desechos derivados del plástico (Vargas et al., 2011).

1.1.1 Industria de la curtiduría

La industria del cuero juega un papel crucial en muchos países, ya que constituye un sector económico de gran relevancia que genera empleo significativo y contribuye al desarrollo económico de las comunidades (Martínez & Romero, 2017). Esta industria abarca la fabricación, procesamiento y venta de productos derivados del cuero, comenzando con la obtención de pieles animales, especialmente de ganado bovino las cuales son tratadas mediante un proceso de curtido para que posean mayor resistencia (Sathish et al., 2016).

Esta industria produce una variedad de productos, como calzado, accesorios, prendas de vestir, artículos de marroquinería y muebles. Moktadir et al., (2020) menciona que estos productos derivados del cuero son altamente demandados y gozan de una fuerte presencia en el comercio global, lo que contribuye significativamente a las transacciones internacionales.

1.1.1.1 Proceso de Curtido

Tabla 1

Proceso de curtido

Proceso	Descripción
1. Preparación de la piel	Se adquieren pieles de animales, usualmente provenientes de ganado bovino las cuales son extraídas durante el sacrificio del animal y luego se someten a una serie de etapas iniciales, como el

	proceso de desollado y la eliminación de la grasa y carne adherida.
2. Remojo	Las pieles son sumergidas en agua con el propósito de eliminar las impurezas y cualquier rastro de sangre. Este procedimiento también contribuye a ablandar las pieles y prepararlas para el siguiente paso del curtido.
3. Curtido primario	El curtido al cromo es el método más rápido y común en el cual se utilizan sales de cromo para estabilizar y endurecer las proteínas del cuero. El curtido vegetal es más respetuoso con el medio ambiente pero más lento y costoso.
4. Eliminación de pelaje	Se realiza un proceso llamado descerado, en este paso se utilizan productos químicos o enzimas que tienen la capacidad de disolver el pelaje.
5. División	Se procede a dividir la piel en capas más delgadas, según el grosor y el tipo específico de cuero que se quiera obtener.
6. Curtido secundario	El cuero es sometido a una segunda etapa de curtido con el propósito de mejorar su calidad y características particulares, como su flexibilidad y textura.
7. Lavado y limpieza	Se procede al lavado y limpieza del cuero para eliminar cualquier residuo químico o impureza que pueda quedar después del curtido.
8. Secado y estirado	El cuero se seca cuidadosamente y se estira para evitar deformaciones.
9. Acondicionamiento y acabado	Se utilizan productos con el propósito de acondicionar el cuero, proporcionándole suavidad y el acabado final deseado, como teñirlo, pulirlo o aplicarle una capa protectora.

Nota. Las virutas de wet blue se forman durante el proceso de división fuente: (**Ministerio del Ambiente, 2013**).

1.1.1.2 Tipos de curtido

El curtido al cromo: es el procedimiento más prevalente en la industria del cuero. Este método emplea sales de cromo trivalente (CrIII), que logran estabilizar y hacer impermeable el cuero de manera muy efectiva. No obstante, el cromo III es considerado tóxico y puede tener efectos perjudiciales para la salud humana y el medio ambiente (**Ministerio del Ambiente, 2013**).

Curtido vegetal: este proceso utiliza extractos de plantas como la corteza de los árboles para curtir el cuero. **Font, (2006)** expone que esta es una opción más respetuosa con el medio ambiente ya que los productos utilizados son de origen natural y no contienen productos químicos nocivos. No obstante, el proceso de curtido vegetal puede ser más lento y menos eficiente en comparación con otros métodos.

El curtido de aluminio: es un procedimiento que emplea sales de aluminio para el curtido del cuero. Aunque es menos común que el curtido con cromo, se considera una alternativa más segura, ya que el aluminio es menos tóxico que el cromo hexavalente (**Gao et al., 2020**).

El curtido con aceite es un procedimiento que emplea aceites vegetales para curtir el cuero (**Sahu, Jayakumar & Alla, 2022**). Esta técnica es más delicada y realza la belleza natural del cuero, aunque puede ser más costosa y requiere más tiempo para completarse.

1.1.1.3 Impactos Ambientales

La industria de la curtiduría también enfrenta desafíos ambientales, especialmente en relación con la gestión adecuada de los residuos generados durante el proceso de curtido a (**ONU, 2020**). Algunos de estos problemas se muestran a continuación;

El proceso de curtido de pieles consume una cantidad significativa de agua, que se utiliza en el remojo, lavado y enjuague de las pieles. Esta demanda hídrica puede agotar los recursos locales de agua y generar escasez en las regiones donde se lleva a cabo la producción de cuero. Los productos químicos empleados en el proceso de curtido, como las sales de cromo trivalentes, tintes y productos químicos de acabado pueden ingresar a las aguas residuales generadas por el curtido (**Chojnacka et al., 2021**). Si no se manejan adecuadamente, pueden afectar negativamente fuentes de agua cercanas, como ríos, arroyos y acuíferos, perjudicando la calidad del agua y los ecosistemas acuáticos.

Durante el proceso de curtido del cuero, se generan grandes cantidades de residuos sólidos, como recortes de cuero, pelo y lodos de depuradora, los cuales deben ser tratados y eliminados adecuadamente para evitar su impacto en el medio ambiente (**Piccin et al., 2016**). Además, la producción de cuero requiere un considerable consumo de energía, especialmente para calentar el agua y secar las pieles, lo que puede generar emisiones de gases de efecto invernadero y contribuir al calentamiento global (**Ministerio del Ambiente, 2013**).

Es esencial abordar estos desafíos ambientales para promover prácticas más sostenibles en la industria del cuero la cual hace esfuerzos significativos para avanzar hacia métodos de curtido más ecológicos y sostenibles. Por ejemplo, se está reduciendo el empleo de productos químicos tóxicos y se está trabajando en el reciclaje del agua utilizada en el proceso de producción. Estos avances reflejan un compromiso por parte del sector cuero para proteger nuestro entorno y preservar los recursos naturales para las generaciones futuras (**Moktadir et al., 2020**).

1.1.2 Wet blue

El wet blue es un término utilizado para nombrar al cuero que ha pasado por una curtición con cromo las cuales formar enlaces cruzados entre las proteínas del colágeno, esto se logra debido a la capacidad del cromo trivalente (Cr III) (Figura

1), el cual también proporciona características de resistencia, maleabilidad y le genera una tonalidad azul (**Pistori, 2018**).

Figura 1

Virutas de wet blue



Nota. Virutas de wet blue secadas a 70 °C durante 24 horas

1.1.2.1 Producción de las virutas de cuero

En la etapa de división (Tabla 1), que sigue al proceso de curtición del cuero, se generan las virutas de cromo. Durante este procedimiento, las pieles curtidas son mecánicamente divididas en capas más delgadas y flexibles. Estas virutas de cuero varían en tamaño y grosor y suelen ser empleadas en la fabricación de artículos que requieren cuero más delgado y flexible (**Osinsky, 2006**). De esta manera, se optimiza la utilización de recursos en la industria del cuero y se reduce el desperdicio. Sin embargo, el manejo de las virutas de cromo es uno de los mayores desafíos en la gestión de residuos, ya que el cromo presente en ellas puede oxidarse por diferentes factores y convertirse en cromo hexavalente (Cr VI) el cual puede causar dermatitis, irritación en la piel y daño pulmonar, según la Agencia Internacional del Cáncer es clasificado como cancerígeno (**Kim et al., 2018**).

1.1.3 Colágeno

El colágeno es una proteína fibrosa que se halla en diversos tejidos del cuerpo humano y otros animales, como la piel, el cartílago, los huesos, los tendones y los vasos sanguíneos. Es la proteína más prevalente en los mamíferos y desempeña un papel esencial en la fortaleza y configuración estructural de los tejidos.

Shoulders & Raines, (2009) mencionan que el colágeno se compone de extensas cadenas de aminoácidos, principalmente glicina, prolina, hidroxiprolina y lisina. Estas cadenas se unen para formar una estructura tridimensional resistente y flexible. Este proporciona un soporte estructural esencial a los tejidos y órganos, mejorando su estabilidad, elasticidad y fortaleza. Asimismo, juega un papel crucial en la regeneración y reparación de tejidos dañados, contribuyendo a la salud de la piel, las articulaciones, los huesos y los vasos sanguíneos (**Kisling & Katwa, 2019**).

1.1.3.1 Fuentes de Colágeno

Las fuentes más comunes para extraer colágeno son de origen animal, estas pueden ser:

La piel de animales como vacas, cerdos, pollos y peces es una de las principales fuentes de colágeno. Se emplea principalmente la piel de estos animales, que es un subproducto de la industria cárnica. Los huesos y cartílagos de animales, como los de carne de res y pollo, así como las escamas y cartílagos de ciertos tipos de pescado como el bacalao, el salmón y la tilapia, son fuentes valiosas de colágeno (**de Melo, 2021**).

1.1.3.2 Obtención de hidrolizado de colágeno a partir de wet blue

Para obtener hidrolizado de colágeno (HC) se pueden utilizar diferentes métodos de hidrólisis, los cuales involucran la ruptura de las moléculas en fragmentos más pequeños.

Tabla 2

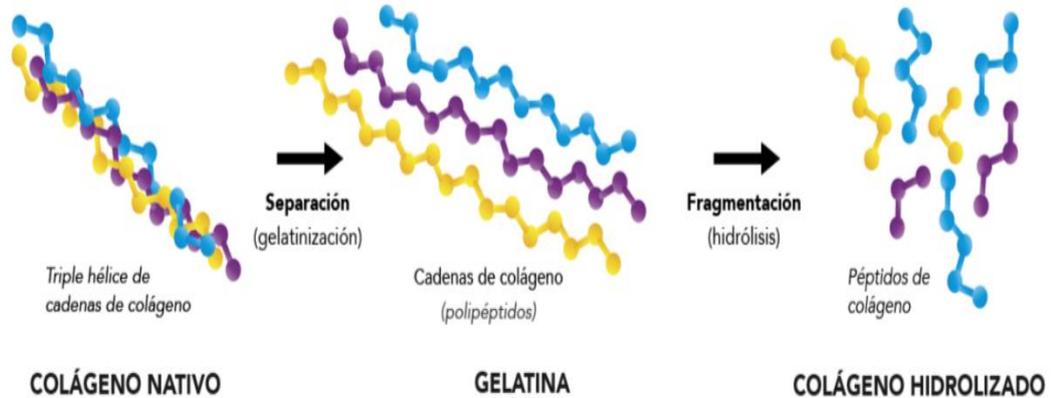
Tipos de hidrólisis para la obtención de hidrolizado de colágeno

Hidrólisis	Descripción	Compuestos	Referencia
Alcalina	Se utiliza una solución básica para descomponer el colágeno en fragmentos más pequeños. Es menos agresivo para las proteínas del colágeno, se produce de mejor calidad y menos desnaturalizado.	Óxido de magnesio Óxido de calcio Hidróxido de sodio Hidróxido de calcio	(Vallejo et al., 2019; Jordán, 2011).
Ácida	El ácido descompone las uniones químicas en el colágeno, lo que da como resultado la liberación de péptidos de colágeno más pequeños.	Ácido clorhídrico Ácido acético Ácido sulfúrico Ácido cítrico	(Quintero & Zapata, 2017).
Enzimática	Se añaden enzimas al colágeno, que catalizan las reacciones químicas necesarias para la hidrólisis.	Enzimas proteolíticas Hykol-E®	(Jordán, 2011).

Nota. El Hykol-E® es un producto químico comercial, el cual está compuesto de una línea de éteres de celulosa modificada.

Figura 2

Hidrolizado de colágeno



Nota: Proceso de generación de colágeno hidrolizado. Basado en: (Neorg, & Sa, 2023)

1.1.4 Almidón

El almidón es un tipo de polisacárido que se encuentra en diversas plantas y es una de las principales formas de almacenar energía en forma de carbohidratos para el desarrollo y crecimiento de las plantas. Está compuesto por cadenas largas de glucosa unidas mediante enlaces glucosídicos (Yu et al., 2019). El almidón se puede encontrar en órganos de almacenamiento de las plantas, como tubérculos, raíces y granos.

El almidón se muestra en forma de gránulos y puede constar de dos componentes principales: amilosa la cual es una glucosa de cadena lineal y amilopectina la cual se presenta como una cadena ramificada. Se encuentra en diferentes proporciones dependiendo de la planta que provenga. Se utiliza ampliamente en la industria alimentaria por sus propiedades estabilizadoras, gelificantes y espesantes. Sin embargo, también se utilizan para la fabricación de bioplásticos, adhesivos, papel y textiles entre otros (Donmez, 2018).

1.1.4.1 Almidón de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)

El almidón de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*) presenta algunas diferencias notables en sus propiedades y características en comparación con otros almidones utilizados para la fabricación de bioplásticos.

En su composición química, el almidón de zanahoria blanca contiene tanto amilosa como amilopectina. La amilosa es una cadena lineal de glucosa unidas por enlaces alfa-1,4-glucosídicos y, por lo general, representa alrededor del 20-30% del almidón presente en las zanahorias. Por otro lado, la amilopectina es una cadena ramificada de glucosa unidas por enlaces alfa-1,4-glucosídicos y enlaces alfa-1,6-glucosídicos en los puntos de ramificación. Esta es la forma más abundante de almidón en la zanahoria blanca, representando aproximadamente el 70-80% del total (**Pinto, 2019**).

La proporción de amilosa y amilopectina en el almidón de zanahoria blanca puede tener un impacto significativo en sus propiedades y funcionalidades al utilizarse en la fabricación de bioplásticos. **Pinzón, (2020)** señala que la amilosa, con su estructura lineal, puede influir en la formación de películas y materiales más rígidos, mientras que la amilopectina, con su estructura ramificada, podría contribuir a la flexibilidad y elasticidad de los bioplásticos resultantes.

Estas particularidades en la composición del almidón de zanahoria blanca hacen que sea un material de interés para la producción de bioplásticos con propiedades específicas y una opción prometedora para la industria de los materiales sostenibles y ecológicos.

1.1.5 Plastificantes

Los plastificantes son aditivos químicos esenciales que desempeñan un papel fundamental en la mejora de las propiedades físicas de los plásticos, tales como su

resistencia y durabilidad. Los polímeros, que son largas cadenas de moléculas que conforman los plásticos, tienden a volverse rígidos y quebradizos cuando se unen entre sí. Es en este punto donde los plastificantes intervienen como lubricantes, reduciendo la fuerza de interacción entre las cadenas de polímeros y permitiéndoles deslizarse unos sobre otros con mayor facilidad (**Czogala, Pankalla & Turczyn, 2021**). Como resultado, el plástico adquiere mayor flexibilidad, elasticidad y capacidad para resistir impactos.

1.1.5.1 Alcohol polivinílico (PVA)

El alcohol polivinílico (PVA) es un polímero termoplástico amorfo y lineal que presenta características notables. Aunque es insoluble en la mayoría de los solventes orgánicos, se disuelve en agua caliente y mezclas de agua y alcohol (**Bavya et al., 2019**). Su estructura le proporciona una alta resistencia a la tracción, así como una excelente capacidad para resistir impactos y flexiones.

La solubilidad del PVA puede variar en función de su grado de polimerización y grado de hidrólisis. A medida que aumenta el grado de hidrólisis, es decir, la cantidad de grupos hidroxilo en el polímero, su solubilidad en agua también aumenta. Esto significa que su capacidad de disolución se puede ajustar para adaptarse a diversas aplicaciones (**Fan, 2008**).

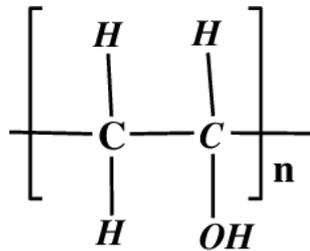
El PVA es ampliamente utilizado para fabricar películas delgadas y transparentes con una resistencia mecánica destacada, además de ofrecer una buena barrera contra el vapor de agua y el oxígeno (**Wypych, 2015**). Esta combinación de propiedades lo hace adecuado para envases y recubrimientos que requieren una alta protección contra la humedad y los gases.

Una de las cualidades más destacadas del PVA es su biodegradabilidad en condiciones ambientales adecuadas. Cuando está expuesto a microorganismos y humedad, el PVA

se descompone en agua y dióxido de carbono, sin dejar residuos tóxicos (**Singh et al., 2021**). Esta característica lo convierte en una opción más ecológica para aplicaciones donde la biodegradabilidad es esencial, ayudando a reducir el impacto ambiental y promoviendo la sostenibilidad. El uso responsable del PVA puede contribuir a la protección del medio ambiente y la transición hacia materiales más eco-amigables en diversas industrias.

Figura 3

Estructura del alcohol polivinílico (PVA)



Nota: Obtenido de: (**Salman, 2018**)

1.1.5.2 Glicerina

La glicerina, conocida también como glicerol o propanotriol, es un compuesto químico orgánico líquido a temperatura ambiente. Es un líquido viscoso, incoloro, inodoro y con sabor dulce. Se obtiene principalmente mediante la hidrólisis de grasas y aceites vegetales o animales, como el aceite de coco, el aceite de soja o la grasa animal. También puede ser un subproducto en la fabricación de biodiesel (**Atkins, 2007**).

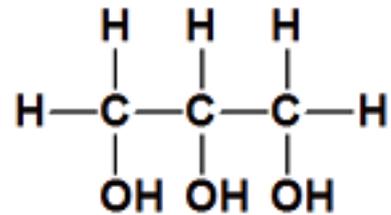
Cuando se añade glicerina a ciertos polímeros, se logra reducir su rigidez y aumentar la flexibilidad del material resultante (**Vieira et al., 2011**). Esto resulta especialmente útil en aplicaciones que requieren un plástico más blando y maleable, como en la fabricación de películas plásticas o recubrimientos flexibles.

La glicerina funciona de manera similar a otros plastificantes, como los ftalatos, al lubricar las cadenas de polímeros y permitir mayor movilidad y lubricidad entre ellas,

esto mejora la resistencia al impacto, la facilidad de conformado y la procesabilidad del plástico (Callister & Rethwisch, 2019).

Figura 4

Estructura de la glicerina



Nota. Obtenido de: (Salud, Nutrición Y Deporte, 2017)

1.1.6 Biopolímeros

Los biopolímeros son polímeros presentes de forma natural en organismos vivos o que pueden producirse a través de procesos biotecnológicos. A diferencia de los polímeros sintéticos obtenidos a partir de recursos no renovables como el petróleo, los biopolímeros provienen de fuentes biológicas renovables, como plantas, animales, bacterias y algas (George et al, 2020).

1.1.6.1 Bioplásticos

Los bioplásticos son plásticos hechos principalmente de materiales biológicos renovables en lugar de recursos fósiles no renovables como el petróleo. Estos plásticos están hechos de biopolímeros.

Los bioplásticos se utilizan en una amplia gama de productos, como bolsas compostables, envases de alimentos, vajillas desechables, textiles, películas agrícolas, así como productos médicos y farmacéuticos (Neves, 2020). Su aumento en la utilización es motivado por el deseo de reducir la contaminación y fomentar prácticas más sostenibles dentro de la industria.

Los bioplásticos constituyen una porción limitada del mercado global de plásticos, representando aproximadamente entre el 1 % y 2 %. La gran mayoría de los plásticos que se emplean actualmente son polímeros obtenidos de recursos no renovables, como el petróleo y el gas natural (**Ibrahim et al., 20221**). El bioplástico más utilizado en la actualidad es el ácido poliláctico (PLA) el cual es un polímero biodegradable que se obtiene a partir del almidón de maíz, caña de azúcar y otros materiales vegetales con alto contenido de almidón.

1.1.6.2 Ensayos de caracterización del bioplástico

1.1.6.2.1 Resistencia a la deformación por esfuerzo mecánico a tracción.

La resistencia a la tracción o esfuerzo mecánico se define como la capacidad de un material de resistir a un nivel máximo antes de provocar su rompimiento causado por estiramiento, tomando en cuenta que a su vez pueden incidir factores como la temperatura, humedad o velocidad de deformación. **Lestari et al, (2020)** expresa que los plásticos comúnmente son elaborados con la finalidad de soportar una fuerza considerable en su estructura, por lo que las moléculas que componen el mismo deben ser capaces de resistir el peso o fuerza aplicada en el material con la finalidad de otorgar un buen nivel de protección a los objetos dispuestos en el bioplástico.

Para determinar la calidad de la Biopelícula formada y asegurar que cumpla con las características que permitan usarla en reemplazo de un plástico común, es necesario validar el comportamiento mecánico del material, para esto debe relacionarse la tasa de deformación de la estructura, como respuesta del material a una fuerza aplicada (**Asrofi et al., 2020**).

La validación de este parámetro se realiza mediante el uso del texturómetro, donde se induce un esfuerzo axial de tensión creciente en la estructura de la Biopelícula obtenida, hasta provocar la ruptura de esta, cabe recalcar que la fuerza aplicada en este ensayo aumenta de forma lenta y progresiva para no causar una ruptura abrupta del material (**Hajikhani, Emam & Askari, 2021**).

1.1.6.2.2 Resistencia elástica

Este parámetro mide el nivel máximo de estiramiento al que puede someterse la Biopelícula antes de producirse una ruptura en su estructura y la capacidad de este de regresar a su forma original una vez terminado el proceso de estiramiento. **Alonso, Felix, & Romero, (2022)** indican que en este ámbito es necesario diferenciar los dos tipos de materiales que se pueden identificar, uno completamente elástico que tendrá un 100% de recuperación elástica y otro considerado netamente como plástico que no tendrá en ningún caso una recuperación elástica completa.

1.1.6.2.3 Ensayos Físicos

Los ensayos físicos son importantes para determinar si el bioplástico obtenido cumple con características propias de un plástico obtenido de manera común (**Chowdhury et al., 2022**).

- Medición del **grosor** de la película a partir del empleo de un micrómetro.
- Facilidad con que una o varias sustancias atraviesan la membrana que compone el bioplástico, esto se conoce como **permeabilidad**.
- Identificar si la Biopelícula es susceptible por **solubilidad**, a ser disuelta en disolventes comunes como el agua o en su defecto si esta va a ser usada en el ámbito alimenticio, su capacidad de disolverse en una matriz alimentaria o en el sistema digestivo humano.

1.1.6.2.4 Ensayos de Biodegradabilidad

Kaur et al., (2019) menciona que la biodegradabilidad se define como la transformación de las biomoléculas componentes de una estructura, en otros componentes que generalmente presentan una estructura química menor y más simple, comúnmente los plásticos convencionales tienen una baja tendencia de degradación, sin embargo, un bioplástico elaborado a partir de una matriz a base de proteínas puede ser susceptible a acción de microorganismos como bacterias u hongos que pueden generar hidrólisis de la estructura, este tipo de degradación es de

tipo aerobia.

Por otra parte, puede darse una degradación del bioplástico sin la participación de microorganismos u oxígeno, donde las condiciones ambientales como la temperatura o la humedad causen deformaciones en la estructura de la película que la vuelvan inutilizable si las condiciones de almacenamiento no son óptimas y asépticas, puede derivar en una degradación anaerobia, donde bacterias que no requieren oxígeno para su metabolismo pueden transformar los componentes del material en derivados como metano (CH₄), dióxido de carbono o hidrógeno molecular en menores concentraciones (**Folino, Pangallo & Calabrò, 2023**).

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Elaborar un bioplástico a partir de colágeno obtenido de residuos de wet blue proveniente de una curtiembre de la ciudad de Ambato, agentes plastificantes y almidón de zanahoria blanca.

1.2.2 Objetivos específicos

- Extraer colágeno a partir de una hidrólisis alcalina del wet blue con óxido de magnesio.
- Probar diferentes combinaciones y concentraciones de colágeno obtenido del wet blue y el almidón de zanahoria blanca en formulaciones para la obtención de un bioplástico con características óptimas.
- Realizar ensayos mecánicos que determinen la calidad del bioplástico formado.

1.3 Hipótesis

1.3.1 Hipótesis nula

El hidrolizado de colágeno obtenido de residuos de wet blue no puede ser utilizado para la elaboración de un bioplástico.

1.3.2 Hipótesis alternativa

El hidrolizado de colágeno obtenido de residuos de wet blue puede ser utilizado para la elaboración de un bioplástico.

CAPÍTULO 2.- METODOLOGÍA

2.1 Materiales

Tabla 2

Reactivos de laboratorio

Compuesto	Descripción	Cantidad
Alcohol Polivinílico	88%. Ronas Chemicals IND. Laboratorios Cevallos, Ecuador.	3,33 Kg
Glicerina	Grado USP. CREMER. LaboratoriosCevallos, Ecuador.	1L
Óxido de magnesio	Grado USP. CREMER. Laboratorios Cevallos, Ecuador.	1 Kg
Ácido nítrico (HNO ₃)	65%. Merk KGaA, Alemania	100 ml
Ácido clorhídrico (HCl)	37%. Merk KGaA, Alemania	100 ml
Kit test HI 93723-01	Cr (VI). Hanna Instruments, Ecuador	1kit
Almidón de zanahoria blanca	Ambato - Ecuador	1 Kg
Hidrolizado de colágeno	Bovino	1 kg

Tabla 3*Equipos de laboratorio*

Equipo	Detalle	Cantidad
Balanza digital	OHAUS V71P30	1
Centrífuga	HERMLE	1
Texturómetro	Brookfield CT3	1
Plancha de calentamiento con agitación	VELP AM4	1
Balanza analítica	Radwag N1BM1F	1
Potenciómetro	ACCUMET AB200	1
Agitador vertical	THOMAS R010	1
Estufa	Binder ED-400	1
Fotómetro	Hanna Instruments HI839800	1
Pie de rey	TRUPER CALDI-6MP	1
Microondas	Ethos up	1
Sorbona	Frontier Junior	1
Bomba de vacío	-	1

Tabla 4*Insumos de laboratorio*

Detalle	Cantidad
Desecador	1
Probeta de 100 mL	1
Varillas de agitación magnética	3

Bandejas de aluminio	5
Vasos de precipitación 600 mL	2
Vasos de precipitación 200 mL	2
Vasos de precipitación 1 L	2
Termómetro	1
Vaso para centrífuga	3
Paquete de fundas Ziploc	1
Cajas Petri	5
Moldes de vidrio	4
Moldes de plástico	5

Tabla 5

Formulaciones del polímero utilizando alcohol polivinílico en partes por peso (PVW)

Formulación	PVA	Almidón	HC	Peso Total
F1	3	2	2	200
F2	3	2	5	200
F3	3	5	2	200
F4	3	5	5	200
F5	5	2	2	200
F6	5	2	5	200
F7	5	5	2	200
F8	5	5	5	200

Nota. Formulaciones utilizando el plastificante PVA, el peso final fue de 200 g.

Tabla 6*Formulaciones del polímero utilizando glicerina*

Formulación	Glicerina	Almidón	HC	Peso Total
F9	3	2	2	200
F10	3	2	5	200
F11	3	5	2	200
F12	3	5	5	200
F13	5	2	2	200
F14	5	2	5	200
F15	5	5	2	200
F16	5	5	5	200

Nota. Formulaciones empleando el plastificante Glicerina, para un peso final de 200 g.

2.2 Métodos

2.2.1 Recepción y procesamiento de la materia prima

El wet blue fue obtenido de una curtiembre de la ciudad de Ambato, donde al momento de receptorlo se determinó que contiene un alto porcentaje de humedad típicamente con valores ubicados entre 50 y 60 % (Acosta, 2023), por lo cual se procedió a secarlo en la estufa a 70 °C por un periodo de 24 horas.

Una vez el wet blue ha sido secado, se procedió a tritararlo para luego someterlo a un proceso de molienda y tamizaje con membrana de 1,4 mm obteniéndose polvo.

2.2.2 Extracción de Hidrolizado de colágeno a partir de wet blue

Para la extracción de HC se siguió un procedimiento de **Vallejo et al., (2019)** donde se tomó 50 g de wet blue por cada 500 mL de agua, donde el reactivo empleado fue el 5 g de óxido de magnesio obteniéndose una hidrólisis alcalina descrita por (**Parisi et al., 2021**) manteniéndose durante 4 horas con agitación constante a 1200 rpm y 70 °C.

Posteriormente, el conglomerado se sometió a centrifugación a una velocidad de 3900 rpm durante 15 min, donde se separó el sobrenadante y se lo dispuso a secado por 60°C por 24 horas para obtener una película de hidrolizado de colágeno que finalmente fue colocada en el molino para obtener polvo.

2.2.3 Cálculo del rendimiento del hidrolizado de colágeno

Una vez seco el hidrolizado de colágeno, se procede a pesar y se calcula el rendimiento con la siguiente formula:

$$Rendimiento = \frac{G}{W} \times 100$$

Donde:

G = masa en gramos del hidrolizado de HC

W = masa en gramos de virutas de wet blue empleadas inicialmente

2.2.4 Análisis de cromo en el Hidrolizado de colágeno

Antes de determinar el contenido de cromo, se llevó a cabo una etapa de digestión ácida en microondas de los residuos de wet-blue. En el cual, se tomó una muestra de 0.5 g que se había secado previamente en una estufa a 105 °C. Luego, se añadieron 5 mL de ácido nítrico (HNO₃) junto con 1 mL de peróxido de hidrógeno (H₂O₂), y la mezcla se calentó en el microondas. La reacción se dejó transcurrir durante 15-20 min,

y después se enfrió durante un lapso de 15 min. Finalmente, la muestra se filtró y se ajustó el volumen a 100 mL con agua destilada en un balón.

El análisis de cromo se realizó mediante el método gravimétrico (**DeltAcque, 2019**), en el cual se calentó 100 mL de la disolución de la muestra y se agregó gradualmente hidróxido de amoníaco al 10 % hasta que se formó un sedimento, el sólido resultante se sometió a un proceso de secado en una estufa a 100 °C y luego se introdujo en una mufla a 800 °C durante un período de 2-3 horas.

La cantidad de cromo se calculó mediante la siguiente fórmula:

$$\% Cr_2O_3 = \frac{P}{M} * 100$$

Donde:

P = Peso en gramos del óxido de cromo luego del calcinado

M= Peso en gramos de muestra de wet blue utilizada

Para el análisis de Cromo VI se empleó el fotómetro multiparamétrico y el kit HI93723-01 de **HANNA Instruments (2022)**, se colocó la muestra y el blanco hasta alcanzar 10 mL y se introdujeron al equipo, se obtuvieron valores de cromo hexavalente en ppm en un tiempo aproximado de 6 min.

2.2.5 Formulación Bioplástico

2.2.5.1 Obtención de almidón a partir de zanahoria blanca (*Arracacia xanthorrhiza*)

Para la obtención de almidón se siguió el procedimiento de **Pico et al., (2022)**, se pesó 3 kg de zanahoria blanca obtenida del Mercado Modelo de la ciudad de Ambato, seguidamente se procedió al retiro de la corteza y troceado en cuadros para someterlo a licuado con el propósito de romper las paredes celulares que derivó en la liberación

del almidón al medio acuoso, a continuación, se procedió a tamizaje con tamaño de membrana de 45 µm para separar el producto deseado de la celulosa.

Una vez realizado el tamizaje, se procedió a colocar el almidón contenido en la matriz acuosa en un recipiente para decantación con la finalidad de sedimentar el mismo por 12 horas, se eliminó el líquido restante y se resuspendió en agua potable para lavarlo y sedimentarlo nuevamente, este proceso se repitió por 2 ocasiones hasta el que el almidón se encontró completamente blanco. En la etapa final se retiró el agua y se colocó el sedimento en la estufa a 40 °C por 24 horas hasta obtener polvo.

2.2.5.2 Formulación de mezclas para obtener bioplásticos

Para la formulación de las mezclas para obtener el bioplástico, se realizó pruebas empíricas tomando como referencia valores bibliográficos de **Sun et al., (2022)** y ajustando los mismos a los requerimientos de formación de la película deseada, una vez realizado el análisis se definieron las concentraciones detalladas en (Tablas 6; 7), donde a partir de ello se realizaron 16 mezclas con 3 repeticiones cada una siguiendo el modelo de un diseño experimental 2^3 descrito en la sección de análisis estadístico.

Con la ayuda de un agitador mecánico vertical THOMAS R010 se llevó a cabo la agitación de los componentes siendo el primer paso colocar agua destilada en un vaso de precipitación y llevar a la plancha de calentamiento a 90 °C con el objetivo de disolver el PVA, se dejó agitar durante un tiempo de 30 min, en otro vaso se colocó agua y el almidón de zanahoria blanca a las mismas condiciones mencionadas anteriormente hasta que se formó un gel, posterior a esto se adicionó al PVA el hidrolizado de colágeno y se dejó en agitación durante 10 min, luego se agregó el gel de almidón a la mezcla y se dejó en agitación durante 2 horas.

En el caso del uso de la glicerina, como primer paso se dejó en constante agitación el almidón en agua destilada durante 30 min, posterior a esto se le agregó la glicerina y el HC y se agitó durante 30 min más.

Las mezclas se colocaron en moldes de plástico y se dejaron secar en la estufa a 60 °C durante 24 horas.

2.2.6 Ensayos mecánicos para determinar la calidad del bioplástico formado.

2.2.6.1 Ensayo de tracción

Para el ensayo de tracción se empleó un quipo denominado texturómetro Brookfield CT3, bajo una modificación de la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2635:2012 basada en la ASTM D882, para lo cual se cortaron polímeros de 2 x 5 y se colocaron en las mordazas del texturómetro, se apretó lo más firmemente posible para evitar cualquier tipo de deslizamiento durante el ensayo, con una separación de 20 mm y una velocidad de separación de 50 mm/s y se aplicó una carga de activación específica para cada tipo de polímero. El ensayo finalizó cuando se alcanzó un punto de ruptura o deformación permanente en el material (Tablas 9; 11) (INEN, 2012).

La resistencia a la tracción se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{Resistencia (MPa)} = \frac{\text{Fuerza (N)}}{\text{Área (mm}^2\text{)}}$$

2.2.6.1.1 Análisis estadístico

El diseño experimental que se utilizó fue un diseño experimental de 2³, los factores de interés fueron: concentración de plastificante, concentración de almidón y concentración de HC con dos niveles cada uno, con la finalidad de encontrar la formulación que otorgue a al bioplástico mejores propiedades mecánicas.

Para el desarrollo del diseño experimental es necesario definir los niveles tanto alto como bajo, que determinarán el rango de concentración de cada uno de los componentes de la formulación.

2.2.6.2 Permeabilidad al vapor

La permeabilidad al vapor se determinó mediante el método descrito por **(Sobral, 2001)**. Se cortaron los polímeros y se colocaron como tapa en recipientes de vidrio de radio 16,5 mm que contenían sílica gel previamente seca a 105 °C durante 1 hora, estos recipientes se colocaron en la parte superior de un desecador que contenía un depósito de agua miliQ, Durante un período de 10 horas, todas las piezas estuvieron expuestas a vapor de agua saturado en condiciones ambientales. Se procedió a pesar cada hora la sílica gel para determinar la tasa de vapor de agua absorbida.

Se realizaron ensayos por triplicado de cada tipo de biopelícula usando la siguiente ecuación:

$$WVP = \frac{w}{tA} \cdot \frac{x}{\Delta P}$$

Donde:

WVP = Permeabilidad al vapor de agua

w = ganancia de peso

t = tiempo

A = área de permeación

x = espesor

ΔP = variación de la presión

La diferencia de presión de vapor parcial entre la atmósfera con gel de sílice y agua pura es de 2642 Pa a 22 °C.

2.2.6.3 Solubilidad en agua

Para determinar la materia soluble total (TSM) se cortaron películas de 5 mm, se pesaron y se colocaron en 30 mL de agua pura, a 20 °C con una agitación constante durante 24 h, posteriormente se filtraron las porciones restantes y se colocaron en la estufa a 40 °C hasta que se secaron y luego a 105 °C hasta que tuvieron un peso constante, los residuos se pesaron nuevamente **Pico et al., (2022)**.

Se realizaron ensayos por triplicado de cada película, se calculó la solubilidad utilizando la ecuación:

$$TSM = \frac{W1 - W2}{W1} * 100$$

Donde:

W1= peso inicial de la película seca

W2 = peso final de la película seca

2.2.6.4 Recuperación elástica

Se empleó el texturómetro para medir la recuperación elástica, en el ensayo se midió la longitud inicial del bioplástico antes de aplicar la fuerza, se retiró y midió la longitud final, se determinó la distancia de recuperación y el porcentaje de recuperación.

Para obtener el módulo de Young se representa gráficamente el esfuerzo en función de la tensión (**INEN, 2012**). El módulo de Young se calcula utilizando la ecuación.

$$Y = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

Donde:

Y: es el módulo de Young, Pa

σ : es el esfuerzo por unidad de área sobre la sección inicial

ϵ : es la deformación unitaria en cualquier punto

2.2.6.5 Ensayo de biodegradabilidad

Se siguió la metodología realizada por **González, Strumia & Igarzabal, (2011)** con algunas modificaciones, se cortaron películas de 2,5 cm x 2,5 cm de todas las muestras, se pesó cada una de ellas y se colocaron en recipientes con tierra parcialmente húmeda durante un tiempo de 24, 48, 72 y 96 horas, posteriormente se lavaron con agua destilada y se colocaron en la estufa a 50 °C durante 24 horas, se pesaron las muestras secas y se calculó el porcentaje de pérdida de peso y el tiempo estimado de la biodegradación. Se realizaron muestras por triplicado.

$$D = \frac{W1 - W2}{W1} * 100$$

Donde:

D = Porcentaje de pérdida de peso

W1 = Masa de la muestra inicial pesada

W2 = Masa de la muestra final pesada

$$DE = \frac{100\%}{D} * \text{tiempo de prueba}$$

Donde:

DE = Estimación de degradación

CAPÍTULO 3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Análisis y discusión de los resultados

3.1.1 Extracción de colágeno a partir de wet blue

Se realizó una hidrólisis alcalina con óxido de magnesio (MgO), se trabajó con una relación 1:10 de wet blue y de agua respectivamente, a 50 g de wet blue se agregaron 3 g de óxido de magnesio en el momento de la hidrólisis como menciona en su estudio **Scopel, et al., (2016)**, sin embargo con estas cantidades se obtuvo un rendimiento del 13%, por lo cual en la misma cantidad de wet blue se adicionaron 5g de óxido de magnesio y se mejoró el rendimiento obteniendo un valor del 35 %, esto debido a que el óxido de magnesio actúa como catalizador en el proceso de hidrólisis de colágeno mejorando la eficiencia de la misma, no obstante **Schneider et al., (2008)** expresa que una cantidad excesiva de MgO puede ser problemática en el hidrolizado de colágeno ya que podría provocar cambios en el pH y generar péptidos muy pequeños y poca capacidad de formar geles.

Según **Gómez et al., (2011)** el pH se debe encontrar en un rango de 8 – 10 con el propósito de prevenir la solubilización de cromo en el hidrolizado. La temperatura también consiste un parámetro fundamental en el proceso de hidrólisis ya que a mayor temperatura (80-90 °C) se consigue una aceleración en la velocidad de reacción (**Schneider et al., 2008**), sin embargo, esto puede ocasionar un cambio en el estado de oxidación del cromo, por lo cual el proceso se realizó a una temperatura constante de 70 °C y un tiempo de 4 h según un estudio realizado por (**Kupec et al., 2002**) donde muestra resultados favorables con estos parámetros.

El wet blue se utilizó en un tamaño de 1,4 mm con el fin de aumentar la efectividad del proceso de hidrólisis, ya que facilita la descomposición del HC obteniendo mayor cantidad de este en un menor tiempo (**Viegas, 2016**).

Figura 5

Hidrolizado de colágeno obtenido durante el proceso



Nota. Hidrolizado de colágeno secado a 60 °C durante 24 horas

3.1.2 Análisis de cromo en el Hidrolizado de colágeno

Tabla 7

Determinación de cromo presente en el hidrolizado de wet blue

Parámetro analizado	Réplicas			Porcentaje Promedio (%)
	R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	
Cr ₂ O ₃	2,32	2,38	2,26	2,50 ± 0,06

Nota. En la tabla se observan los valores de óxido de cromo por triplicado mediante el método gravimétrico.

El promedio de óxido de cromo (Cr₂O₃) fijado en el HC de la piel fue de 2,50 ± 0,06 la desviación estándar se encuentra más cercana a cero lo que indica mayor precisión en el ensayo, **Qiang & Feng, (2011)** menciona que el Cr₂O₃ se encuentra en un rango de 3 % a 6 %, lo que demuestra que el valor obtenido es relativamente bajo, esto puede deberse a la concentración de sal cromada a la cual fue sometida el cuero.

El bajo contenido de cromo presente en el hidrolizado de colágeno se debe a las propiedades del MgO con el cual se obtiene una solución menos alcalina a diferencia

de otros compuestos como el hidróxido de sodio NaOH ya que el cromo se disuelve y forma complejos con el hidróxido (OH-) de este compuesto, los cuales son solubles en la solución generando mayor cantidad de cromo que se extrae con el hidrolizado de colágeno (**Pahlawan et al., 2019**).

En lo referente al método colorimétrico no se encontró presencia de cromo (VI). Esto se basa en el hecho de que la hidrólisis se llevó a cabo a un pH inferior a 10 y a una temperatura constante. Esta observación está en línea con investigaciones previas que indican que, bajo estas condiciones es poco probable que haya presencia de cromo hexavalente (**Scopel et al., 2019**).

3.1.4 Formulación del bioplástico

Las formulaciones de los bioplásticos se realizaron experimentalmente tomando como base el estudio efectuado por **Valdez et al, (2019)**, se realizaron diversos experimentos en los que se aumentó la cantidad de HC y almidón a 10 %, sin embargo, con estas cantidades se obtuvo una mezcla húmeda, pegajosa y difícil de manejar, dado que al aumentar estos componentes se genera una mayor retención de agua debido a sus propiedades hidrofílicas al poseer grupos hidroxilo (-OH) en su estructura, esto sin tomar en cuenta el plastificante empleado (**Mendieta, 2009**).

Por otro lado, se realizaron también formulaciones disminuyendo las cantidades de HC y almidón a 2 % y 5 % para cada una de las concentraciones de plastificantes, con estos valores se obtuvieron láminas con mayor textura y resistencia, lo que concuerda con el estudio realizado por **Valdez et al, (2019)**.

3.1.5 Diseño experimental para la elaboración de los bioplásticos

Se realizó un diseño factorial 2^k , en donde k representa los factores y 2 los niveles, los factores que se utilizaron en este estudio fueron 3 ([C] plastificante, [C] almidón, [C] HC), con dos niveles cada uno por lo que se optó por el diseño 2^3 siendo la variable de respuesta la resistencia mecánica. Así, es posible identificar una combinación de diferentes niveles de los factores que influyen en la formación del bioplástico.

3.1.6 Análisis estadístico

Tabla 8

Datos de resistencia para cada formulación con PVA

[C] HC	[C] Alcohol Polivinílico			
	3%		5%	
	[C] Almidón			
	2%	5%	2%	5%
2%	110,41 ± 8,5	79,22 ± 8,27	96,45 ± 5,66	115,29 ± 11,89
5%	110,38 ± 7,69	89,13 ± 2,28	119,46 ± 2	37,1 ± 5,94

Nota. Valores promedio de resistencia analizados por el texturómetro CT3

3.1.6.1 Análisis de varianza (ANOVA) con alcohol polivinílico PVA

Los resultados del análisis de varianza realizados para la resistencia del bioplástico señalaron que los datos se ajustan correctamente al modelo propuesto ya que se obtuvo un valor de $R^2 = 94,84\%$ y el coeficiente de determinación ajustado $R^2 = 92,59\%$, lo que significa que la variabilidad de la variable de respuesta puede ser explicada por las variables independientes.

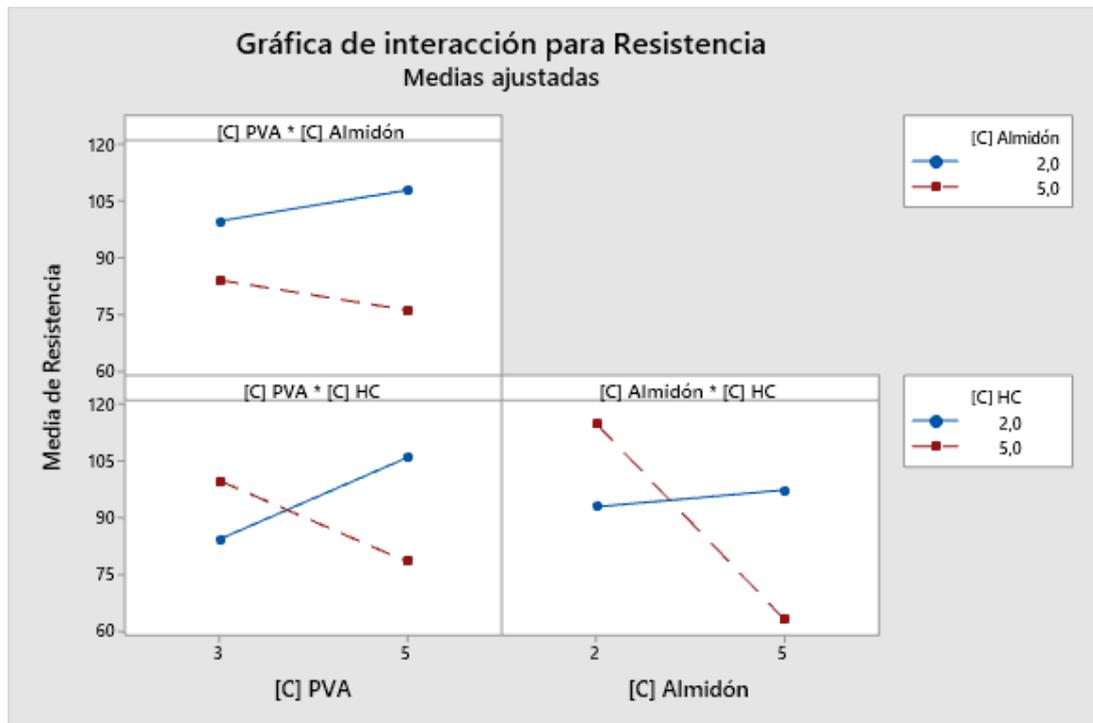
Tabla 9*Análisis de varianza para la resistencia con PVA*

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Modelo	7	15365,4	2195,06	42,03	0,000
Lineal	3	5975,7	1991,90	38,14	0,000
[C] PVA	1	163,0	163,02	3,12	0,096
[C] Almidón	1	5042,8	5042,81	96,57	0,000
[C] HC	1	769,9	769,87	14,74	0,001
Interacciones de 2 términos	3	4757,4	1585,79	30,37	0,000
[C] PVA*[C] Almidón	1	46,0	45,95	0,88	0,362
[C] PVA*[C] HC	1	1587,1	1587,14	30,39	0,000
[C] Almidón*[C] HC	1	3124,3	3124,29	59,83	0,000
Interacciones de 3 términos	1	4632,3	4632,32	88,71	0,000
[C] PVA*[C] Almidón*[C] HC	1	4632,3	4632,32	88,71	0,000
Error	16	835,5	52,22		
Total	23	16200,9			

Nota. Resultados de análisis de varianza obtenidos del paquete estadístico Minitab para determinar la influencia de [C] PVA, [C] Almidón, [C] HC sobre la resistencia del bioplástico.

Figura 6

Interacción de los factores para resistencia



En la figura 6 se puede observar que las líneas de [C] PVA y la [C] Almidón son levemente paralelas lo que significa que no existe interacción entre estos factores, lo cual se puede comprobar con el *valor p* obtenido en la ANOVA (Tabla 10) el cual fue de 0,362 por lo que no existe diferencia significativa entre estos dos factores. Sin embargo, los factores [C] PVA y [C] HC si poseen una interacción por lo que estos factores si dan resultados significativos, así como también se observa con los factores [C] HC y [C] Almidón.

3.1.6.2 Análisis de varianza (ANOVA) con Glicerina

Tabla 10

Datos de resistencia para cada formulación con glicerina

[C] HC	[C] Glicerina			
	3%		5%	
	[C] Almidón			
	2%	5%	2%	5%
2%	1,25±0,06	14,2 ± 3,64	1,68 ± 0,1	4,92± 2,53
5%	1,37±0,03	32,02± 3,33	5,06± 2,14	3,03± 0,77

Nota. Valores promedio de resistencia analizados por el texturómetro CT3

Los resultados mostraron que los datos se ajustan correctamente al modelo seleccionado ya que los valores de R^2 y el coeficiente de determinación ajustado R^2 fueron 97,05 % y 95,76 % respectivamente, siendo estos valores más altos que los obtenidos con el plastificante PVA, esto sugiere que el modelo es adecuado y que la incorporación de las variables independientes es pertinente para explicar las variaciones observadas en la variable de interés.

Los resultados también muestran que existe interacción significativa entre todos los factores ya que el *valor p* dio como resultado valores menores a 0,05.

Tabla 11

Análisis de varianza para la resistencia con glicerina

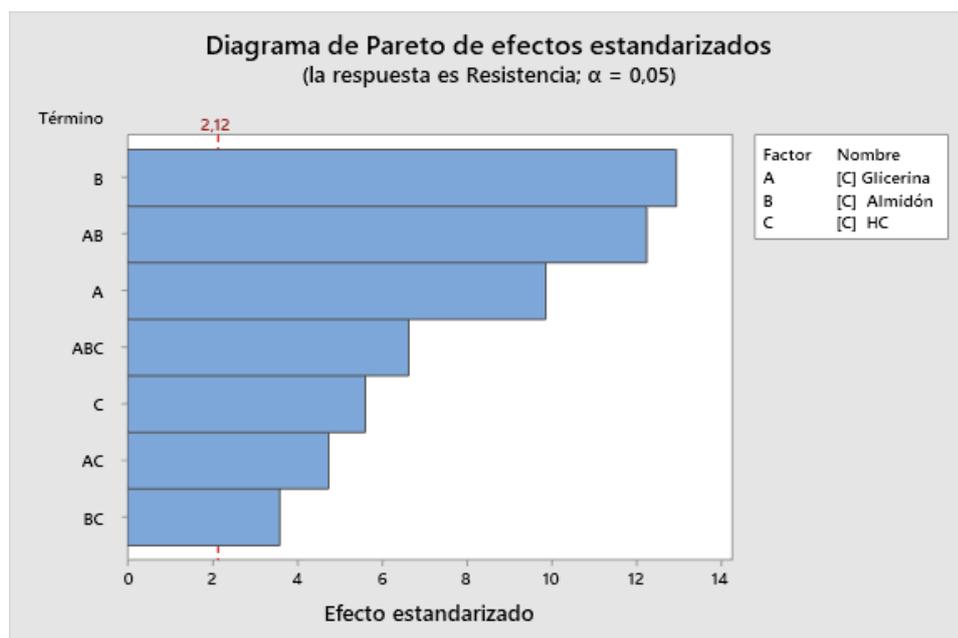
Fuente	SC		MC		Valor F	Valor p
	GL	Ajust.	Ajust.	Ajust.		
Modelo	7	2362,38	337,483	75,17	0,000	
Lineal	3	1331,70	443,900	98,87	0,000	

[C] Glicerina	1	437,50	437,504	97,45	0,000
[C] Almidón	1	752,53	752,528	167,62	0,000
[C] HC	1	141,67	141,669	31,55	0,000
Interacciones de 2 términos	3	832,82	277,606	61,83	0,000
[C] Glicerina*[C] Almidón	1	673,63	673,630	150,04	0,000
[C] Glicerina*[C] HC	1	101,31	101,312	22,57	0,000
[C] Almidón*[C] HC	1	57,88	57,877	12,89	0,002
Interacciones de 3 términos	1	197,86	197,858	44,07	0,000
[C] Glicerina*[C] Almidón*[C] HC	1	197,86	197,858	44,07	0,000
Error	16	71,83	4,490		
Total	23	2434,21			

Nota. Resultados de análisis de varianza obtenidos del paquete estadístico Minitab para determinar la influencia de [C] Glicerina, [C] Almidón, [C] HC sobre la resistencia del bioplástico.

Figura 7

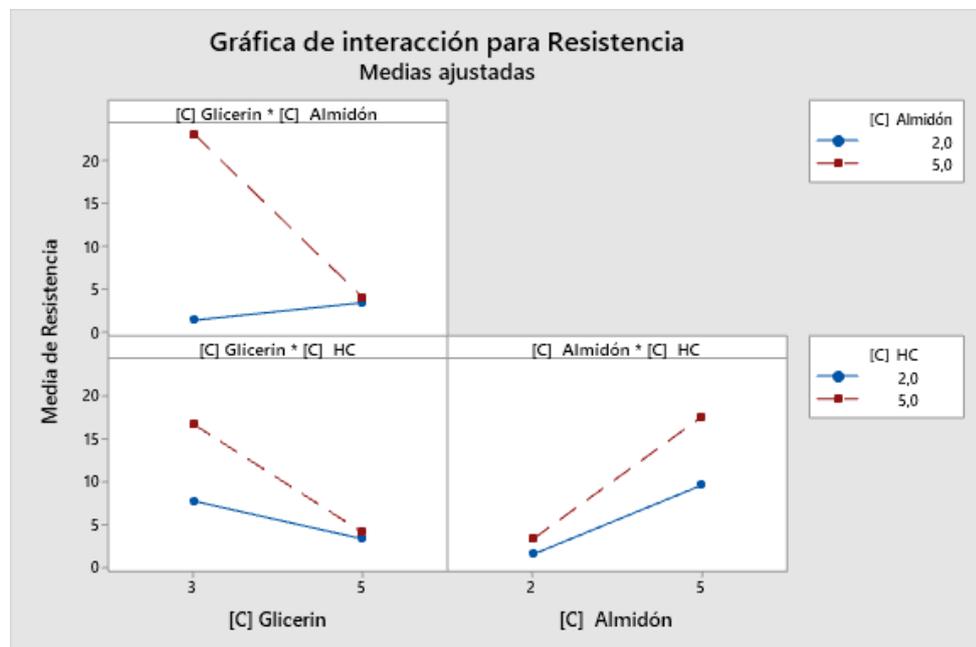
Diagrama de Pareto de los efectos analizados



La figura 7 Muestra el diagrama de Pareto en el cual todos los efectos estudiados sobrepasan el valor crítico de 2,12 lo que indica que todos son significativos, el almidón se puede observar que posee una influencia más relevante en los resultados obtenidos del análisis.

Figura 8

Interacción de los factores para resistencia con glicerina



En la figura 8 se puede evidenciar que en la [C] Glicerina vs [C] Almidón presentan una interacción al igual que [C] Glicerina vs [C] HC, a diferencia de [C] Almidón vs [C] HC donde no existe una interacción, sin embargo, por cómo están dispuestas las líneas tiende a tener interacción.

A partir del análisis estadístico se realizó una prueba de Tukey para ambos plastificantes y se eligieron las formulaciones que presentaba diferencia significativa con mayor media para realizarle los ensayos mecánicos y determinar cuál de ellas poseía las características óptimas como bioplástico.

Tabla 12*Formulaciones con valores significativos*

Formulación	Resistencia (MPa)
F8	37,10 ± 5,94
F5	96,45 ± 5,66
F7	115,29 ± 11,89
F6	119,46 ± 2,00
F11	14,20 ± 3,64
F12	32,02 ± 3,33

Nota. Formulaciones con diferencia significativa a través de la prueba de Tukey

3.1.7 Resistencia a la tracción

El presente estudio se enfocó en la elaboración de un bioplástico con características y propiedades tales que puedan reemplazar al polietileno, que es el polímero formado por cadenas de etileno que se emplea comúnmente para la elaboración de plásticos de baja densidad como fundas o de alta densidad como envases, entre otros.

Para la selección del bioplástico, se empleó como principal criterio la resistencia a la tracción, que se define como la máxima fuerza de tensión que puede aplicarse a un material antes de provocar su ruptura o hasta el punto donde este sufre una deformación irreversible (Gu, Zhao & Jhonson, 2020), esta propiedad fue elegida como variable de respuesta debido a que proporciona valiosa información sobre la calidad del plástico, permitiendo conocer si cumple con los estándares mínimos para su uso y aplicaciones, además de ser el punto de partida para la determinación de la utilidad específica del material siendo este parámetro una muestra de garantía y seguridad del producto final (Anexo R).

Tomando como base el criterio anterior, se determinó en (Tabla 13) que las formulaciones F8, F5, F7, F6 que fueron elaboradas usando como plastificante el alcohol polivinílico (PVA), presentan los valores más altos de resistencia a la tracción,

siendo la formulación F6 la que tiene un valor más alto, con 119,46 MPa que al compararse con información bibliográfica, se asemeja al material denominado Poliamida-imida que presenta 110,00 MPa de resistencia (**López et al., 2020**) y que presenta propiedades como polímero termo reducible que se obtiene mediante una polimerización con endurecimiento irreversible mediante el empleo de calor o radiación. Sin embargo, existe diferencia entre la naturaleza química de las Poliamida-imidas y el bioplástico elaborado, debido a que el primero es un conjunto de enlaces covalentes formados entre las cadenas individuales del material, siendo este tipo de enlace fuerte y resistente al rompimiento, mientras que el segundo es un entrecruzamiento de moléculas de almidón y HC en una matriz polimérica formada por alcohol polivinílico (**Gu, Zhao & Jhonson, 2020**).

Por otra parte, los valores de resistencia de las muestras F8 y F12 (Tabla 13), pueden compararse levemente con el Tereftalato de polietileno que presenta una resistencia a la tracción bibliográfica de 55 MPa (**Asadi et al., 2021**) y es un polímero obtenido mediante reacciones de policondensación usando como reactivos el etilenglicol y el ácido tereftálico, entre sus propiedades físicas se destaca su apariencia física amorfo transparente cristalina, lo que significa que su matriz polimérica se encuentra dispuesta de una forma caótica pero que sin embargo siguen un patrón que le permiten ubicarse dentro del rango de la cristalinidad, siendo en este sentido muy similar al bioplástico obtenido el cual pese a su visible estructura amorfa, presenta cierto grado de cristalinidad (**Sudheesh, et al, 2021**).

El empleo de la glicerina en la formulación del bioplástico, se realizó con el objetivo de elaborar un material capaz de reemplazar a las fundas plásticas, estas están formadas por polietileno de baja densidad que según bibliografía, presenta una resistencia a la tracción entre 10 y 20 MPa (**Amjadi & Fatemi, 2020**), razón por la cual puede considerarse a la muestra F11 (Tabla 13) como un excelente candidato para este fin, se indica que el polietileno de baja densidad (LDPE) presenta interacciones intermoleculares débiles debido a la presencia de un número alto de ramificaciones que incide en aproximadamente el 2% del total de átomos de carbono disminuyendo

la atracción dipolo generada por el dipolo instantáneo, derivando en una alta flexibilidad pero reduciendo considerablemente su resistencia, lo expuesto se puede ver reflejado también en el material elaborado, considerando que el empleo de glicerina en la formulación deriva en un intercalado entre las cadenas poliméricas formadas por el HC y el almidón lo que genera una atenuación en la comunicación intermolecular de los componentes, debilitando las fuerzas de interacción entre los mismos generando un efecto similar el cual es evidente (Mousavi, Høgsaa, & Fini, 2019).

3.1.8 Permeabilidad al vapor de agua

Tabla 13

Datos de permeabilidad al vapor de agua

Formulación	PWV (g mm min ⁻¹ m ⁻² kPa ⁻¹)
F8	0,0289±0,0016
F5	0,0091±0,0012
F7	0,0130±0,0018
F6	0,0138±0,0022
F11	0,0112±0,0002
F12	0,0112±0,0002

Nota. Resultados del valor medio de la permeabilidad al vapor de agua ± la desviación estándar.

La permeabilidad al vapor de agua es una variable sumamente importante que determina la efectividad del bioplástico elaborado como barrera contra la humedad que presenta el ambiente y en un indicativo de la calidad del material para su empleo como envases de sustancias susceptibles a humedad como los alimentos u otros (Keller & Khouzer, 2017). Se observa en la Tabla 14 que los productos elaborados a partir de PVA presentan los mayores índices de permeabilidad, esto es debido a su característica de afinidad a las moléculas de agua que generan su atracción y por consiguiente permeabilidad, lo cual sumado a la hidro afinidad del almidón gracias a sus grupos funcionales con carga parcial de naturaleza polar ubicadas en sus ramificaciones, permite el paso del vapor de agua a pesar que la disposición desordenada de sus cadenas en principio simule una barrera contra el vapor (Bertuzzi, 2007).

Finalmente, el HC que presenta grupos funcionales hidroxilo, amida y carboxilo, permite también la interacción con las moléculas de agua razón por la cual la concentración de los componentes y la forma de polimerización en la formación del plástico va a determinar su nivel de permeabilidad (**Junior et al., 2021**). En el caso de la glicerina la diferencia no es significativa debido a que este componente también presenta alta afinidad al agua por lo que un bioplástico elaborado a partir de glicerina tiene una permeabilidad al vapor relativamente alta (Anexo Q) (**Cerqueira et al, 2012**).

3.1.9 Solubilidad en agua

Tabla 14

Datos de solubilidad en agua

Formulación	Medias	%Solubilidad
F8	0,0534	25,41±3,38
F5	0,0053	78,26±6,44
F7	0,0172	65,27±18,62
F6	0,0054	81,56±6,22
F11	0,0343	34,96±1,93
F12	0,0543	38,68±4,72

Nota. Los resultados muestran las medias obtenidas y el % de solubilidad ± la desviación estándar.

El ensayo de solubilidad en agua permite determinar la reactividad de los bioplásticos elaborados, respecto a dicho solvente aunque bibliográficamente se indica que los plásticos con características óptimas, no presentan solubilidad en agua debido a que no contienen regiones de característica polar que pueda reaccionar con el compuesto (Anexo S) (**Shah et al., 2008**), pueden existir factores que provoquen la susceptibilidad del material al agua, como la porosidad que genera que las moléculas de agua se colen en la estructura polimérica, generando degradación por hinchamiento especialmente, además, se observa en la Tabla 15 que los bioplásticos elaborados a partir de PVA presentan un porcentaje elevado de solubilidad llegando incluso al 81,56 % en la muestra F6, esto es debido a que naturalmente el PVA es altamente soluble en

agua por sus grupos funcionales hidroxilo que pueden formar enlaces de puentes de hidrógeno con el solvente, lo que sumado a las fuerzas intermoleculares débiles secundarias en su estructura, genera el escenario perfecto para la movilidad del agua y su unión a los grupos funcionales afines expuestos, este proceso se replica en toda la estructura causando disolución del material (**Brough et al., 2016**).

Por otra parte, la estructura de la glicerina también se ajusta a un modelo polar, ya que presenta 3 grupos hidroxilo altamente reactivos con el agua en su cadena, además su relativo bajo peso molecular causa que la dispersión del agua se realice de forma más efectiva al no tener que sortear grandes distancias moleculares y la estructura amorfa del biopolímero produce también que el desordenamiento de las cadenas moleculares involucradas propicie su actividad con el agua, generando un porcentaje de solubilidad de hasta el 38,68 % (**Pu et al., 2014**), sin embargo, las formulaciones con glicerina poseen valores de solubilidad relativamente bajos a comparación de 3 de las formulaciones con PVA.

3.1.10 Recuperación elástica

Tabla 15

Datos obtenidos de recuperación elástica

Formulación	%Recuperación elástica
F8	0,56±0,13
F5	1,74±0,27
F7	0,36±0,1
F6	1,06±0,25
F11	52,57±0,23
F12	53,61±0,20

Nota. Los resultados muestran el % de recuperación elástica ± la desviación estándar.

La recuperación elástica mide la capacidad de un material de volver a su forma y tamaño original una vez ha sido aplicada una fuerza sobre el mismo, esta propiedad está otorgada por la flexibilidad y en el caso del alcohol polivinílico según se observa en la Tabla 16 es casi nula debido a que por su naturaleza, el PVA tiende a formar enlaces resistentes pero no flexibles en su polimerización, esta característica está dada por un comportamiento vítreo en lugar de plástico del material elaborado, además, el entrecruzamiento molecular de un polímero de PVA es al azar y desordenado lo que evita la correcta distribución de la fuerza aplicada en la estructura y por consiguiente mayor tendencia al rompimiento que al estiramiento (**Chen et al., 2012**), a diferencia de la glicerina que forma una estructura donde las cadenas del polímero se acoplan de tal manera que se reduce las fuerzas de atracción intermoleculares entre los componentes facilitando el movimiento de la estructura, de igual manera la glicerina es capaz de interactuar con la humedad presente en el ambiente lo que genera una suavización en sus enlaces y por consiguiente un mejor estiramiento, mejorando también su maleabilidad (**Auras et al., 2011**).

Bibliográficamente se destaca que una funda plástica presenta de un 40 a un 80 % de recuperación elástica dependiendo sus características como grosor o la utilidad, por lo que el 52,57 % y 53,61 % de recuperación de las formulaciones F11 y F12 respectivamente obtenidos en este estudio se ajustan adecuadamente a la propuesta de reemplazar una funda plástica. (**Weinstein, Crocker & Gray, 2016**).

3.1.11 Módulo de Young

Tabla 16

Datos obtenidos del Módulo de Young

Formulación	Módulo de Young
F8	5,21±1,95
F5	3,72±0,57
F7	14,85±2,47
F6	8,9±5,031
F11	0,00256±0,000031
F12	0,39004±0,0026

Nota. Los datos se obtuvieron a partir del texturómetro CT3

La elasticidad es también un parámetro fundamental con miras a obtener un bioplástico con la capacidad de reemplazar a una funda plástica de polietileno, esta se define como el alargamiento de los enlaces intermoleculares de los polímeros componentes, que puede ser reversible o irreversible dependiendo de la flexibilidad de dichos enlaces, si la estructura presenta un alto grado de flexibilidad, el material puede someterse a cargas de fuerza altas sin causar su ruptura y permitiendo su recuperación elástica que no es más que el reordenamiento de las cadenas de polímeros a su ubicación original al eliminarse la fuerza (**González, Strumia & Igarzabal, 2011**).

El tipo de plastificante utilizado influye directamente en el grado de flexibilidad del bioplástico obtenido, en la sección resultados (Tabla 17) se puede evidenciar que los plásticos elaborados a partir de PVA presentan un bajo nivel de flexibilidad, siendo estos altamente rígidos en su estructura mientras que aquellos elaborados con glicerina presentan una alta flexibilidad y maleabilidad, esto se puede explicar debido a que el alcohol polivinílico presenta en su estructura grupos funcionales del tipo hidroxilo (OH) lo que le otorga la capacidad de formar enlaces de tipo puente de hidrógeno con el solvente que en este caso es el agua y con otras moléculas afines de tipo polar, estos puentes de hidrógeno constituyen fuerzas intermoleculares fuertes, lo que otorga una rigidez importante al producto final cuando este se ha secado, siendo a su vez resistente a la deformación, a la tracción y a fuerzas externas que actúen sobre el materia (**Lim, et al 2021**). Por otra parte, la glicerina promueve una interacción entre su estructura y las cadenas intermoleculares de los polímeros permitiendo una mejor circulación de movimiento entre estas cadenas y un acomodamiento de moléculas de tipo amorfo, esto habilita la exposición a fuerzas externas capaces de inducir deformaciones, pero sin sufrir una ruptura de la estructura formada pese a que la resistencia a la tracción es menor (**Putri et al., 2022**).

La elasticidad está definida por el módulo de Young y está determinado por una relación entre el esfuerzo generado por una fuerza que provoca el estiramiento y la

deformación causada por dicha acción, este comportamiento se puede modelar mediante un diagrama de Esfuerzo – Deformación del cual la pendiente va a corresponder al módulo de Young (**López et al., 2020**). El comportamiento elástico de los plásticos está determinado por su resistencia a la deformación permanente o su predisposición a una deformación permanente, lo cual está determinado en (Tabla 17) con el parámetro de recuperación elástica. Se observa en la sección resultados que los bioplásticos elaborados a partir de PVA presentan valores de módulo de Young que superan las 3 unidades, esto es directamente proporcional a la resistencia a la tracción definida en estos casos como alta, debido a que se menciona bibliográficamente que mientras un material presente un valor de módulo de Young más alto, este presentará características de elevada rigidez y por consiguiente una baja o nula deformación elástica, mientras que un valor bajo de este parámetro es correspondiente a una alta flexibilidad y una dificultad notoria en la recuperación elástica (**Gu, Zhao & Jhonson, 2020**).

Se indica bibliográficamente que un plástico generalmente sufre una cierta deformación elástica antes de alcanzar el punto de ruptura, la deformación de las muestras plásticas obtenidas a partir de PVA no superan los 4 mm de elongación lo que genera ruptura si se continúa aplicando fuerza al material, a diferencia de los plásticos elaborados con glicerina, donde la elongación alcanzó los 80 mm esto es debido a que los enlaces hidroxilo (-OH) del PVA son prácticamente débiles y susceptibles a una ruptura por tensión, además la estructura polimérica del PVA en sus monómeros de vinilo no permite una cantidad alta de movimiento o flexión.

3.1.12 Ensayo de biodegradabilidad

Tabla 17

Resultados obtenidos de la degradación en el suelo

Formulación	Tiempo (horas)			
	24	48	72	96
F8	4,13 ±0,007	10,40±0,010	19,27±0,018	20,41±0,019

F5	9,57 ±0,006	20,04±0,006	29,96±0,005	41,77±0,002
F7	13,09±0,008	30,00±0,008	45,15±0,008	56,09±0,002
F6	12,06±0,005	20,00±0,012	25,29±0,012	28,49±0,011
F11	19,06±0,029	28,46±0,013	30,10±0,013	31,49±0,011
F12	7,39 ±0,007	12,33±0,001	20,76±0,002	25,71±0,004

Nota. La tabla muestra los resultados del % de biodegradabilidad cada 24 horas ± la desviación estándar.

Los bioplásticos son elaborados con el propósito a mejorar la capacidad de estos materiales de degradarse en un tiempo relativamente menor a los que comúnmente se utilizan y paliar así los efectos de la contaminación sufrida actualmente, para ello su estructura base se compone de biomoléculas receptoras a degradación como polisacáridos, proteínas, lípidos, entre otros, siendo en este caso empleado un polímero proteico de HC el cual es un polímero de fácil degradación, que se convierte a su aminoácidos elementales como consecuencia de la acción enzimática de las colagenasas, estas se encuentran en microorganismos y cepas bacterianas como *Pseudomonas*, *Vibrio*, *Streptomyces sp*, *Clostridium* principalmente, mientras que otro de los componentes como el alcohol polivinílico tiende a degradarse en ambientes acuosos debido a su característica polar, donde las moléculas de agua interaccionan con las bases estructurales del material causando ruptura de sus enlaces, además el pH del medio puede influir en la interacción de los grupos funcionales (OH) con su contraparte H⁺ en suelos con característica ácidos (**Kaur et al., 2019**), el almidón puede ser susceptible a enzimas amilasas secretadas por microorganismos para desdoblar el polímero y convertirlo en glúcidos aprovechables para su metabolismo.

Es por ello que según (Tabla 18) las muestras de bioplástico presentaron tasas de biodegradabilidad aceptables al ser colocadas en tierra de jardinería con características específicas como un pH ligeramente ácido, presencia alta de materia orgánica, retención de agua y presencia abundante de nutrientes, lo que le otorga las características óptimas para el desarrollo de microorganismos capaces de degradar los componentes de la formulación e interaccionar con ellos en mayor o menor medida, causando su degradación. Se observa en la Tabla 18 que las formulaciones realizadas a partir de alcohol polivinílico presentan valores variables de biodegradabilidad, 11 %

en su nivel más bajo y 53 % en su nivel más alto, bibliográficamente se indica que esto es causado por las concentraciones en la formulación del producto, se menciona que si se ha utilizado una proporción mayor de almidón y HC respecto al PVA, la degradación se dará en un periodo corto de tiempo, a diferencia de una formulación donde el PVA sea el componente más empleado y resista a la degradación en dependencia del tipo de suelo donde se ubique (**Folino, Pangallo & Calabrò, 2023**).

Por otra parte, las formulaciones en las cuales se empleó glicerina como plastificante no supera el 31 % de degradación en el tiempo evaluado, pese a que esta puede sufrir reacciones de hidrólisis por acción de enzimas capaces de romper los enlaces del polímero debido a sus grupos funcionales OH y a que muchos microorganismos e incluso hongos del medio pueden emplear la glicerina como fuente de carbono, sin embargo, se destaca que los bioplásticos elaborados a partir de glicerina son más susceptibles a degradación que aquellos elaborados a partir de PVA (Anexo T).

3.2 Verificación de hipótesis

En base a los resultados obtenidos se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, indicando que el hidrolizado de colágeno obtenido de residuos de wet blue puede ser utilizado para la elaboración de un bioplástico.

CAPÍTULO 4.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se elaboró un bioplástico a partir de colágeno extraído de wet blue donado por una curtiembre de la ciudad de Ambato, esto es posible siempre y cuando en la formulación se incluya también almidón y un plastificante, todos estos componentes en concentraciones que no excedan el 5% en porcentaje peso/peso y no sean menores al 2% en los mismos parámetros, es importante destacar que el éxito de la agregación de los componentes está mediada por una agitación constante y la aplicación de calor para facilitar la disolución de los elementos.
- Se extrajo colágeno a partir de wet blue y se obtuvo un rendimiento del 35%, por lo que se requiere materia prima en altas cantidades para poder disponer de este componente, sin embargo, la factibilidad de esta formulación se centra en que el wet blue puede ser obtenido de manera gratuita al tratarse de un residuo.
- Se probó diferentes combinaciones y concentraciones de los componentes y se obtuvo un bioplástico con características óptimas mediante la formulación 12 que contiene 3% de glicerina, 5% de almidón y 5% de colágeno hidrolizado, el bioplástico obtenido reúne las facultades necesarias para ser considerado un candidato óptimo para el reemplazo de fundas plásticas o polietileno de baja densidad debido a su resistencia y flexibilidad y su notable capacidad de biodegradabilidad lo que lo hace a su vez sustentable para el medio ambiente.
- Se realizó ensayos mecánicos para determinar la calidad del bioplástico formado, el cual debe cumplir con características de resistencia a la tracción que determina su fuerza, su recuperación elástica que permitió ver su capacidad de flexibilidad y resistencia a la deformación, su permeabilidad al agua para conocer su comportamiento frente a la humedad ambiental, su solubilidad en agua y su biodegradabilidad para identificar si el producto cumple con todos los parámetros establecidos en la norma ecuatoriana, en este sentido el mejor bioplástico contiene las siguientes características: resistencia a la tracción: $32,02 \pm 3,33$, permeabilidad en vapor de agua: $0,0112 \pm 0,00021$ g mm min⁻¹

m-2 kPa-1, solubilidad en agua: $38,68 \pm 4,72$ %, recuperación elástica: $53,61 \pm 0,2$ %, biodegradabilidad: 25,71% a los 4 días y una estimación de degradación de 24 días.

4.2 Recomendaciones

- Añadir reactivos que permitan que los bioplásticos formados no sean tan solubles al agua ya que esto no permite que se mantengan en lugares con mucha humedad.
- Realizar análisis de termorresistencia a los bioplásticos formados ya que los mismo poseen esta característica.
- Realizar experimentos con otros plastificantes como el bórax y las mismas cantidades utilizadas de los componentes para contrastar resultados.

MATERIALES DE REFERENCIA

Referencias Bibliográficas

- Acosta , W. (2023). Optimización de hidrólisis básica para la obtención de gelatina a partir de virutas cromadas provenientes de una curtiembre de la ciudad de Ambato (Bachelor's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ciencia e Ingeniería en Alimentos y Biotecnología. Carrera de Biotecnología).
- Alonso, M., Felix, M., & Romero, A. (2022). Influence of the plasticizer on rice bran-based eco-friendly bioplastics obtained by injection moulding. *Industrial Crops and Products*, 180, 114767.
- Amjadi, M. & Fatemi, A. (2020). Comportamiento a la tracción del polietileno de alta densidad, incluidos los efectos de la técnica de procesamiento, el espesor, la temperatura y la velocidad de deformación. *Polímeros* , 12 (9), 1857.
- Asadi, H., Uhlemann, J., Stranghoener, N. & Ulbricht, M. (2021). Mecanismos de envejecimiento artificial de tejidos de tereftalato de polietileno estructural sin recubrimiento con especial atención a la degradación de la resistencia a la tracción. *Materiales* , 14 (3), 618.
- Asrofi, M., Sapuan, M., Ilyas, A., & Ramesh, M. (2021). Characteristic of composite bioplastics from tapioca starch and sugarcane bagasse fiber: Effect of time duration of ultrasonication (Bath-Type). *Materials Today: Proceedings*, 46, 1626-1630.
- Atkins, P. (2007). *Las moléculas de Atkins*. Ediciones Akal. <https://books.google.com.ec/books?id=wrZ8I0udlSIC>.
- Auras, R., Harte, B., & Selke, S. (2011). "Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications". John Wiley & Sons. Capítulo 7, Plastification of PLA with Biobased Plasticizers.
- Bavya, C., George, L., Srivastava, R., & Vimal, K. (2019). Natural and Synthetic Materials in Regenerative Medicine: Progress Over the Past Five Years:

- Hydrogels: An Insight. *Encyclopedia of Smart Materials*, 113–144.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.11361-X>
- Benson, U., Basse, E., & Palanisami, T. (2021). COVID pollution: impact of COVID-19 pandemic on global plastic waste footprint. *Heliyon*, 7(2).
<https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E06343>.
- Bertuzzi, A., Vidaurre, C., Armada, M., & Gottifredi, J. (2007). Permeabilidad al vapor de agua de películas comestibles a base de almidón. *Revista de ingeniería de alimentos*, 80 (3), 972-978.
- Brough, C., Miller, A., Keen, M., Kucera, A., Lubda, D., & Williams, O. (2016). Use of polyvinyl alcohol as a solubility-enhancing polymer for poorly water soluble drug delivery (part 1). *AAPS PharmSciTech*, 17, 167-179.
- Callister, D., & Rethwisch, G. (2019). *Ciencia e ingeniería de materiales*. Reverte.
<https://books.google.com.ec/books?id=WYfyDwAAQBAJ>
- Cerqueira, A., Souza, W., Teixeira, A., & Vicente, A. (2012). Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films—A comparative study. *Food hydrocolloids*, 27(1), 175-184.
- Chen, J., Zhou, W., Jiao, T., Xu, Z., Wu, D., & Liu, Y. (2012). Physical and chemical crosslinking of poly (vinyl alcohol) hydrogel: a review. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(S2), E51-E58. DOI: 10.1002/app.36485.
- Chojnacka, K., Skrzypczak, D., Mikula, K., Witek, A., Izydorczyk, G., Kuligowski, K., Bandrów, P., & Kułczyński, M. (2021). Progress in sustainable technologies of leather wastes valorization as solutions for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 313, 127902.
- Chowdhury, M., Hossain, N., Noman, I., Hasan, A., Shafiul, A., & Abul, M. (2022). Biodegradable, physical and microbial analysis of tamarind seed starch infused eco-friendly bioplastics by different percentage of Arjuna powder. *Results in Engineering*, 13, 100387.

- Czogala, J., Pankalla, E. y Turczyn, R. (2021). Intentos recientes en el diseño de plastificantes de PVC eficientes con migración reducida. *Materiales*, 14 (4), 844.
- DeltAcque. (2019). Metodología gravimétrica para la determinación del cromo.
- de Melo, V., Assis, D., Costa, M., de Araújo, C., Monte, D., da Costa, S., & Porto, F. (2021). Physical, biochemical, densitometric and spectroscopic techniques for characterization collagen from alternative sources: A review based on the sustainable valorization of aquatic by-products. *Journal of Molecular Structure*, 1224, 129023.
- Donmez, D., Pinho, L., Patel, B., Desam, P., & Campanella, H. (2021). Characterization of starch–water interactions and their effects on two key functional properties: Starch gelatinization and retrogradation. *Current Opinion in Food Science*, 39, 103-109.
- Fan, Q. (2008). Fabric chemical testing. In *Fabric Testing*. Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845695064.125>
- Folino, A., Pangallo, D., & Calabrò, S. (2023). Assessing bioplastics biodegradability by standard and research methods: current trends and open issues. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 109424.
- Font, J., Marsal, A., Aparicio, E., Sánchez, D., & Ribera, A. (2006). Libro de calidad para la producción de piel y cuero libre de cromo (VI). In *55 Congreso de la Asociación Química Española de la Industria del Cuero* (pp. 19-29).
- Gao, D., Cheng, Y., Wang, P., Li, F., Wu, Y., Lyu, B., & Qin, J. (2020). An eco-friendly approach for leather manufacture based on P (POSS-MAA)-aluminum tanning agent combination tannage. *Journal of Cleaner Production*, 257, 120546.
- George, A., Sanjay, R., Srisuk, R., Parameswaranpillai, J., & Siengchin, S. (2020). A comprehensive review on chemical properties and applications of biopolymers and their composites. *International journal of biological macromolecules*, 154, 329-338.

- González, A., Strumia, C., & Igarzabal, A. (2011). Cross-linked soy protein as material for biodegradable films: Synthesis, characterization and biodegradation. *Journal of Food Engineering*, 106(4), 331-338.
- Gu, Y., Zhao, J. & Johnson, J. (2020). Redes poliméricas: desde plásticos y geles hasta estructuras porosas. *Edición internacional de Angewandte Chemie* , 59 (13), 5022-5049. 783-791.
- Hajikhani, M., Emam, Z., & Askari, G. (2021). Fabrication and characterization of mucoadhesive bioplastic patch via coaxial polylactic acid (PLA) based electrospun nanofibers with antimicrobial and wound healing application. *International Journal of Biological Macromolecules*, 172, 143-153.
- HANNA® Instruments Ecuador. (2022). Reactivos de alto rango de cromo VI (100 pruebas). <https://hannainst.ec/productos/reactivos/reactivos-de-alto-rango-decromo-vi-100-pruebas/>
- Haware, V., Tho, I., & Bauer, A. (2010). Evaluación de un método de aproximación rápida para la recuperación elástica de comprimidos. *Tecnología de polvo* , 202 (1-3), 71-77.
- Ibrahim, I., Shahar, S., Sultan, H., Shah, M., Safri, A., & Mat, H. (2021). Overview of bioplastic introduction and its applications in product packaging. *Coatings*, 11(11), 1423.
- INEN. (2012). Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2635:2012. Método de ensayo para las propiedades de tracción de láminas plásticas delgadas.
- Jiménez, J. (2022). Análisis del Marco Normativo de Economía Circular en Ecuador orientado al sector de los plásticos. *FIGEMPA: Investigación y Desarrollo*, 13(1), 38-47.
- Jordán, F. (2011). Obtención de Colágeno por Hidrólisis Alcalina-Enzimática del Residuo de Wet Blue en el Proceso de Curtición. In *Facultad de Ciencias: Vol. Bachelor*. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/1630>

- Júnior, M., da Silva, G., Vieira, P., & Alves, V. (2021). Water vapor sorption and permeability of sustainable alginate/collagen/SiO₂ composite films. *LWT*, 152, 112261.
- Kaur, K., Jindal, R., Maiti, M., & Mahajan, S. (2019). Studies on the properties and biodegradability of PVA/Trapa natans starch (N-st) composite films and PVA/Nst-g-poly (EMA) composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 123, 826–836. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.11.134>.
- Keller, P., & Kouzes, T. (2017). Permeación de vapor de agua en plásticos (No. PNNL-26070). Laboratorio Nacional del Noroeste del Pacífico (PNNL), Richland, WA (Estados Unidos).
- Kim, J., Seo, S., Kim, Y., & Kim, H. (2018). Review of carcinogenicity of hexavalent chrome and proposal of revising approval standards for an occupational cancers in Korea. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 30(1). <https://doi.org/10.1186/s40557-018-0215-2>.
- Kisling, A., Lust, M., & Katwa, C. (2019). What is the role of peptide fragments of collagen I and IV in health and disease?. *Life sciences*, 228, 30-34.
- Kupec, J., Dvorácková, M., Rudlová, S., Ruzicka, J., & Kolomazník, K. (2002). Deproteinization of chrome waste by washing and enzymatic hydrolysis. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 97(9), 349–354. <https://www.researchgate.net/publication/283832773>.
- Lestari, A., Kasmiyatun, M., Dermawan, K., Aini, N., Riyati, N., & Putri, R. (2020). Bioplastic from Jackfruit seeds and rice. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 835, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Lim, R., Kiew, L., Lam, K., Yeoh, M., & Ho, Y. (2021). Corn starch/PVA bioplastics—The properties and biodegradability study using *Chlorella vulgaris* cultivation. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 16(3), e2622.

- López, M., Velasco, A., García, A., Aranda, J., Galicia, A., Guevara, D., & Carreón, E. (2020). Obtaining kinetic parameters of polyamide imide reaction. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 19(2).
- Martinez, S. Y., & Romero, J. A. (2017). Revisión del estado actual de la industria de las curtiembres en sus procesos y productos: un análisis de su competitividad.
- Mendieta, O., Sobral, A., Carvalho, A., & Habitante, Q. (2009). Estudio de las propiedades termomecánicas de películas biodegradables a base de mezclas de gelatina y PVA. *Revista de la Sociedad Química del Perú*, 75(1), 87-93.
- Ministerio del Ambiente. (2013). Estudio de Potenciales Impactos ambientales y vulnerabilidades. <https://www.ambiente.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2013/03/PART2.pdf>
- Moktadir, A., Ahmadi, B., Sultana, R., Zohra, T., Liou, H., & Rezaei, J. (2020). Circular economy practices in the leather industry: A practical step towards sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119737. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119737>
- Mousavi, M., Høgsaa, B., & Fini, H. (2019). Interacciones intermoleculares de nanotubos de halosita biomodificados dentro de poliestireno de alto impacto y polietileno lineal de baja densidad. *Ciencias aplicadas a la superficie*.
- Neorg, & Sa, P. (2023). Colágeno hidrolizado. Recuperado el 28 de agosto de 2023, de Colpropur D Collagen website: <https://www.colpropurdcollagen.com/colageno-hidrolizado/>
- Neves, C., Moyne, M., Eyre, C., & Casey, P. (2020). Acceptability and societal impact of the introduction of bioplastics as novel environmentally friendly packaging materials in Ireland. *Clean Technologies*, 2(1), 9.
- Pahlawan, F., Sutiasmi, S., & Griyanitasari, G. (2019). Hydrolysis of leather shavings waste for protein binder. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 230(1), 012083. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/230/1/012083>

- Piccin, S., Gomes, S., Mella, B., & Gutterres, M. (2016). Color removal from real leather dyeing effluent using tannery waste as an adsorbent. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 4(1), 1061–1067. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2016.01.010>
- Pico, C., De la Vega, J., Tubón, Arancibia, M., & Casado, S. (2022). Caracterización nanoscópica de biopelículas de almidón extraídas de los tubérculos andinos *Ullucus tuberosus*, *Tropaeolum tuberosum*, *Oxalis tuberosa*, y *Solanum tuberosum*. *Polímeros* 14, 4116. <https://doi.org/10.3390/>
- Pinto, L., Alvarado, E., Burgos, E., Balaguera, E., & Ramirez, I. (2019). Characterization of three *Arracacia xanthorrhiza*
- Pinzón, I., Sánchez, T., & Villa, C. (2020). Caracterización química, estructural y térmica de almidones de cuatro raíces amarillas de arracacha (*Arracacia xanthorrhiza*) producidas en Colombia. *Heliyon*, 6 (8).
- Pistori, H., Paraguassu, A., Martins, S., Conti, P., Pereira, A., & Jacinto, A. (2018). Defect detection in raw hide and wet blue leather. In *Computational Modelling of Objects Represented in Images. Fundamentals, Methods and Applications* (pp. 355-360). CRC Press.
- Pu, J., Cai, B., Li, H. y Yong, Z. (2014). Propiedades del poli(alcohol vinílico) plastificado por glicerina. *J. Para. Pinchar. Ind*, 3, 151-153.
- Putri, W., Haryati, S., Waristian, H., Saputra, A., & Kurniawan, R. (2022). Manufacture of Bioplastic Composite Method of Blending Synthetic Polymer (PP) with Natural Polymers from Kapok Fiber (*Ceiba Pentandra*). *Chemical Engineering Transactions*, 97, 241-246.
- Qiang, H., & Feng, H. (2011). Collagen extracted from chrome shavings using alkali and Enzyme. 2011 International Conference on Remote Sensing, Environment and Transportation Engineering, RSETE 2011 - Proceedings, 5810–5813. <https://doi.org/10.1109/RSETE.2011.5965675>
- Sabbah, M., & Porta, R. (2017). Plastic pollution and the challenge of bioplastics. *J. Appl. Biotechnol. Bioeng*, 2(3), 00033.

- Sahu, B., Jayakumar, C., & Alla, P. (2022). Recent trends in oil tanning and its applications-A way forward towards cleaner approach in chamois leather making. *Journal of Cleaner Production*, 356, 131755.
- Salman, Sabah, Bakr, Nabeel & Humad, (2018). Section C: Physical Sciences DSC and TGA Properties of PVA Films Filled with Na₂S₂O₃·5H₂O Salt. *Journal of Chemical, Biological and Physical Sciences*. 8. 10.24214/jcbps.C.8.2.00111.
- Salud, Nutrición Y Deporte. (2017). Salud, Nutrición Y Deporte. Recuperado el 28 de agosto de 2023, sitio web de: <https://dieteticaynutricionweb.wordpress.com/2017/03/>
- Sathish, M., Madhan, B., Sreeram, J., Raghava, J., & Nair, U. (2016). Alternative carrier medium for sustainable leather manufacturing – a review and perspective. *Journal of Cleaner Production*, 112, 49–58. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2015.06.118>
- Schneider, A., Flores, H., Gunst, E., & Rodi, E. (2008). Aglomerado de virutas de cuero propiedades térmicas y mecánicas. *Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias 50 Ambientales. Investigación, Desarrollo y Práctica*. <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/14451>
- Scopel, B., Lamers, D., Matos, E., Baldasso, C., & Dettmer, A. (2016). Collagen hydrolysate extraction from chromed leather waste for polymeric film production. *Journal of the American Leather Chemists Association*, 111(1), 30– 40. <https://journals.uc.edu/index.php/JALCA/article/view/3641>
- Shah, A, Hasan, F., Hameed, A. & Ahmed, S. (2008). Degradación biológica de los plásticos: una revisión exhaustiva. *Avances en biotecnología* , 26 (3), 246-265.
- Shoulders, D., & Raines, T. (2009). Collagen structure and stability. *Annual review of biochemistry*, 78, 929-958.
- Silva, J., & Salinas, D. (2022). La contaminación proveniente de la industria curtiembre, una aproximación a la realidad ecuatoriana. *Revista Científica UISRAEL*, 9(1), 69–80. <https://doi.org/10.35290/rcui.v9n1.2022.427>

- Silva, S., García, S., Cooper, I., Franz, R., & Losada, P. (2006). Compilation of analytical methods and guidelines for the determination of selected model migrants from plastic packaging. *Trends in Food Science & Technology*, 17(10), 535-546.
- Singh, R., Kumar, N., Mehrotra, T., Bisaria, K., & Sinha, S. (2021). Environmental hazards and biodegradation of plastic waste: challenges and future prospects. In *Bioremediation for Environmental Sustainability: Toxicity, Mechanisms of Contaminants Degradation, Detoxification and Challenges* (pp. 193–214). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820524-2.00009-2>
- Sobral, C., Menegalli, D., Hubinger, A., & Roques, R. (2001) Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films, *Food Hydrocolloids*, Volume 15, Issues 4–6, Pages 423-432
- Sudheesh, C., Sunooj, V., Jamsheer, V., Sabu, S., Sasidharan, A., Aaliya, B., & George, J. (2021). Desarrollo de películas bioplásticas a partir de almidón de Kithul (*Caryota urens*) irradiado con γ -; Caracterización morfológica, cristalina, de barrera y mecánica. *Starch-Stärke*, 73 (5-6), 2000135.
- Sun, M., Wang, Y., Yao, L., Li, Y., Weng, Y., & Qiu, D. (2022). Fabrication and Characterization of Gelatin/Polyvinyl Alcohol Composite Scaffold. *Polymers*, 14(7). <https://doi.org/10.3390/polym14071400>
- Tiseo, I. (2022). Plastic production worldwide 2020 Statista. <https://www.statista.com/statistics/282732/global-production-of-plastics-since1950/#statisticContainer>
- Valdez, M., González, L., Pariguana, M., Dueñas, A. (2019). Determinación De Proteínas Para La Obtención De Un Material Adhesivo a Diferentes Tiempos Y Temperaturas, A Partir De La Viruta De Wet Blue Del Proceso Del Curtido De Pieles Mediante Hidrolisis Alcalina. *VUCSM*, 2(20), 71. <https://doi.org/10.35286/veritas.v20i2.246>
- Vallejo, S., Almonacid, Y., Agudelo, N., Hernández, A., & Ortiz, L. (2019). Evaluación de la hidrólisis alcalina-enzimática para la obtención de colágeno

- hidrolizado a partir virutas de cuero curtido. *Revista ION*, 32(1), 55–62.
<https://doi.org/10.18273/REVISION.V32N1-2019005>
- Vargas, Y., Pazmiño, J., & Dávila, J. (2021). Potencial de Biomasa en América del Sur para la Producción de Bioplásticos. Una Revisión. *Revista Politécnica*, 48(2), 7-20.
- Viegas, R. (2016). Aglomeração de colágeno hidrolizado em leite fluidizado com água e polpa de amora [UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS].
<http://orcid.org/http://orcid.org/00>
- Vieira, A., da Silva, A., dos Santos, O., & Beppu, M. (2011). Naturalbased plasticizers and biopolymer films: A review. *European Polymer Journal*, 47(3), 254–263.
<https://doi.org/10.1016/J.EURPOLYMJ.2010.12.011>
- Weinstein, E., Crocker, K., & Gray, D. (2016). De macroplástico a microplástico: Degradación de polietileno, polipropileno y poliestireno de alta densidad en un hábitat de marismas. *Toxicología y química ambiental*, 35 (7), 1632-1640.
- Wypych, G. (2015). Principal of Thermal Degradation. In *PVC Degradation and Stabilization*. ChemTec Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-1-895198-85-0.50006-6>
- Yu, W., Li, H., Zou, W., Tao, K., Zhu, J., & Gilbert, G. (2019). Using starch molecular fine structure to understand biosynthesis-structure-property relations. *Trends in Food Science & Technology*, 86, 530-536.

Anexos

Anexo A

Ecuación de modelo ajustado

Ecuación de modelo ajustado

Alcohol polivinílico

$$\text{Resistencia} = 352,9 - 145,7 A - 205,4 B - 199,8 C + 122,6 A*B + 135,0 A*C + 162,7 B*C - 111,9 A*B*C$$

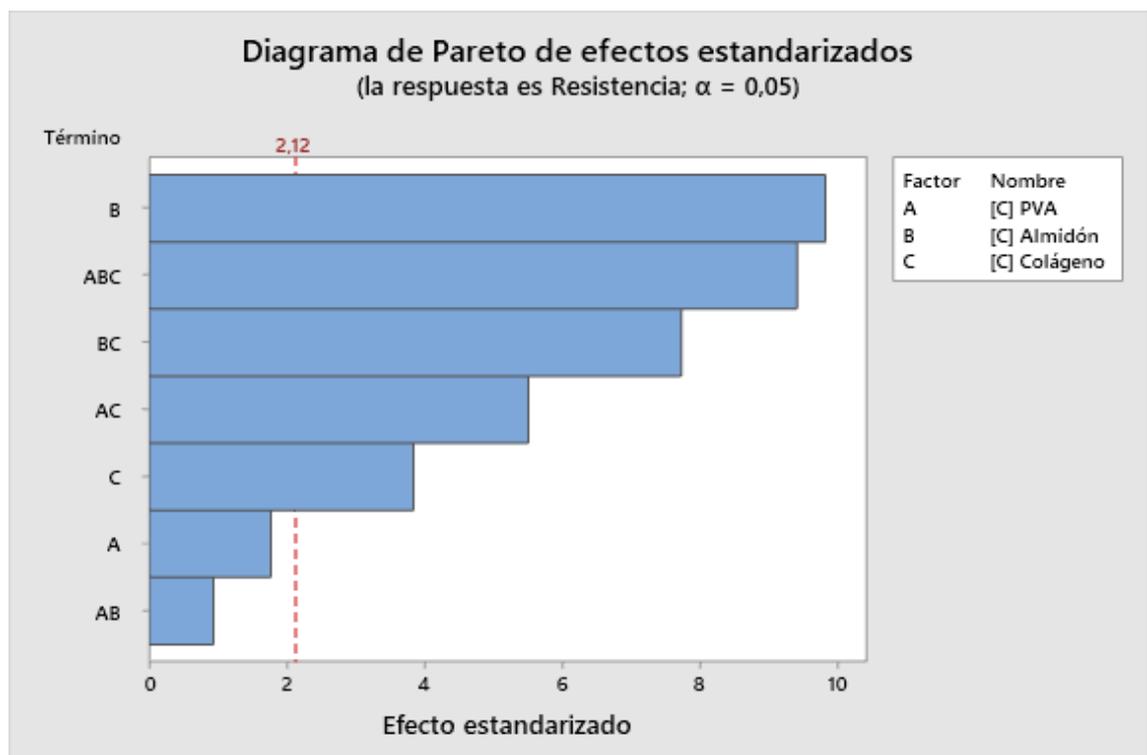
Glicerina

$$\text{Resistencia} = 8,6 - 2,75 A - 2,42 B - 13,18 C + 0,934 A*B + 3,097 A*C + 5,795 B*C - 1,276 A*B*C$$

Nota. A= [C] PVA / [C] Glicerina B= [C] Almidón C= [C] HC

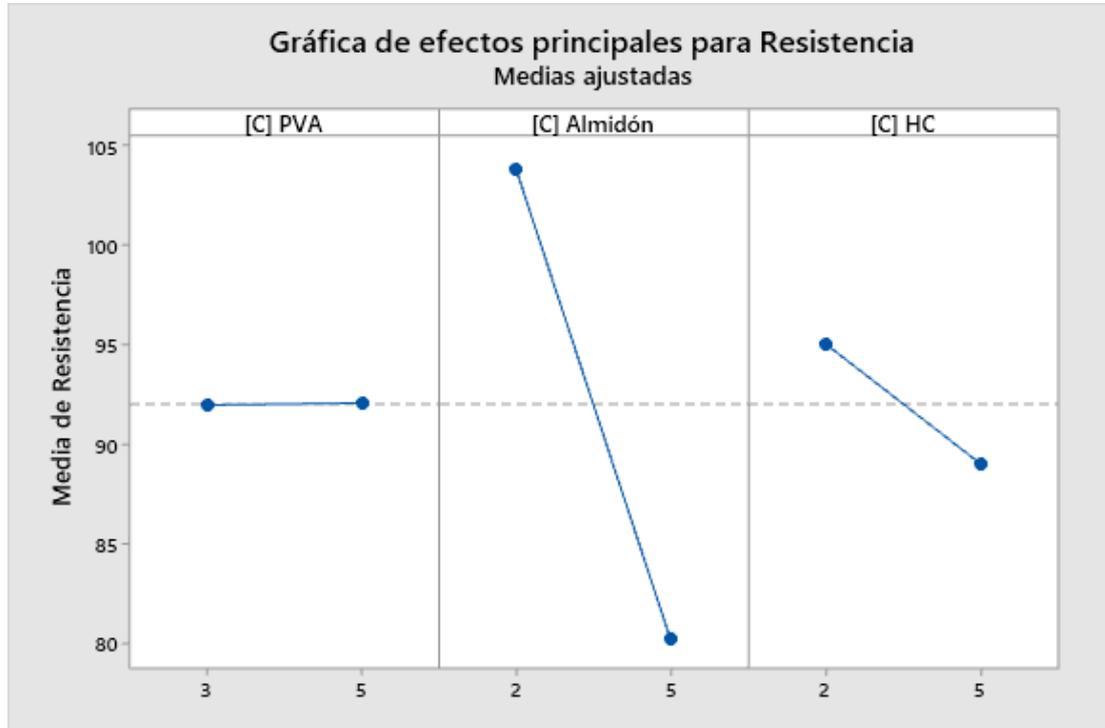
Anexo B

Diagrama de Pareto de efectos estandarizados PVA



Anexo C

Gráfica de efectos principales PVA



Anexo D

Test de Tukey con plastificante PVA

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=19,93392

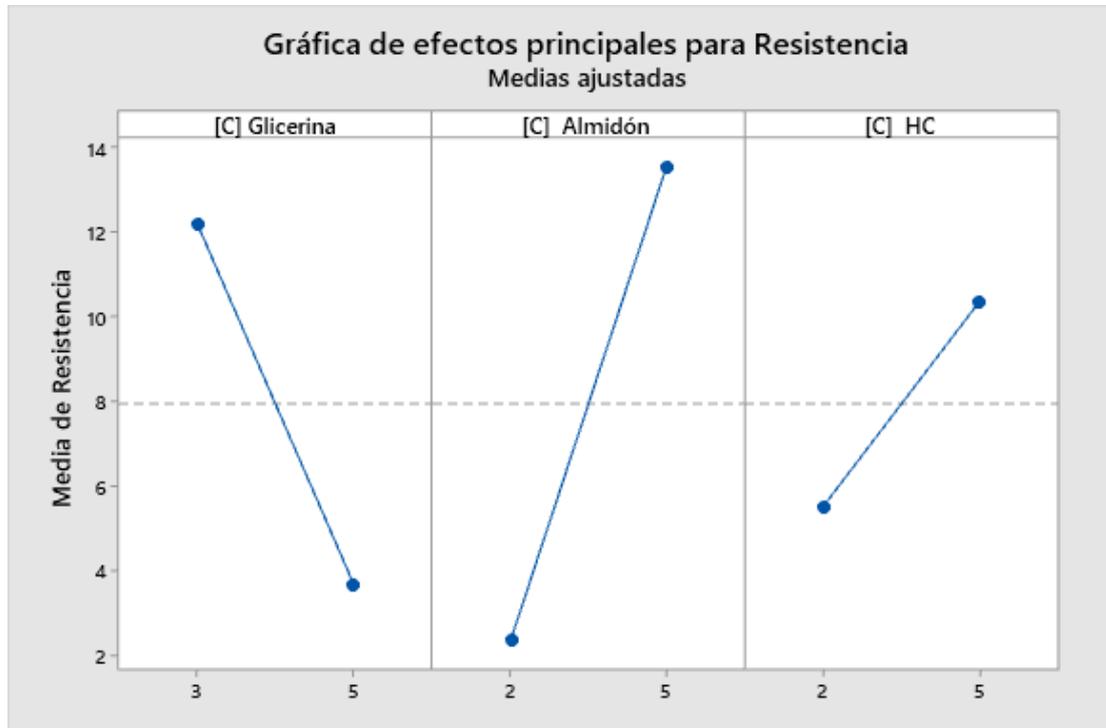
Error: 49,7262 gl: 16

C	Plastificante	Almidón	Colágeno	Medias	n	E.E.	
2	2	2	37,10	3	4,07	A	
1	2	1	78,44	3	4,07	B	
1	2	2	89,13	3	4,07	B	
2	1	1	96,45	3	4,07	B	C
1	1	2	110,38	3	4,07		C D
1	1	1	110,41	3	4,07		C D
2	2	1	115,29	3	4,07		C D
2	1	2	119,46	3	4,07		D

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo E

Gráfica de efectos principales para resistencia con glicerina



Anexo F

Test de Tukey con plastificante glicerina

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=5,98969

Error: 4,4896 gl: 16

Colágeno	Almidón	C	Plastificante	Medias	n	E.E.	
1	1	1		1,25	3	1,22	A
2	1	1		1,37	3	1,22	A
1	1	2		1,68	3	1,22	A
2	2	2		3,03	3	1,22	A
1	2	2		4,92	3	1,22	A
2	1	2		5,06	3	1,22	A
1	2	1		14,20	3	1,22	B
2	2	1		32,02	3	1,22	C

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Anexo G

Espesor en formulaciones de bioplásticos

Plastificante	Concentraciones (%)	Espesor (mm)
Alcohol polivinílico	3	3
	5	4
Glicerina	3	1
	5	3

Anexo H

Datos obtenidos en el ensayo de resistencia a la tracción utilizando alcohol polivinílico (PVA)

[C] Alcohol Polivinílico				
	3%		5%	
	[C] Almidón			
[C] Colágeno	2%	5%	2%	5%
2%	111,4	76,56	90,74	101,56
	118,38	88,5	102,06	122,32
5%	101,46	72,61	96,54	122
	102,06	91,65	117,15	42,68
	117,21	88,5	120,73	37,75
	111,88	87,23	120,5	30,86

Nota. Valores de resistencia analizados por el texturómetro CT3 con réplicas.

Anexo I

Datos obtenidos en el ensayo de resistencia a la tracción utilizando glicerina

[C] Glicerina				
	3%		5%	
	[C] Almidón			
[C] Colágeno	2%	5%	2%	5%
2%	1,32	18,1	1,76	3,1
	1,24	10,9	1,71	7,8

	1,2	13,6	1,56	3,85
	1,4	35,65	4,01	2,15
5%	1,38	29,1	3,65	3,38
	1,34	31,3	7,53	3,56

Nota. Valores de resistencia analizados por el texturómetro CT3 con réplicas.

Anexo J

Valores obtenidos en el ensayo de solubilidad en agua

Bioplástico	Peso inicial	Peso final	Medias	%solubilidad	Peso cajas	Cajas + muestra
	0,0687	0,0536		21,9796	5,9442	5,9978
F8	0,0748	0,0533	0,0534	28,7433	6,4425	6,4958
	0,0718	0,0534		25,5052	6,19335	6,2468
	0,0242	0,0037		84,7107	5,8668	5,8705
F5	0,0245	0,0069	0,0053	71,8367	6,6167	6,6236
	0,02435	0,0053		78,2341	6,24175	6,24705
	0,0426	0,0066		84,5070	5,9446	5,9512
F7	0,0526	0,0277	0,0172	47,3384	6,444	6,4717
	0,0476	0,0172		63,9706	6,1943	6,21145
	0,028	0,0034		87,8571	5,8695	5,8729
F6	0,0301	0,0074	0,0054	75,4153	6,6186	6,626
	0,02905	0,0054		81,4114	6,24405	6,24945
	0,0468	0,0295		36,9658	5,945	5,9745
F11	0,0586	0,0392	0,0343	33,1058	6,4446	6,4838
	0,0527	0,0343		34,8197	6,1948	6,22915
	0,0875	0,0530		39,4286	6,2755	6,3285
F12	0,0895	0,0510	0,0543	42,9849	5,9735	6,0245
	0,0889	0,0590		33,6333	6,0734	6,1324

Nota. Resultados del ensayo de solubilidad con réplicas

Anexo K

Resultados de permeabilidad al vapor de agua de la muestra F12

	Tiempo	Horas	Minutos	peso (g)	Ganancia (g)	WVP
	8:36:00	0	0	131,1749	0	0,01095569
	9:36:00	1	60	131,2005	0,0256	
R1	10:40:00	2	120	131,2153	0,0404	
	11:50:00	3	180	131,229	0,0541	
	12:55:00	4	240	131,2509	0,076	
	14:00:00	5	300	131,2615	0,0866	

	15:00:00	6	360	131,2731	0,0982
	16:03:00	7	420	131,2875	0,1126
	17:04:00	8	480	131,3007	0,1258
	18:10:00	9	540	131,3133	0,1384
	8:36:00	0	0	131,8245	0 0,01150685
	9:36:00	1	60	131,8488	0,0243
	10:40:00	2	120	131,8499	0,0254
	11:50:00	3	180	131,8782	0,0537
R2	12:55:00	4	240	131,9012	0,0767
	14:00:00	5	300	131,9135	0,089
	15:00:00	6	360	131,9233	0,0988
	16:03:00	7	420	131,9377	0,1132
	17:04:00	8	480	131,9512	0,1267
	18:10:00	9	540	131,9657	0,1412
	8:36:00	0	0	131,4997	0 0,01123127
	9:36:00	1	60	131,52465	0,02495
	10:40:00	2	120	131,5326	0,0329
	11:50:00	3	180	131,5536	0,0539
R3	12:55:00	4	240	131,57605	0,07635
	14:00:00	5	300	131,5875	0,0878
	15:00:00	6	360	131,5982	0,0985
	16:03:00	7	420	131,6126	0,1129
	17:04:00	8	480	131,62595	0,12625
	18:10:00	9	540	131,6395	0,1398

Nota. Ejemplo de obtención de datos de permeabilidad al vapor utilizando la formulación F12 con réplicas.

Anexo L

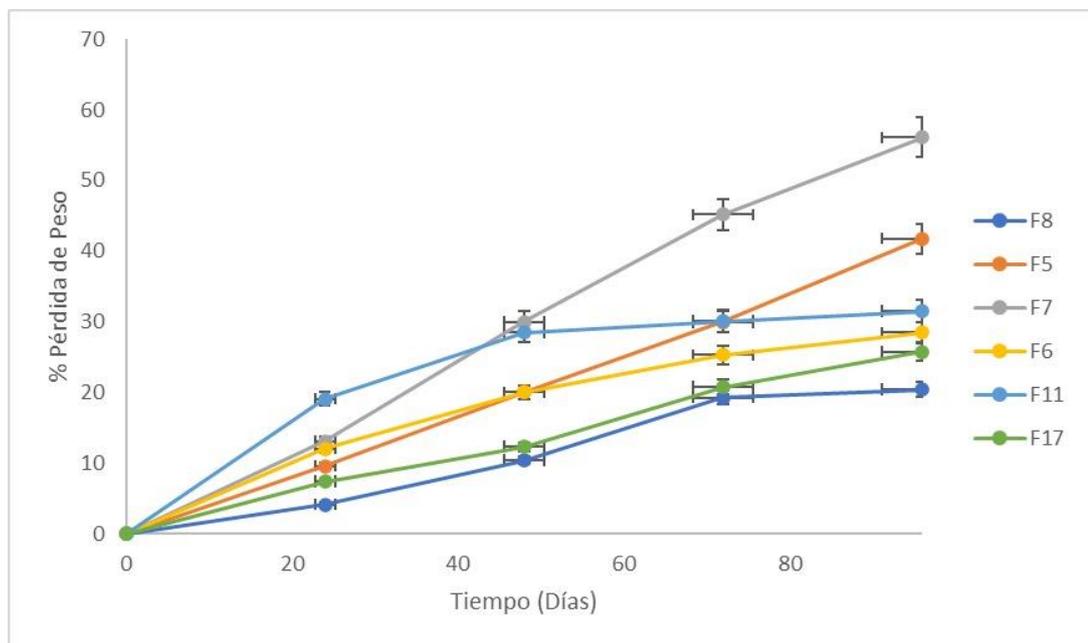
Valores obtenidos en el ensayo de biodegradabilidad

Bioplástico	Tiempo (h)				
	0	24	48	72	96
F8	0,1309	0,1236	0,112	0,0945	0,0943
	0,1147	0,1093	0,0982	0,0834	0,0797
	0,1228	0,1203	0,1199	0,1195	0,1192
F5	0,1665	0,1458	0,1267	0,1134	0,0963
	0,1702	0,1569	0,1356	0,1211	0,0996
	0,1637	0,1498	0,1378	0,116	0,0954
F7	0,227	0,1987	0,1643	0,1239	0,0984
	0,2208	0,1878	0,1523	0,1213	0,0993
	0,2193	0,1865	0,1504	0,1207	0,0953
F6	0,3275	0,2873	0,2652	0,2576	0,2479
	0,3305	0,2947	0,2783	0,2435	0,22932

	0,3296	0,2865	0,2535	0,2367	0,22897
F11	0,2368	0,1934	0,1723	0,1698	0,1678
	0,2917	0,2346	0,1987	0,1934	0,1896
	0,2465	0,1993	0,1834	0,1785	0,1735
F12	0,2147	0,1987	0,182	0,1698	0,1573
	0,2093	0,1902	0,1809	0,1623	0,1532
	0,194	0,1834	0,1789	0,1576	0,1486

Anexo M

Degradación del bioplástico mediante el método de entierro



Nota. Todas las muestras poseían un peso entre 100 y 300 mg y se utilizó tierra comercial.

Anexo N

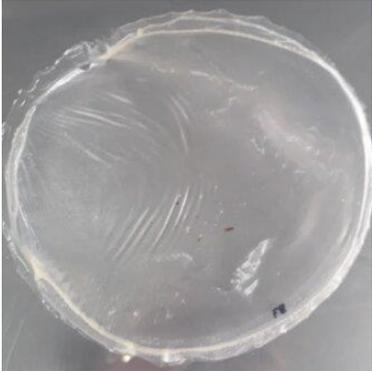
Parámetros para la obtención del Módulo de young

Muestras	Distancia (mm)	Carga (N)	Distancia	Carga	Esfuerzo	Deformación
F8	0,22	34,15				
	0,35	30,20	0,285	29,68	0,030	0,0057
	0,28	24,68				
F5	1,03	61,23				
	0,75	70,32	0,89	66,22	0,066	0,0178

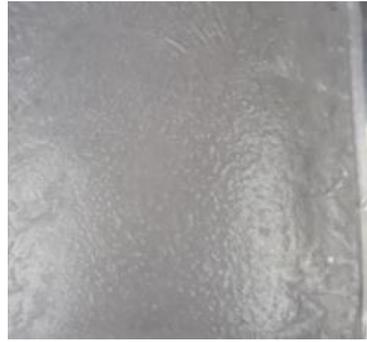
F7	0,89	67,12				
	0,13	54,99				
	0,23	53,1	0,18	53,48	0,053	0,0036
F6	0,18	52,33				
	0,40	93,72				
	0,65	96,58	0,53666667	95,57	0,096	0,010733333
F11	0,56	96,40				
	55,36	3,62				
	56,10	2,18	55,53	2,84	0,003	1,1106
F12	55,13	2,72				
	0,71	7,13				
	0,83	5,82	0,82	6,40	0,006	0,0164
	0,92	6,24				

Anexo O

Bioplásticos elaborados con PVA y Glicerina

Bioplástico	Imagen
F8	
F5	

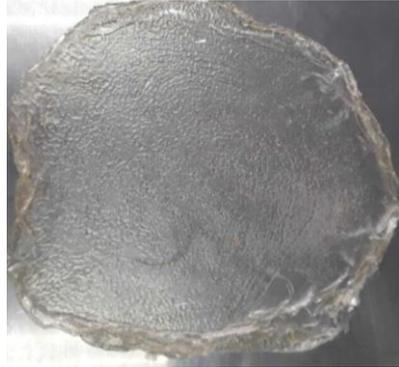
F7



F6



F11



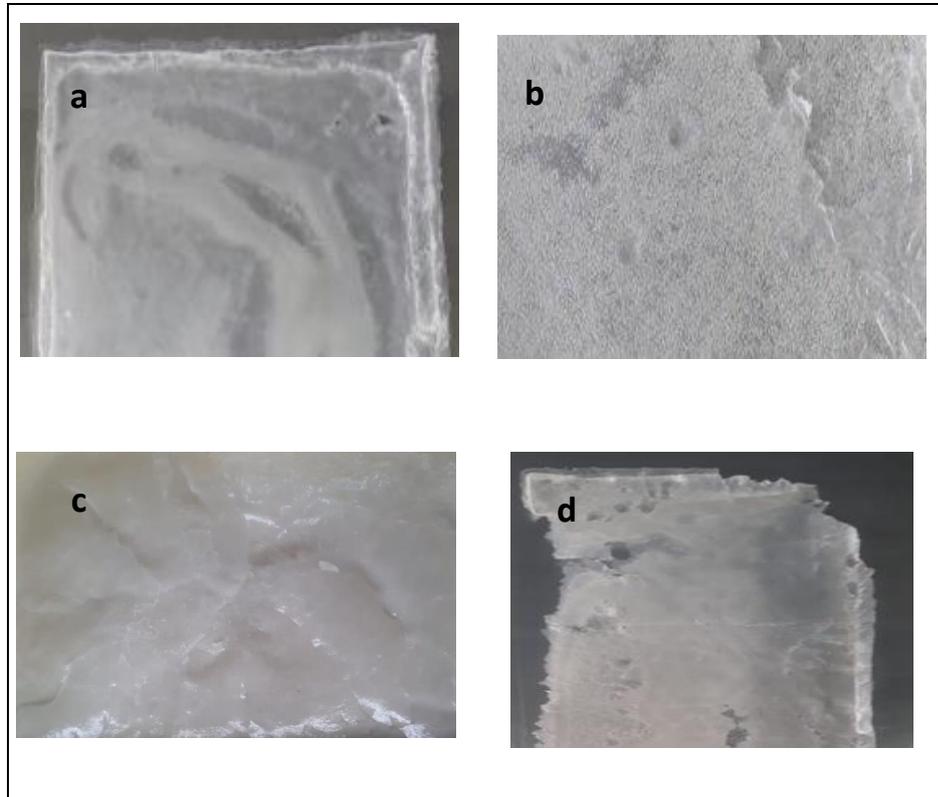
F12



Nota. Bioplásticos elaborados con formulaciones que poseen diferencia significativa.

Anexo P

Errores en formulaciones



Nota. La figura a muestra una incorrecta homogenización de los componentes; b se puede observar formación de burbujas; c presenta textura quebradiza; d se crea doble capa.

Anexo Q

Ensayo de permeabilidad al vapor



Anexo R

Ensayo de resistencia a la tracción



Nota. Se empleó el texturómetro Brookfield CT3

Anexo S

Ensayo de solubilidad en agua



Anexo T

Ensayo de biodegradabilidad



Nota. Ensayo de biodegradabilidad en tierra después de 1 día transcurrido.

Anexo U

Tierra comercial empleada en el ensayo de biodegradabilidad



Nota. Tierra comercial Nature

Anexo V

Licencia del software estadístico

Resumen de la suscripción

Nombre de empresa OnTheHub	Dirección de la aplicación web https://app.minitab.com	Último acceso 8/2/2023
Fecha de renovación 25/1/2024	Cuota de usuarios 1	Contacto de facturación Nelly Esther Flores Tapia
ID de suscripción 08602c626e254fc1a6864507ee99555f	Modelo de la licencia Usuario especificado	

Minitab® Statistical Software Aplicación de escritorio

Minitab® Statistical Software 21.3.1.0	Preferencias de implementación Automático Ver preferencias
--	--

Administrar usuarios

		Opciones avanzadas
<input type="checkbox"/>	ne.flores@uta.edu.ec	Nelly Esther Flores Tapia

Nota. Licencia del programa Minitab