



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A PARTIR DE ALMIDÓN OXIDADO DE
BANANO VARIEDAD *CAVENDISH* Y CELULOSA MICROCRISTALINA
COMO ALTERNATIVA A FILMS FLEXIBLES

ARMIJOS FLORES BRYAN ENRIQUE
INGENIERO QUÍMICO

RAMIREZ TUAREZ JACINTO ALEXANDER
INGENIERO QUÍMICO

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A PARTIR DE ALMIDÓN
OXIDADO DE BANANO VARIEDAD *CAVENDISH* Y CELULOSA
MICROCRISTALINA COMO ALTERNATIVA A FILMS FLEXIBLES

ARMIJOS FLORES BRYAN ENRIQUE
INGENIERO QUÍMICO

RAMIREZ TUAREZ JACINTO ALEXANDER
INGENIERO QUÍMICO

MACHALA
2022



UTMACH

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y DE LA SALUD

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRABAJO TITULACIÓN
TRABAJO EXPERIMENTAL

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A PARTIR DE ALMIDÓN OXIDADO DE BANANO
VARIEDAD *CA VENDISH* Y CELULOSA MICROCRISTALINA COMO
ALTERNATIVA A FILMS FLEXIBLES

ARMIJOS FLORES BRYAN ENRIQUE
INGENIERO QUÍMICO

RAMIREZ TUAREZ JACINTO ALEXANDER
INGENIERO QUÍMICO

YANEZ ROMERO MARIA ELENA

MACHALA, 22 DE SEPTIEMBRE DE 2022

MACHALA
2022

ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A PARTIR DE ALMIDÓN OXIDADO DE BANANO VARIEDAD CAVENDISH Y CELULOSA MICROCRISTALINA COMO ALTERNATIVA A FILMS FLEXIBLES

INFORME DE ORIGINALIDAD

4%

INDICE DE SIMILITUD

3%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

1%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

ENCONTRAR COINCIDENCIAS CON TODAS LAS FUENTES (SOLO SE IMPRIMIRÁ LA FUENTE SELECCIONADA)

< 1%

★ Submitted to Universidad del Valle

Trabajo del estudiante

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias

Apagado

Excluir bibliografía

Activo

CLÁUSULA DE CESIÓN DE DERECHO DE PUBLICACIÓN EN EL REPOSITORIO DIGITAL INSTITUCIONAL

Los que suscriben, ARMIJOS FLORES BRYAN ENRIQUE y RAMIREZ TUAREZ JACINTO ALEXANDER, en calidad de autores del siguiente trabajo escrito titulado ELABORACIÓN DE PELÍCULAS A PARTIR DE ALMIDÓN OXIDADO DE BANANO VARIEDAD <i>CAVENDISH</i> Y CELULOSA MICROCRISTALINA COMO ALTERNATIVA A FILMS FLEXIBLES, otorgan a la Universidad Técnica de Machala, de forma gratuita y no exclusiva, los derechos de reproducción, distribución y comunicación pública de la obra, que constituye un trabajo de autoría propia, sobre la cual tienen potestad para otorgar los derechos contenidos en esta licencia.

Los autores declaran que el contenido que se publicará es de carácter académico y se enmarca en las disposiciones definidas por la Universidad Técnica de Machala.

Se autoriza a transformar la obra, únicamente cuando sea necesario, y a realizar las adaptaciones pertinentes para permitir su preservación, distribución y publicación en el Repositorio Digital Institucional de la Universidad Técnica de Machala.

Los autores como garantes de la autoría de la obra y en relación a la misma, declaran que la universidad se encuentra libre de todo tipo de responsabilidad sobre el contenido de la obra y que asumen la responsabilidad frente a cualquier reclamo o demanda por parte de terceros de manera exclusiva.

Aceptando esta licencia, se cede a la Universidad Técnica de Machala el derecho exclusivo de archivar, reproducir, convertir, comunicar y/o distribuir la obra mundialmente en formato electrónico y digital a través de su Repositorio Digital Institucional, siempre y cuando no se lo haga para obtener beneficio económico.

Machala, 22 de septiembre de 2022


ARMIJOS FLORES BRYAN ENRIQUE
0704559236


RAMIREZ TUAREZ JACINTO ALEXANDER
0941364416

DEDICATORIA

Dedico con todo el corazón este trabajo a mis padres y hermanos, quienes me dieron educación, apoyo incondicional y muchos consejos, sin ustedes no lo hubiese logrado, a todos mis compañeros de estudio por las gratas experiencias vividas, y en especial a todos mis maestros quienes nunca desistieron en su labor de enseñar.

Jacinto Alexander Ramírez Tuarez

El presente trabajo es dedicado a mis padres, hermanos y amigos que por medio de su apoyo y motivación permitieron que logre la culminación de mis estudios de tercer nivel, así también a los docentes que en el camino me supieron guiar, nutrir de conocimiento y experiencia para la vida laboral y personal.

Bryan Enrique Armijos Flores

AGRADECIMIENTO

A Dios por el milagro de la vida, habernos dado salud, sabiduría y fortaleza.

A nuestros padres y hermanos por inculcar los valores del respeto, perseverancia, honestidad y dedicación desde casa; así también, a nuestras amistades por su apoyo incondicional durante todos estos años.

A la Ing. María Elena Yáñez Romero por su dedicación y acompañamiento durante nuestra formación académica y en especial en nuestro proceso de titulación, por ser nuestra querida y apreciada tutora.

Al Ing. Luis Alberto Cedeño Sares por ser quien lideró la presente investigación y brindó sus conocimientos para el desarrollo de la misma.

Al Ing. Byron Gonzalo Lapo Calderón por compartir sus conocimientos y material didáctico que sirvió de apoyo para la elaboración del trabajo de titulación.

Un agradecimiento especial a los técnicos de laboratorio Dra. Grace Jaramillo y Bqf: Jefferson Tocto; y a los conserjes de la facultad por su consideración, amistad y compromiso al desarrollo de nuestras actividades realizadas en todo el proceso de titulación.

De manera general, agradecer a todos nuestros docentes quienes supieron brindar sus conocimientos en las asignaturas impartidas durante toda la formación académica, y a nuestros compañeros por ser parte del proceso de aprendizaje.

Bryan Enrique Armijos Flores

Jacinto Alexander Ramírez Tuarez

RESUMEN

El Oro es la tercera provincia del Ecuador con mayor producción de banano para exportación. En el proceso de selección de la fruta, queda cierta cantidad de banano que no cumple con las normas requeridas para exportación, que se utiliza, en parte, para el consumo local y nacional.

La pulpa de banano, variedad *Cavendish*, posee un almidón que a nivel molecular está constituido por dos componentes: la amilosa, un polímero lineal que representa entre el 20% al 30%; y, la amilopectina, una molécula ramificada más grande, que se encuentra entre el 70% al 80%. Este almidón nativo, a pesar de ser un polímero potencial, posee propiedades químicas poco satisfactorias para la formulación de películas.

La finalidad del presente trabajo experimental, se orienta a la elaboración de películas a base de almidón oxidado de banano variedad *Cavendish*, reforzadas con celulosa microcristalina (MCC). El método por vía húmeda se utiliza para la extracción del almidón de la pulpa de banano, con una disolución de metabisulfito de sodio ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$) al 0.5% p/v, que evita el pardeamiento enzimático y a su vez garantiza un almidón con menor impureza. El rendimiento de extracción es del 2.3%. \pm 0.21.

Para la modificación química del almidón nativo se usa como agente oxidante el hipoclorito de sodio (NaClO), a concentraciones de 0.5% y 1.5% v/v (cloro activo de 0.8% y 1.7%, respectivamente); durante la reacción, se controla el valor de pH y se mantiene constante temperatura, agitación y tiempo de reacción.

Los niveles de cloro activo generan un aumento significativo en los grupos carbonilo y carboxilo ($p < 0.05$). Con respecto al análisis proximal, a medida que aumenta la concentración de cloro activo, se produce un incremento en los valores de contenido de humedad y proteína; sin embargo, los contenidos de fibra, ceniza y carbohidrato disminuyen. Por otra parte, el valor de pH se incrementa a una concentración de 0.7% de cloro activo y disminuye con la concentración de 1.8% de cloro activo.

En las propiedades funcionales, los niveles de concentración de cloro activo influyen de manera significativa ($p < 0.05$), provocando una disminución en los valores del índice de absorción en agua y poder de hinchamiento; en tanto que, los valores del índice de solubilidad en agua aumentan.

El método Film Casting se usa para elaborar las películas, y son formuladas mediante un diseño experimental de tipo factorial k^n de 2^2 , con dos niveles de glicerol (1.5% y 2.5% p/v) y MCC (0.05% y 0.1% p/v); mientras que, el resto de los componentes se mantiene constante en todos los tratamientos (almidón y agua); y, las variables de respuesta establecidas son: permeabilidad de vapor de agua (PVA), humedad y solubilidad de las películas.

El glicerol y la MCC afectan significativamente ($p < 0.05$) a las variables de respuesta; en consecuencia, a mayor porcentaje de glicerol, las películas experimentan un incremento de humedad, solubilidad y PVA; no obstante, a mayor porcentaje de MCC se produce un efecto contrario en las variables de respuesta.

Para la elaboración de la película, los valores óptimos obtenidos de glicerol y MCC se encuentran al 1.5% p/v y 0.1% p/v, respectivamente; a dichos porcentajes se minimizan las propiedades físicas (humedad y solubilidad) y de barrera (PVA). Estos valores son determinados mediante los coeficientes de regresión: porcentaje de humedad, con R^2 de 99.2551% y R^2 ajustada de 98.2618%; porcentaje de solubilidad, con R^2 de 98.363% y R^2 ajustada de 96.1803%; y, PVA, con R^2 de 99.2789% y R^2 ajustada de 98.3174%.

Palabras claves: Almidón, cloro activo, oxidación, celulosa microcristalina, glicerol.

ABSTRACT

El Oro is the third largest banana exporting province in Ecuador. In the fruit selection process, there is a certain amount of banana that does not meet the required standards for export, which is used, in part, for local and national consumption.

Banana pulp *Cavendish* variety has a starch that at the molecular level is made up of two components: amylose, a linear polymer that represents between 20% to 30%; and amylopectin, a larger branched molecule, which is found between 70% to 80%. This native starch, although a potential polymer, has unsatisfactory chemical properties for film formulation.

The purpose of the present experimental work is oriented to the elaboration of films based on oxidized banana starch *Cavendish* variety, reinforced with microcrystalline cellulose (MCC). The wet method is used for the extraction of starch from banana pulp, with a 0.5% w/v solution of sodium metabisulfite ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$), which avoids enzymatic browning and improve a starch with less impurity. The extraction yield is $2.3\% \pm 0.21$.

For the chemical modification of native starch, sodium hypochlorite (NaClO) is used as oxidizing agent, at concentrations of 0.5% and 1.5% v/v (active chlorine of 0.8% and 1.7%, respectively); during the reaction, the pH value is controlled and the temperature, agitation and reaction time are kept constant.

Active chlorine levels generate a significant increase in carbonyl and carboxyl groups ($p < 0.05$). With respect to proximate analysis, as the concentration of active chlorine increases, there is an increase in moisture and protein content values; however, fiber, ash and carbohydrate contents decrease. On the other hand, the pH value increases at a concentration of 0.7% active chlorine and decreases at a concentration of 1.8% active chlorine.

In the functional properties, the levels of active chlorine concentration have a significant influence ($p < 0.05$), causing a decrease in the values of the water absorption index and swelling power, while the values of the water solubility index increase ($p < 0.05$), causing a decrease in the values of the water absorption index and swelling power.

The Film Casting method is used to elaborate the films, and they are formulated using a kn factorial experimental design, with two levels of glycerol (1.5% and 2.5% w/v) and MCC (0.05% and 0.1% w/v); while, the rest of the components are kept constant in all

treatments (starch and water); and, the response variables established are: water vapor permeability (WVP), humidity and solubility of the films.

Glycerol and MCC significantly ($p < 0.05$) affect the response variables; consequently, the higher the percentage of glycerol, the films experience an increase in moisture, solubility and WVP; however, the higher the percentage of MCC, the opposite effect on the response variables.

For the preparation of the film, the optimum values obtained for glycerol and MCC are 1.5% w/v and 0.1% w/v, respectively; at these percentages the physical (moisture and solubility) and barrier (WVP) properties are minimized. These values are determined by the regression coefficients: moisture percentage, with R^2 of 99.2551% and adjusted R^2 of 98.2618%; solubility percentage, with R^2 of 98.363% and adjusted R^2 of 96.1803%; and, WVP, with R^2 of 99.2789% and adjusted R^2 of 98.3174%.

Key words: Starch, active chlorine, oxidation, microcrystalline cellulose, glycerol.

ÍNDICE GENERAL

	Pag.
INTRODUCCIÓN	17
OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
Objetivo General.....	19
Objetivos Específicos	19
1. MARCO TEÓRICO	20
1.1 Banano.....	20
1.1.1 Origen, variedad y taxonomía.....	20
1.1.2 Composición química	20
1.1.3 Descripción botánica.....	22
1.1.4 Producción	22
1.2 Almidón.....	23
1.2.1 Composición química	23
1.2.2 Propiedades funcionales del almidón	24
1.2.3 Modificación química de almidón por oxidación	25
1.3 Películas de almidón oxidado y MCC.....	26
1.3.1 Método de obtención	27
1.3.2 Formulación de películas de almidón	28
1.3.3 Propiedades físicas y de barrera de las películas	28
2. METODOLOGÍA	30
2.1 Reactivos, materiales y equipos	30
2.1.1 Extracción de almidón	30
2.1.2 Oxidación de almidón.....	30
2.1.3 Elaboración de películas	31
2.2 Diseño experimental.....	31
2.2.1 Identificación de variables en la preparación de películas.....	32
2.3 Métodos.....	32
2.3.1 Extracción de almidón	33
2.3.2 Oxidación de almidón.....	33
2.3.3 Determinación de grupos carbonilo.....	34
2.3.4 Determinación de grupos carboxilo.....	34
2.3.5 Determinación de la composición proximal del almidón nativo y oxidado.....	35
2.3.6 Determinación de propiedades funcionales	35
2.3.7 Preparación de películas	36

2.3.8	Determinación de propiedades de físicas y de barrera en películas; contenido de humedad, solubilidad, y PVA	36
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	38
3.1	Rendimiento de la extracción de almidón.....	38
3.2	Efecto de la oxidación en las características químicas del almidón nativo de banano variedad <i>Cavendish</i>	38
3.2.1	Evaluación de grupos carbonilo y carboxilo.....	38
3.2.2	Efecto de la concentración de cloro activo en la composición proximal... 40	
3.3	Evaluación de las propiedades funcionales de almidón nativo y oxidado a diferentes concentraciones de cloro activo	43
3.4	Propiedades físicas y de barrera en películas de almidón oxidado y MCC	45
3.4.1	Contenido de humedad	45
3.4.2	Solubilidad	48
3.4.3	Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	50
4.	CONCLUSIONES	53
5.	RECOMENDACIONES.....	55
	BIBLIOGRAFÍA	56
	ANEXOS	67

ÍNDICE DE TABLAS

Pag.

Tabla 1. Clasificación taxonómica del banano	20
Tabla 2. Composición química del banano (con base en 100 g); Error! Marcador no definido.	
Tabla 3. Reactivos, materiales y equipos, utilizados en el proceso de extracción de almidón.	30
Tabla 4. Reactivos, materiales, y equipos utilizados en el proceso de extracción de almidón	30
Tabla 5. Reactivos, materiales, y equipos, utilizados en el proceso de elaboración de películas	31
Tabla 6. Diseño experimental para la preparación de películas; Error! Marcador no definido.	
Tabla 7. Rendimiento de almidón de banano variedad Cavendish; Error! Marcador no definido.	
Tabla 8. Contenido de grupos carboxilo y carbonilo a diferentes concentraciones de cloro activo.....	39
Tabla 9. Análisis proximal de almidón nativo y modificado.....	41
Tabla 10. Propiedades funcionales del almidón nativo y oxidado.....	43
Tabla 11. Tratamientos para elaboración de películas.....	45
Tabla 12. Análisis de varianza para contenido de humedad; Error! Marcador no definido.	
Tabla 13. Modelo ajustado para contenido de humedad; Error! Marcador no definido.	
Tabla 14. Modelo de optimización para minimizar el porcentaje de humedad Error! Marcador no definido.	
Tabla 15. Análisis de varianza para el porcentaje de solubilidad; Error! Marcador no definido.	
Tabla 16. Modelo ajustado para porcentaje de solubilidad; Error! Marcador no definido.	
Tabla 17. Modelo de optimización para minimizar el porcentaje de solubilidad . Error! Marcador no definido.	
Tabla 18. Análisis de varianza para PVA	Error! Marcador no definido.
Tabla 19. Modelo ajustado para PVA.....	Error! Marcador no definido.
Tabla 20. Modelo de optimización para minimizar el valor de PVA; Error! Marcador no definido.	

ÍDICE DE FIGURAS

	Pag.
Figura 1. Etapas de madurez del banano	22
Figura 2. Estructura química de a) Amilosa y b) Amilopectina	23
Figura 3. Mecanismo de oxidación del almidón.....	25
Figura 4. Contenido de grupos carbonilo	40
Figura 5. Contenido de grupos carboxilo	40
Figura 6. Contenido de Humedad.....	41
Figura 7. a) Contenido de fibra, b) Contenido de ceniza, y, c) Contenido de carbohidratos.	42
Figura 8. Medición de pH.....	43
Figura 9. a) Índice de absorción en agua, y b) Poder de hinchamiento	44
Figura 10. Índice de solubilidad en agua	44
Figura 11. Diagrama de Pareto estandarizado para contenido de humedad	46
Figura 12. Diagrama superficie respuesta para contenido de humedad	47
Figura 13. Diagrama de Pareto estandarizado para porcentaje de solubilidad	49
Figura 14. Diagrama superficie respuesta para porcentaje de solubilidad	50
Figura 15. Diagrama de Pareto estandarizado para PVA	51
Figura 16. Diagrama superficie respuesta para PVA.....	52

ÍDICE DE ANEXOS

	Pag.
Anexo A. Proceso de extracción de almidón nativo de banano variedad <i>Cavendish</i>	67
Anexo B. Proceso de oxidación de almidón nativo de banano variedad <i>Cavendish</i>	68
Anexo C. Determinación de propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y oxidado.....	69
Anexo D. Preparación de películas a base de almidón oxidado y MCC	70
Anexo E. Determinación de propiedades físicas y de barrera de películas elaboradas a partir de almidón oxidado y MCC	71

INTRODUCCIÓN

Los plásticos convencionales, producidos a partir de derivados del petróleo, permanecen como contaminantes en el planeta durante extensos periodos de tiempo. El plástico desechado no es biodegradable y puede absorber otros compuestos tóxicos y contaminantes de su entorno ¹. En el año 2010, se generaron 275 millones de toneladas de residuos plásticos, de los cuales entre 4.8 a 12.7 millones de toneladas ingresaron al océano ². Los polímeros de base biológica han surgido como una alternativa viable a los polímeros convencionales; principalmente, por su biodegradabilidad ³, que reduce el impacto ambiental ⁴.

El almidón nativo de banano es considerado como un polímero natural con grandes ventajas, entre ellas, su bajo costo de extracción, la disponibilidad y renovabilidad, y su uso podría ser clave para la fabricación de películas. Sin embargo, la poca estabilidad del almidón nativo constituye una limitante para su procesabilidad, siendo necesaria la modificación química del almidón, para mejorar sus diversas propiedades mecánicas y optimizar su aplicación en la elaboración de biopelículas.

Este polímero natural consta de dos complejos macromoleculares; amilosa y amilopectina, cuyas proporciones varían según el origen botánico del mismo. La amilosa, un polisacárido lineal de unidades de glucosa unidas a través de enlaces glucosídicos, representa del 20 al 30% de la composición; y, la amilopectina, el componente macromolecular más ramificado, representa del 70 al 80% ⁵.

Según investigadores, la modificación química del almidón consiste en cambios estructurales e introducción de nuevos grupos funcionales en las cadenas del polisacárido, con el objetivo de variar sus propiedades fisicoquímicas ⁶. Generalmente, se produce al hacer reaccionar una suspensión de almidón con un agente oxidante a temperatura y pH controlados, donde se modifican los tres grupos hidroxilos disponibles en la posición C₂, C₃ y C₆ ⁷. Este tipo de modificación produce un cambio reflexivo en la gelatinización, composición proximal, características de pegajosidad y retrogradación de los gránulos de almidón nativo ⁸.

En el año 2009, se identificó en ocho sectores de la costa ecuatoriana 112 productores de banano, en una superficie de 44 994 hectáreas, con una producción total analizada de 2 323 040 ton/año de racimos (51.63 ton/ha/año). Al realizar la selección del banano verde, queda fruta que no califica para exportación, equivalente a 7.05 toneladas por hectárea al

año, y su valor agregado anual es de USD 881.15 por hectárea⁹. En el año 2010 se registró una cifra de 3.41 toneladas, por el incumplimiento de normas fitosanitarias y/o especificaciones técnicas¹⁰.

El Oro es la tercera provincia del País con mayor producción de banano, registra 1 075 395 TM, equivalentes al 16.47%, con respecto a las 6 529 676 TM producidas en el Ecuador¹¹. El presente trabajo investigativo tiene un enfoque innovador, se orienta a la elaboración de películas, utilizando como materia prima el almidón de banano no calificado para exportación; que previamente, será sometido a una modificación química por oxidación, para mejorar sus propiedades mecánicas y obtener un producto con valor agregado y amigable con el medio ambiente.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Objetivo General

Elaborar películas a base de almidón oxidado de banano variedad *Cavendish* y celulosa microcristalina (MCC) como alternativa films flexibles.

Objetivos Específicos

- Evaluar el efecto de la modificación por oxidación en las características químicas de almidones provenientes del banano verde.
- Evaluar las propiedades funcionales de almidón nativo proveniente del banano verde y modificado por oxidación a diferentes concentraciones de cloro activo.
- Determinar propiedades físicas y de barrera de películas a base de almidón oxidado y MCC.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 Banano

1.1.1 Origen, variedad y taxonomía

El banano es un fruto comestible de varios tipos de plantas herbáceas de nombre científico Musa, autóctona de la zona tropical de Indomalaya y Australia. Proviene de un cruce de diferentes variedades y varias mutaciones, domesticada por primera vez en Papúa Nueva Guinea ¹².

Las especies parentales del banano comestible son Musa Acuminata y Musa Blabisiaca, y para sus híbridos, M. paradisiaca L. Existe una gran cantidad de variedades de banano, siendo la más comercializada y consumida en todo el mundo la variedad Cavendish, de genotipo AAA (triploide) ^{12, 13}, y cuya taxonomía se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 1. Clasificación taxonómica del banano

Reino	Plantae
División	Magnoliophyta
Clase	Liliopsida
Orden	Zingiberales
Familia	Musaceae
Género	Musa
Especie	Cavendish AAA
Nombre Binomial	Musa Paradisiaca

Fuente: Tomado de Navas. ¹³

1.1.2 Composición química

Curiosamente, el banano verde tiene una pulpa no solo rica en almidón, el cual se transforma en azúcares libres durante el proceso de despolimerización de las cadenas de glucano en su maduración, sino que también es una buena fuente de carbohidratos, fibras dietéticas, ciertas vitaminas y minerales ^{14, 15}, como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 2. Composición química del banano (con base en 100 g)

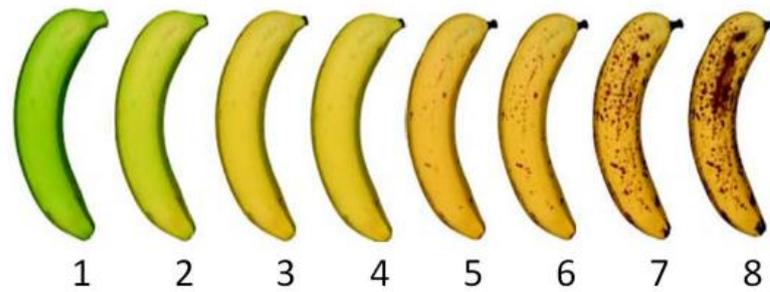
Constituyentes	Cantidad en µg, mg, g o porcentaje
Energía	371 kJ (89 kcal)
Agua	74.91 g
Carbohidratos	22.84 g
Azúcares	12.23 g
Fibra dietética	2.6 g
Vitaminas	
Ácido pantoténico (B5)	0.334 mg, (7%)
Piridoxina (B6)	0.4 mg, (31%)
Colina	9.8 mg, (2%)
Vitamina C	8.7 mg, (10%)
Minerales	
Magnesio	27 mg, (8%)
Fosforo	22 mg, (3%)
Potasio	358 mg, (82%)
Sodio	1 mg, (0%)
Zinc	0.15 mg, (2%)

Fuente: Tomado de Jiwan et al. ¹⁴

A pesar de lo expuesto en la Tabla 1, Sivalingam et al, indica que la composición química del banano depende principalmente del cultivo/variedad, los factores abióticos y ambientales y el estado nutricional y la naturaleza del suelo ¹⁶.

Por otro lado, la composición del banano sufre muchos cambios drásticos cuando este experimenta diversas etapas de madurez (figura 1), estos cambios también ocurren en el almidón, el principal componente del banano verde. Fida et al. ¹⁷, expresan que el contenido promedio de almidón en la etapa preclimática del banano verde disminuyen del 70 - 80 % (dependiendo de su variedad) al 1 % en los bananos que experimentan un período final climatérico.

Figura 1. Etapas de madurez del banano



Fuente Tomada de Escalante et al. ¹⁸

1.1.3 Descripción botánica

La planta de banano es considerada como una hierba monocotiledónea gigante, crece en diversas regiones tropicales y subtropicales del mundo y proporciona un alimento básico para millones de personas en países subdesarrollados. Esta planta tiene tallos subterráneos, los cuales forman el pseudotallo, donde en cuyo interior crece el eje floral, estos tallos subterráneos se llaman cormos, rizomas, bulbos o tubérculos, siendo el primero el término más aceptado ¹⁹.

Cada planta produce por lo general un pseudotallo en su eje floral y una o más yemas que producen otros cormos, por lo cual se forma una mata de crecimiento radial (en todas direcciones), pues estos cormos hijos a su vez producen pseudotallos o hijuelos de diversas edades que irán floreciendo cuando el pseudotallo original desaparezca ²⁰. Para el desarrollo óptimo del cultivo y una adecuada producción del mismo se requieren temperaturas entre 25 y 30 °C y una precipitación media anual entre 1500 y 2000 mm ²¹.

1.1.4 Producción

La producción anual de banano variedad *Cavendish* a nivel mundial es de 50 mil millones de toneladas y los mayores productores son India y Filipinas, que generan alrededor de 60 toneladas por hectárea ²². Ecuador es considerado el primer exportador de banano en el mundo, con una superficie plantada de 19 6673 ha y una producción de 317 437 040 cajas (18.14 kg por caja), de las cuales en la región litoral se produce el 89 %, en la zona baja de la Sierra, 10 %, y en el Oriente, 1% ²³.

Es importante mencionar que en la producción de banano existen pérdidas postcosecha, que representan entre el 10% y 80% ²³, incluyendo el banano que no cumple con los criterios de exportación, a causa de los altos estándares de calidad que exigen los

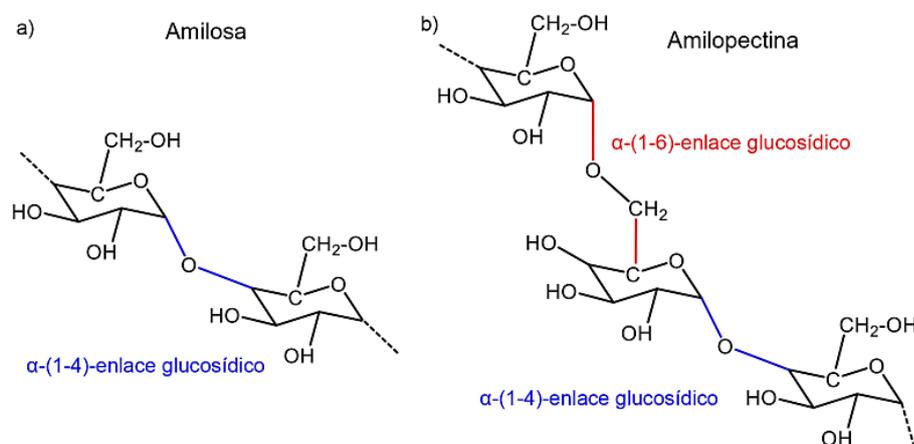
importadores, este es considerado como un rechazo y generalmente distribuido en el mercado nacional o dispuesto como alimento de animales.

1.2 Almidón

1.2.1 Composición química

El almidón es la mayor fuente de hidratos de carbono en la dieta del ser humano y el polisacárido de almacenamiento más abundante en las plantas, semillas y frutos. A nivel molecular, el almidón nativo está formado por dos componentes distintos, amilosa y amilopectina (figura 2), que se pueden aislar por fraccionamiento y ser estudiados de forma independiente. La amilosa, que es esencialmente un polímero lineal, constituye típicamente entre el 15% al 20% de almidón, y la amilopectina, que es una molécula ramificada más grande y que se encuentra en mayor porcentaje como el componente principal del polisacárido ²⁴.

Figura 2. Estructura química de a) Amilosa y b) Amilopectina



Fuente: Tomada de Gutiérrez. ²⁵

El almidón de banano posee un contenido de humedad del 6.83 al 14.00 % y un contenido de cenizas del 0.03 al 2.08 %. También contiene 0.01 a 2.46% y 0.17 a 2.16% de lípidos y proteínas, respectivamente. La diferencia en el contenido de lípidos y proteínas del almidón podría deberse a la diferente variedad de banano y la diferente técnica de extracción que se utilizó para extraer el almidón. El almidón total osciló entre 69.39% y 98.10%. Los contenidos de fibra cruda y amilosa del almidón de plátano son 0.18–0.47% y 13.36–42.07%, respectivamente. En cuanto al plátano, el contenido de amilosa del almidón es 22.76–38.79% ²⁶.

1.2.2 Propiedades funcionales del almidón

1.2.2.1 Poder de Hinchamiento e Índice de Solubilidad en Agua. Los almidones al llegar a la temperatura desde 60 a 70 °C muestran un leve hinchamiento debido a los puentes de hidrógenos en los gránulos de almidón formando complejos de lípidos y proteínas que restringen el hinchamiento; en tanto que, por encima de los 70 °C los puentes de hidrógenos se rompen y permiten el paso del agua dentro de los gránulos de almidón que incrementan el hinchamiento ²⁷.

Los índices de poder de hinchamiento (PH) y las características de solubilidad (ISA) son un juego de cadena de almidón que se encuentra en el dominio de porcentaje de fracción de amilosa-amilopectina y patrón intermolecular, incluyendo el grado de ramificación, distribución del peso molecular y longitud de las ramificaciones. Ciertos complejos de amilosa-lípido previenen el hinchamiento y la solubilización; además, el hinchamiento de los gránulos está controlado por la proteína dentro de los gránulos ²⁸.

1.2.2.2 Índice de Absorción de Agua (IAA). Los almidones al someterse a un proceso de calentamiento, manifiestan cambios a nivel de los enlaces moleculares de amilosa y amilopectina, ese nivel de cambios se puede cuantificar a través del índice de absorción de agua. El IAA disminuye con el aumento de la temperatura, y probablemente se deba a la descomposición o degradación del almidón donde se podría esperar que más cadenas de polímeros no dañadas y una mayor disponibilidad de grupos hidrofílicos, que podrían unir más agua, produjeran valores más altos de IAA en una hidrólisis incompleta o baja gelatinización. El IAA mide la cantidad de componentes solubles liberados del almidón después del calentamiento; y el alto nivel de IAA es un indicador *in vitro* de buena digestibilidad del almidón, ya que implica el grado de gelatinización y dextrinización ²⁹.

1.2.2.3 Gelatinización. Los gránulos de almidón son insolubles en agua fría, debido a que su estructura está altamente organizada y a que presenta una gran estabilidad por las múltiples interacciones que existen con sus dos polisacáridos constituyentes; sin embargo, al llegar a ciertas temperaturas cercanas a 65°C, el gránulo alcanza su volumen máximo y pierde tanto su patrón de difracción de rayos X como la propiedad de birrefringencia. Si se administra más calor, el gránulo hinchado incapacitado para retener el líquido, se rompe parcialmente permitiendo que la amilosa y la amilopectina, fuertemente hidratadas, se dispersan en el seno de la disolución. En este punto se pierden

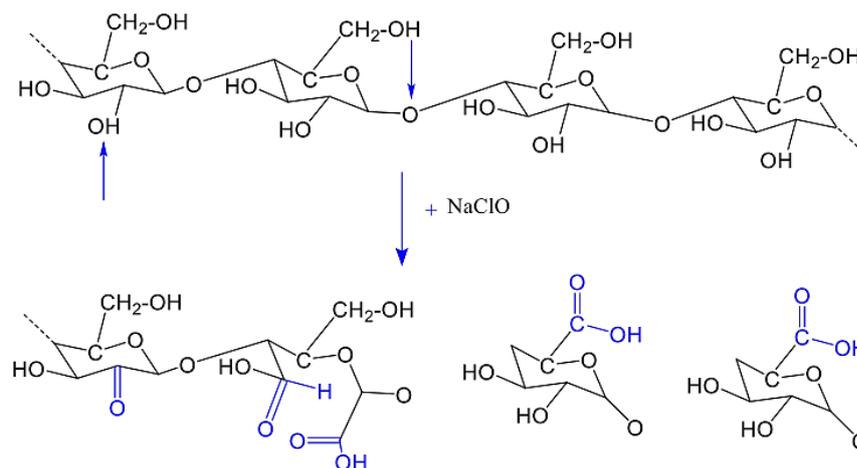
la estructura original y la birrefringencia del gránulo; seguidamente se da un aumento de la viscosidad donde aproximadamente 30% de la amilosa se encuentra en solución ³⁰.

1.2.3 Modificación química de almidón por oxidación

En la oxidación química del almidón se utilizan agentes oxidantes, tales como: hipoclorito de sodio (NaClO), peróxido de hidrogeno (H₂O₂), ozono (O₃), permanganato de potasio (KMnO₄) y peryodato (IO₄). Los dos primeros agentes son los más utilizados y de bajo costo; mientras que, los tres últimos requieren de un estricto control de pH y temperatura³¹.

De acuerdo con Molita et al. ³², el proceso de oxidación de almidón se da en dos fases (figura 3): en la primera, se suprimen dos átomos de hidrogeno para forma el aldehído carbonilo, y finalmente el ácido carboxílico; y en la segunda, ocurre una ruptura del enlace C₂-C₃ que da origen a grupos carbonilos, cuya oxidación produce grupos carboxilos. Por ende, la proporción de grupos carbonilo, carboxilo y el grado de despolimerización en el almidón oxidado, son indicadores del grado de oxidación.

Figura 3. Mecanismo de oxidación del almidón



Fuente: Tomada de Vanier et al. ³³

En el almidón oxidado, las cargas negativas de los grupos carboxílicos provocan repulsión entre moléculas, dificultando la aproximación de cadenas, lo que retarda la retrogradación. Los grupos carboxilos introducidos en la molécula de almidón, pueden aumentar la afinidad del almidón por el agua, provocando un aumento en la viscosidad y la reducción de la temperatura de gelatinización ³⁴. Estos cambios dependen del origen botánico y la estructura molecular del almidón nativo, el empaquetamiento de las láminas

cristalinas, el tamaño de las láminas amorfas, el tipo de agente oxidante y las condiciones de reacción ³⁵.

Cabe mencionar, que los altos contenidos de amilosa tienden a dificultar aún más la oxidación de las láminas cristalinas; la cocrystalización de amilosa con cadenas de amilopectina interrumpe el empaquetamiento de las dobles hélices de amilopectina, acercando algunas cadenas de amilopectina entre sí ³³. Por lo tanto, los almidones con alto contenido de amilosa pueden limitar el acceso del agente oxidante a las dobles hélices de amilopectina, impidiendo la oxidación eficiente de las láminas cristalinas en los gránulos de almidón.

1.2.3.1 Grupos carbonilo y carboxilo

El agente oxidante más utilizado en la modificación del almidón y con mejores resultados es el hipoclorito de sodio (NaClO), mediante cloro libre, mientras aumenta la concentración de cloro activo, el contenido de los grupos carbonilo y carboxilo también aumentan ³⁶; en esta oxidación ocurre la introducción de grupos carboxilos y carbonilos, de lo cual se obtiene una mejor hidratación e hinchazón de la molécula, una baja viscosidad, transparencia y estabilidad, en comparación con un almidón nativo ³⁷.

Los almidones oxidados actualmente representan los grupos más grandes de almidones modificados en producción. Así mismo, provee al almidón, no solo un cambio en su color (blaqueado), sino en la producción de grupos carboxilo que ayudan a la estabilización de las moléculas lineales de amilosa, minimizan la retrogradación, y además, define la magnitud de la oxidación ³⁸.

1.3 Películas de almidón oxidado y MCC

Las películas plásticas de base petroquímica como: poliestireno, polipropileno y cloruro de polivinilo, tienen buenas características mecánicas y de barrera ³⁹. Sin embargo, el uso de estos materiales generan graves problemas ecológicos, debido a que no son biodegradables, y provienen de recursos no renovables ⁴⁰, por tal razón, se promueve el uso de un material alternativo y de bajo costo, para la producción de películas ⁴¹, las cuales no sólo ayudan a reducir el uso de polímeros nocivos, si no también están alineadas con los preceptos de la economía circular ⁴².

Las películas de almidón son materiales biopoliméricos que se obtienen a partir de fuentes naturales y renovables, después de su consumo se descomponen fácilmente en sustancias no tóxicas debido al metabolismo de los organismos ⁴³. Han sido particularmente

consideradas debido a que muestran características físicas similares a los polímeros sintéticos; transparentes, semipermeables al CO₂ y resistentes al paso de O₂ ⁴⁴.

Por otro lado, existen factores que afectan a las propiedades del almidón nativo y consecuentemente a las propiedades de las películas, entre ellas; la proporción entre amilosa y amilopectina, las longitudes de cadena promedio de amilosa y amilopectina, y la forma en que la amilopectina se empaqueta dentro de los dominios semicristalinos de los gránulos de almidón ³³. Es por ello que cuando los almidones nativos no exhiben las propiedades particulares requeridas, las estructuras moleculares de la amilosa y la amilopectina pueden modificarse mediante tratamientos químicos.

Además del almidón oxidado, se deben considerar otros parámetros y componentes al formular películas, ya que las propiedades físicas, mecánicas y de barrera de esta, también pueden verse afectadas. Por ejemplo, los plastificantes actúan como espaciadores entre polímeros, ya que disminuyen las fuerzas intermoleculares entre cadenas de polímeros adyacentes, para reducir la fragilidad y mejorar la flexibilidad y la extensibilidad. Los plastificantes más comunes son el sorbitol y el glicerol, que evitan que las películas se agrieten durante la manipulación y el almacenamiento ⁴⁵.

Entre los componentes de refuerzo para la elaboración de películas tenemos a la MCC, compuesta de una cadena lineal con dos anillos de anhidroglucosa (C₆H₁₀O₅), unidos covalentemente a través de un oxígeno en un enlace glucosídico β1-4. La MCC ha ganado un interés creciente en el refuerzo de materiales poliméricos ya que su alta cristalinidad mejora las propiedades mecánicas y térmicas de las películas compuestas ⁴⁶.

La inclusión de MCC a la matriz polimérica, podría evitar la migración de las moléculas que intentan atravesar la película, debido a que este componente forma una red de dimensiones uniformes y nanométricas ⁴⁶, generando la formación de poros más pequeños y complejos que disminuyen la permeabilidad, debido a que se forma una red densa e irregular dentro de la película ⁴⁷.

1.3.1 Método de obtención

La preparación de películas de almidón utilizando el método clásico de vaciado de placa (film casting), el cual consiste en verter una suspensión en placas pequeñas, controlando el espesor de la película a partir de la masa de la suspensión vertida. En este proceso, el almidón se gelatiniza con exceso de agua, luego de ser calentado y agitado constantemente, asegurando la hidratación de sus moléculas, y garantizando la correcta mezcla de los componentes de la formulación, siendo la absorción y el tiempo de mezcla,

parámetros significativos para garantizar la dispersión homogénea de los compuestos en su matriz polimérica ⁴⁸.

El método de film casting es muy utilizado para la producción de películas poliméricas de alta calidad ⁴⁹. Una ventaja importante de este método con respecto a otros procesos similares, es el enfriamiento de la película, el cual es relativamente rápido y uniforme, además de la posibilidad de poder trabajar a temperaturas bajas ⁵⁰.

1.3.2 Formulación de películas de almidón

Los compuestos que forman parte de las películas pueden ser de naturaleza hidrofóbica o hidrofílica, siendo uno de los principales el agua, que actúa como disolvente. El agua conjuntamente con el etanol son los únicos compuestos que pueden ser utilizados para lograr conservar la capacidad de uso de la biopelícula.⁵¹

Una característica notoria del almidón, es su insolubilidad en agua fría y no se derrite como los plásticos convencionales, ya que la temperatura de degradación del almidón es menor que su punto de fusión ⁵². Sin embargo, los gránulos de almidón pierden su comportamiento semicristalinos de forma irreversible y se transforman en una matriz continua cuando el almidón se somete a fuerza, calor y plastificantes ⁵³. Esta característica del almidón se utiliza para formular películas biodegradables.

El almidón se convierte en una fase entrelazada polimérica utilizando agua o cualquier otro componente plastificante, al reducir los enlaces de hidrógeno intramoleculares. Estos componentes plastificantes inician interacciones plastificante-plastificante o plastificante-agua en el sistema, aumentando así el espacio intermolecular ⁵¹. La fase amorfa del almidón, debido a su estructura menos ordenada, es más propensa al ataque de estas pequeñas moléculas (agua y plastificantes) y forma interacciones fuertes ⁵³. Estas interacciones pueden ser sinérgicas y por ende mejorar las propiedades funcionales de las películas fabricadas.

1.3.3 Propiedades físicas y de barrera de las películas

Una de las propiedades físicas más importantes en las biopelículas es el espesor ya que puede influir en otras propiedades como la resistencia mecánica y la opacidad. Las películas en su totalidad son de naturaleza hidrofílica existiendo una relación muy fuerte entre la permeabilidad al vapor del agua y el espesor de los films ⁵⁴. A medida que el espesor se agranda, la resistencia a la transmisión de masa de la película o recubrimiento se incrementa. Otros investigadores atribuyen que el espesor interviene en la

transformación de la estructura de las películas y recubrimientos causados por la hidratación de los gránulos de almidón ⁵⁵.

Otra propiedad física importante en las biopelículas es la humedad, es bien sabido que mayores cantidades de grupos hidrofílicos en los materiales conducen a un mayor contenido de humedad en los mismos. El agua adsorbida en las películas actúa como un plastificante para aumentar la movilidad de la cadena del almidón y debilitar los enlaces de hidrógeno entre cadenas, por lo que las cadenas de almidón son capaces de deslizarse, reduciendo así la tensión interna y aumentando así el alargamiento de la película. Uno de los métodos utilizados a menudo para estudiar el transporte de humedad a través de biopelículas es la captación de agua ⁵⁶.

Por otra parte tenemos la solubilidad, esta propiedad es de gran relevancia para determinar la biodegradabilidad de una biopelícula; es considerada también un factor imprescindible al momento de elegir la utilidad de la misma ⁵⁷. Además, la insolubilidad de las películas en agua también es importante para evaluarlas de acuerdo a sus diversas aplicaciones potenciales.⁵⁸ Según estudios, mayores cantidades de almidón conducen a una mayor solubilidad de las películas en agua ⁵⁶.

Entre las propiedades de barrera de las películas tenemos la permeabilidad al vapor de agua (PVA), esta es una propiedad de utilizada para demostrar la capacidad que tienen las biopelículas para retener el vapor de agua ⁵⁹. Hay que tener en cuenta que la PVA de una película en la industria del embalaje está relacionada con su capacidad para controlar la transmisión de vapor de agua entre un producto y el medio ambiente. Un valor bajo de permeabilidad es ventajoso ya que implica una limitación en la transmisión de vapor de agua del entorno hacia el producto empaquetado, preservando así la vida útil del mismo⁶⁰.

2. METODOLOGÍA

2.1 Reactivos, materiales y equipos

Cada uno de los reactivos, materiales y equipos utilizados en el presente trabajo de investigación serán descritos de acuerdo a cada proceso realizado.

2.1.1 Extracción de almidón

Cada uno de los reactivos, materiales y equipos utilizados en el proceso de extracción de almidón, son descritos en la tabla 3.

Tabla 3. Reactivos, materiales y equipos, utilizados en el proceso de extracción de almidón.

Reactivos	Materiales	Equipos
Metabisulfito de sodio (Na ₂ S ₂ O ₅), marca Fisher.	Materiales de vidrio. Lienzo. Contenedores de aluminio.	Balanza digital, marca Sartorius. Licuadora, marca Global. Estufa, marca Memmert.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.2 Oxidación de almidón

Cada uno de los reactivos, materiales y equipos utilizados en el proceso de oxidación de almidón, son descritos en la tabla 4.

Tabla 4. Reactivos, materiales, y equipos utilizados en el proceso de extracción de almidón

Reactivos	Materiales	Equipos
Hidróxido de sodio (NaOH), marca EMSURE.	Materiales de vidrio.	Balanza analítica, marca Radwag.
Hipoclorito de sodio (NaClO), marca Lira.	Termómetros. Papel filtro.	Potenciómetro, marca Thermo Scientific.
Ácido sulfúrico (H ₂ SO ₄), pureza de 95.6 %, marca Fisher.	Contenedores de aluminio.	Plancha de calentamiento, marca DLAB MS7-H550-S.
Ácido clorhídrico (HCl), pureza de 36.5 %, marca Fisher.		Centrifuga digital de 6 tubos, marca Hermle. Estufa, marca Memmert.

Bisulfito de sodio (NaHSO_3),
marca Fisher.

Clorhidrato de hidroxilamina
($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$), marca Otto.

Fuente: Elaboración propia.

2.1.3 Elaboración de películas

Cada uno de los reactivos, materiales y equipos utilizados en el proceso de elaboración de películas, son descritos en la tabla 5.

Tabla 5. Reactivos, materiales, y equipos, utilizados en el proceso de elaboración de películas

Reactivos	Materiales	Equipos
Glicerol ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_3$), marca Loba Chemie PVT. LTD.	Materiales de vidrio.	Plancha de calentamiento, marca DLAB MS7-H550-S.
Celulosa microcristalina ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), Marca Alfa Aesar.	Moldes antiadherentes de aluminio.	Micrómetro de rosca. Estufa, marca Memmert. Termohigrómetro, marca Elicrom. Copa de vapor, marca Elcometer. Termobalanza, marca AND MX-50.

Fuente: Elaboración propia.

2.2 Diseño experimental

El desarrollo del presente trabajo de investigación es de carácter experimental. Se extrajo almidón nativo de banano para luego ser modificado químicamente, por medio del método de oxidación, con la finalidad de mejorar las propiedades físico-químicas y funcionales del mismo. En los resultados obtenidos se verifico el cumplimiento de distribución normal y homocedasticidad mediante las pruebas de Shapiro Wilk y Test de Levene's, con el fin de aplicar un análisis de varianza de un solo factor (ANOVA) y evidenciar diferencias significativas en el estudio de la concentración de hipoclorito de sodio (0.5% v/v y 1.5% v/v) como reactivo oxidante del almidón nativo y oxidado tanto en la composición química y propiedades funcionales (IAA, ISA, PH).

Para evaluar las propiedades físicas y de barrera de las películas elaboradas a partir de almidón oxidado de banano, se desarrolló un diseño factorial multinivel 2²

completamente estocástico al azar. Con el presente diseño se pretendió comprobar la incidencia del porcentaje de plastificante y MCC, sobre las variables respuesta; contenido de humedad, solubilidad y PVA. Los niveles de plastificante aplicados fueron de 1.5% y 2.5% p/p, mientras que los niveles de MCC aplicados fueron de 0.05 y 0.1% p/p, como se muestra en la tabla 3. Para el estudio estadístico se utilizó el programa Statgraphics Centurión XVI.

Tabla 6. Diseño experimental para la preparación de películas

Tratamientos	Bloque	Glicerol (%)	Celulosa (%)
		p/v	p/v
1	1	2.5	0.05
2	1	2.5	0.1
3	1	1.5	0.1
4	1	1.5	0.05
5	2	2.5	0.1
6	2	2.5	0.05
7	2	1.5	0.05
8	2	1.5	0.1

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

2.2.1 Identificación de variables en la preparación de películas

Variables independientes:

- MCC.
- Plastificante.

Variables dependientes:

- Contenido de humedad.
- Porcentaje de solubilidad.
- PVA.

2.3 Métodos

Cada uno de los métodos utilizados en el presente trabajo de investigación serán descritos de acuerdo a cada proceso realizado.

2.3.1 Extracción de almidón

La obtención de almidón nativo del banano se realizó combinando las metodologías de extracción por vía húmeda, utilizadas por *Barraza- Jáuregui et al.*⁶¹ y *Meza et al.*⁶², con algunas modificaciones. Un proceso de molienda húmeda es adecuado para la extracción de almidón de banano, debido a las impurezas de bajo nivel²⁶.

El proceso extracción inicia con el pelado, lavado y pesado de la pulpa de banano verde de forma manual. posteriormente el banano fue cortado en pedazos de (2cm x 2cm x 2cm) y sumergidos en una disolución homogenizada de metabisulfito de sodio (0.5% p/v) a una proporción de 1:1.5, los trozos de banano fueron triturados en un procesador de alimentos marca Global durante 3 minutos con la misma disolución de metabisulfito de sodio hasta obtener un líquido espeso, que se filtró a través de un lienzo y se dejó decantar por 24 horas. La suspensión resultante se filtró por medio de papel filtro liso y se llevó a la estufa a 50°C por 24 horas, el resultante se procedió a moler en un mortero y luego fue tamizado en un tamiz analítico N°60, el almidón se almacenó en un frasco color ámbar de plástico con cierre hermético y tapa rosca para evitar que adquiriera humedad del ambiente. El porcentaje de rendimiento de almidón de banano resultante de la extracción se muestra en la ecuación (Ec.1)²⁷.

$$\text{Rendimiento de almidón (\%)} = \frac{\text{Peso de almidón seco}}{\text{Peso inicial de banano pelado}} * 100 \quad (\text{Ec. 1})$$

2.3.2 Oxidación de almidón

El proceso de oxidación del almidón nativo de banano se realizó siguiendo la metodología aplicada por *Carhuallay et al.*³⁸, con algunas modificaciones. Se pesó 50g de almidón nativo en un vaso de precipitado de 1000mL, seguidamente se adicionó 190mL de agua de destilada manteniendo una temperatura constante de 35°C en una plancha calefactora con agitación magnética constante. Luego se ajustó el pH entre 9– 9.5 con NaOH 2N utilizando un potenciómetro marca Thermo Scientific modelo Orion Star A111, posteriormente se adicionó el NaClO (100 mL en disoluciones de 0.5% y 1.5% v/v, con concentraciones de cloro activo de 0.7% y 1,8%, respectivamente, y determinados con base a la Norma Mexicana NMX–K–281–SCFI-2012⁶³), la adición de reactivo oxidante se mantuvo durante 30 minutos (manteniendo el pH entre 9–9.5 utilizando H₂SO₄ 1N), una vez agregado el NaClO se dejó reaccionar 30 minutos en todos los tratamientos (manteniendo el pH entre 9–9.5 utilizando NaOH 1N). Luego de haber terminado la reacción se adicionó 1g de bisulfito de sodio, seguidamente se filtró usando embudo de

vidrio y papel filtro liso (realizando 3 lavadas con agua destilada hasta que el líquido remanente fue claro). Posteriormente se llevó centrifugar y luego el almidón seco se colocó en la estufa a 45°C durante 16 horas. Finalmente, el almidón seco se molió en un mortero y se tamizó en malla N°60.

2.3.3 Determinación de grupos carbonilo

La determinación de grupos carbonilo en muestras de almidón oxidado se realizó según el método aplicado por *Wei et al.*⁶⁴. En un vaso de precipitación de 500mL se disolvieron 4g de almidón en 100mL de agua destilada hervida y fría. La suspensión se gelatinizó en un baño de agua hirviendo durante 20 minutos, y se enfrió a 40°C. Posteriormente, se ajustó a pH 3.2 con HCl 0.1 N y se añadieron 15mL de cloruro de hidroxilamina. El vaso de precipitación se tapó y se colocó en un baño de agua a 40°C durante 4 h, con agitación lenta. El exceso de cloruro de hidroxilamina se determinó titulando rápidamente la mezcla de reacción a pH 3.2 con HCl 0.1 N. A una muestra de almidón nativo y cloruro de hidroxilamina se le realizó en el mismo proceso. El reactivo cloruro de hidroxilamina se preparó disolviendo 25g de clorhidrato de hidroxilamina en 100mL de NaOH 0.5 N, y el volumen final volumen final se ajustó a 500mL con agua destilada. El porcentaje de grupos carbonilo se determinó según la ecuación (Ec.2):

$$\text{Contenido de grupos carbonilo (\%)} = \frac{(V_1 - V_2)}{M} * C * 0.028 * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde: V_1 , es el volumen de ácido clorhídrico consumido en la titulación de almidón oxidado; V_2 , es el volumen de ácido clorhídrico consumido en la titulación de almidón nativo; C , es la concentración estándar de ácido clorhídrico en mol/L; y M , es la cantidad de muestra de almidón en g.

2.3.4 Determinación de grupos carboxilo

La determinación de grupos carboxilos se realizó mediante el método aplicado por *Carhuallay et al.*³⁸ y *Zhou et al.*⁶⁵ Se pesó 2g de almidón oxidado y nativo en un vaso de precipitados de 100mL, se adicionó 25mL de HCl 0.1N y se mezcló con un agitador magnético durante 30 minutos. Posteriormente se filtró usando embudos de vidrio y papel filtro liso, la pasta resultante del filtrado se transfirió a un vaso de precipitados de 1000mL, el cual contuvo 300mL de agua destilada. Se calentó hasta el punto de gelatinización del almidón y se mantuvo esta temperatura durante 15min y agitación constante. Al finalizar el tiempo se adicionó 150mL de agua destilada a temperatura

ambiente y se permitió estabilizar a una temperatura de entre 34-39°C. Finalmente se tituló con solución de NaOH 0.1 N, utilizando fenolftaleína como indicador. También se realizó una prueba en blanco con almidón nativo. El porcentaje de grupos carboxilo se determinó mediante la ecuación (Ec.3), y ecuación (Ec.4):

$$\% \text{Carboxilo} = \frac{\text{mequi. de acidez}}{100 \text{ gr de almidón}} * 0.045 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\frac{\text{mequi. de acidez}}{100 \text{ gr de almidón}} = \frac{(A - B) * N \text{ de NaOH} * 100}{\text{gramos de muestra}} \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde: A, son los mL de NaOH 0.01 N gastados en la titulación de almidón oxidado; B, son los mL de NaOH 0.01N gastados en la titulación de almidón nativo; y, el valor 0.045 corresponde al miliequivalente del grupo carboxilo.

2.3.5 Determinación de la composición proximal del almidón nativo y oxidado

La composición proximal del almidón nativo y oxidado, se determinó mediante los siguientes métodos: la determinación de humedad se realizó mediante el método AOAC 925.10; el contenido de ceniza se determinado mediante el método AOAC 923.03; el contenido de fibra se determinó mediante el método WEENDE; el contenido de proteína se determinó mediante el método DUMAS; el contenido de grasa se determinó mediante el método AOAC 2003.06; el pH se determinó mediante la NTE INEN526; y finalmente el contenido de carbohidratos de determino mediante calculo.

2.3.6 Determinación de propiedades funcionales

La determinación de las propiedades funcionales: IAA, ISA y PH, se realizó siguiendo la metodología empleada por *Salcedo et al.* ⁶⁶, con algunas modificaciones. En un tubo falcon se pesó 1g de almidón en base seca, al mismo se le adiciono 25mL de agua destilada precalentada a 60°C. La suspensión fue dispuesta en un baño de agua acondicionada a 60°C durante 30 minutos, agitándose lentamente de forma manual a los 10 minutos de iniciado el calentamiento. Posteriormente, se llevó a centrifugación a 570g (rcf) o 2150rpm durante 15 minutos. Después del proceso de centrifugado se extrajo el líquido sobrenadante del tubo falcon (almidón soluble) y se determinó el volumen total (V). Seguidamente, una alícuota de 10mL de líquido sobrenadante fue depositada en una caja Petri pesada previamente y fue sometida a secado en estufa a 70°C durante 16 h. Finalmente, se registró el peso de la caja Petri con el almidón soluble, y del tubo falcon

que contenía el gel de almidón (almidón insoluble). El IAA, ISA y PH se determinaron según las ecuaciones (Ec.5), (Ec.6) y (Ec.7):

$$IAA = \frac{\text{Peso de gel (g)}}{\text{Peso de muestra (g) en bs}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$ISA = \frac{\text{Peso soluble (g)} * V/10}{\text{Peso de muestra (g) en bs}} \quad (\text{Ec. 6})$$

$$PH = \frac{\text{Peso del gel (g)}}{\text{Peso de muestra (g)} - \text{Peso soluble (g)}} \quad (\text{Ec. 7})$$

2.3.7 Preparación de películas

La elaboración de las películas se preparó siguiendo un diseño factorial 2^2 y se realizó mediante el método film casting según la metodología aplicada por *Othman et al.*⁶⁷, con algunas modificaciones. Para preparar las películas compuestas de almidón oxidado y MCC, se inició el proceso preparando soluciones de MCC a diferentes concentraciones de entre (1 - 5% p/p) en base al peso del almidón. Se disolvieron 0,05 y 0,1 gramos de MCC en 70mL de agua destilada y se agitó vigorosamente durante 1 hora usando un agitador magnético. Seguido, se agregaron lentamente a la solución 3g de almidón en 30mL de agua destilada, la mezcla resultante se agitó vigorosamente, y se calentó a 80°C durante 30 minutos usando un agitador magnético, para obtener la gelatinización del almidón. Posteriormente, se añadieron 1,5 y 2,5g de glicerol como plastificante (50 y 83% p/p) basado en el peso de almidón, respectivamente. Finalmente, se permitió ajustar la temperatura de la solución a 40°C y se vertió la mezcla en un recipiente antiadherente que actuó como placa de moldeo, y se secó en estufa a 45°C durante 17 horas. Después del secado, la película se retiró de la placa de fundición y se almacenó en un desecador (humedad relativa, HR: 50 %; temperatura, T: 25 °C) antes de realizar los análisis respectivos.

2.3.8 Determinación de propiedades de físicas y de barrera en películas; contenido de humedad, solubilidad, y PVA

El contenido de humedad en películas de almidón oxidado de banano y MCC, se determinó por medio del método de termobalanza, a temperatura de 105°C y con peso de muestras de 2 gramos por tratamiento.

La solubilidad en películas de almidón oxidado de banano y MCC se determinó mediante la metodología aplicada por *Riaz et al.*⁶⁸, con algunas modificaciones. Las películas se

cortaron en piezas de 2×2cm, y se secaron a 105°C hasta durante 24 horas hasta peso constante para obtener una masa seca inicial (M1). Luego, se colocaron en vasos de precipitados de 100mL con 50mL de agua destilada, estos fueron cubiertos con envolturas de plástico y se almacenaron a 25°C durante 24h. A continuación, las películas se secaron superficialmente con papel de filtro y se colocaron en estufa a 105°C por 24h hasta peso constante, para obtener una masa seca final (M2). Finalmente, la solubilidad se calculó utilizando la ecuación (Ec.8):

$$\text{Solubilidad de película (\%)} = \frac{M1 - M2}{M1} * 100 \quad (\text{Ec. 8})$$

La PVA en películas de almidón oxidado de banano y MCC se determinó mediante la metodología aplicada por Adjouman et al. ⁶⁹, con algunas modificaciones. Se montaron muestras de película circulares y se colocaron en copas de permeabilidad que contenían 10g de silica gel (0% de humedad relativa, HR). El conjunto se colocó en un desecador a 25°C que contenía un vaso de precipitados con 100mL de agua destilada (80-90%, HR). Después de que se alcanzaron las condiciones de estado estacionario, se tomaron seis mediciones de peso durante 12h. Los cambios en el peso de las copas se registraron con una precisión de 0,0001g y se representaron en función del tiempo. La pendiente de cada línea se calculó por regresión lineal ($r^2 > 0.99$), y la tasa de transmisión de vapor de agua (WVTR) se calculó a partir de la pendiente de la línea recta (g/s) dividida por el área de la celda (m²), el cual fue de 30m². Después de las pruebas de permeabilidad, se midió el espesor de la película y se calculó el PVA (g mm⁻¹ h⁻¹ Pa⁻¹) de acuerdo a la siguiente ecuación (Ec.9):

$$PVA = \frac{WVTR}{S(R1 - R2) * D} \quad (\text{Ec. 9})$$

Donde: S es la presión de saturación de vapor de agua, a T de 25°C, en Pa; CR1 es la HR en el desecador; R2 es la HR en la celda de permeabilidad; y, D es el espesor de la película, en mm.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Rendimiento de la extracción de almidón

Tabla 7. Rendimiento de almidón de banano variedad Cavendish

Ensayo	Peso de pulpa de banano (g)	Peso de almidón extraído (g)	Rendimiento (%)
1	8000	185	2.31
2	16000	415	2.59
3	8000	167	2.09
4	16000	384	2.4
Total	48000	1151	2.35 ± 0.21

Fuente: Elaboración propia.

El porcentaje de rendimiento de almidón de banano variedad Cavendish que fue obtenido de una extracción con 0.5% de metabisulfito de sodio por el método húmedo fue de 2,35%, respectivamente calculado en base al peso de las bananas peladas. Se observa en la tabla 7 un porcentaje de rendimiento menor a los encontrados en Thanyapanich, Norramon et al. y Kringel, Dianini et al. ^{27,70}, el factor que influye en el rendimiento de extracción de almidón se debe en gran medida la etapa de maduración de la banana que se usa en el proceso ²⁶.

3.2 Efecto de la oxidación en las características químicas del almidón nativo de banano variedad *Cavendish*

3.2.1 Evaluación de grupos carbonilo y carboxilo

De acuerdo con el estadístico de Shapiro-Wilk todos cumplen con distribución normal ($p > 0.05$), así como también la prueba de Levene ($p > 0.05$) que identifica la varianza, posteriormente se procedió a realizar (ANOVA) (tabla 8).

Tabla 8. Contenido de grupos carboxilo y carbonilo a diferentes concentraciones de cloro activo.

Concentración de cloro activo	Grupos carbonilo (CO)	Grupos carboxilo (COOH)
(%)	(%)	(%)
0	0.0000±0.0000 ^a	0.0000±0.0000 ^a
0.7	0.0191333±0.00176163 ^b	0.14969±0.01361 ^b
1.8	0.0273±0.00252389 ^c	0.23688±.022619 ^c

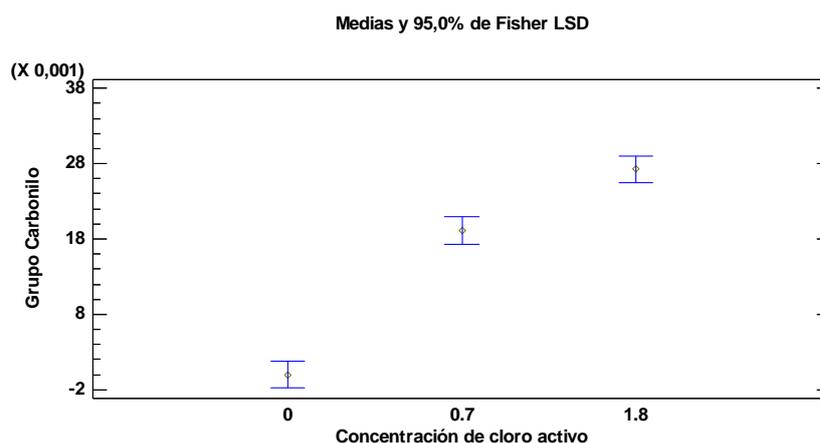
Media de tres determinaciones en diferentes niveles ± desviación estándar. Diferentes letras a, b, c, en la misma columna de grupos carbonilo y carboxilo, indican diferencias estadísticas significativas debido a la oxidación (p<0.05).

Fuente: Elaboración propia.

Se observó que, a medida en que aumentan los niveles de cloro activo se registran diferencias significativas ($p<0.05$), evidenciándose un incremento en ambos indicadores del grado de oxidación (figura 4).

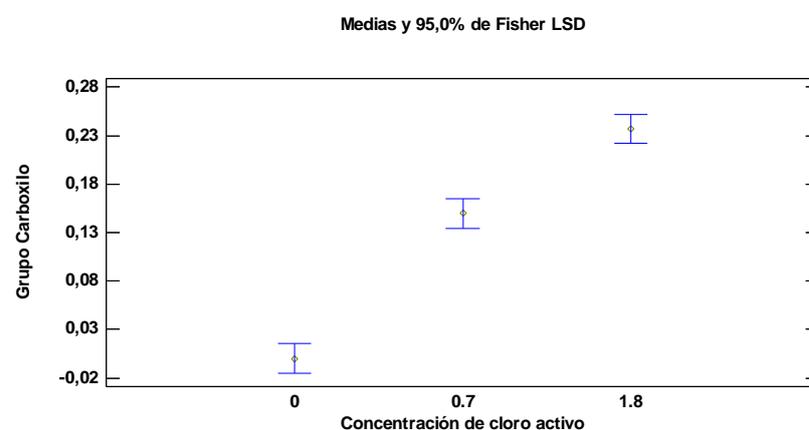
La oxidación a 1.8% es más efectiva, generando un contenido de grupos CO y COOH del 0.0273% y 0.2369%, respectivamente, estos resultados son similares a los presentados por Naknaen et al. ⁷¹, y Halal et al. ⁷², quienes realizaron un estudio en almidón oxidado de semilla de yaca y cebada. El contenido de COOH de los almidones oxidados aumenta a un ritmo mucho más rápido que el contenido de CO, esto podría deberse, ya que a medida en que aumenta el nivel de cloro activo en la matriz del polímero, existe una introducción rápida de grupos CO en las unidades de glucosa, que son oxidados rápidamente a grupos COOH.

Figura 4. Contenido de grupos carbonilo



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Figura 5. Contenido de grupos carboxilo



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

De igual manera, Carhualay et al. ³¹, expresan de acuerdo a su estudio de almidón de achira, que existe una tendencia al incremento de grupos carboxilo a medida que la concentración de oxidante y pH de reacción aumentan, resultados similares se obtuvieron en el almidón oxidado de papa, según el estudio realizado por Haq et al. ³⁵.

3.2.2 Efecto de la concentración de cloro activo en la composición proximal

Para el verificar el efecto de los niveles de cloro activo en la composición proximal de los diferentes almidones, se utilizó el test no paramétrico Kruskal-Wallis con un grado de significancia del 95% ($p < 0.05$), mediante el programa Statgraphics Centurión XVI.

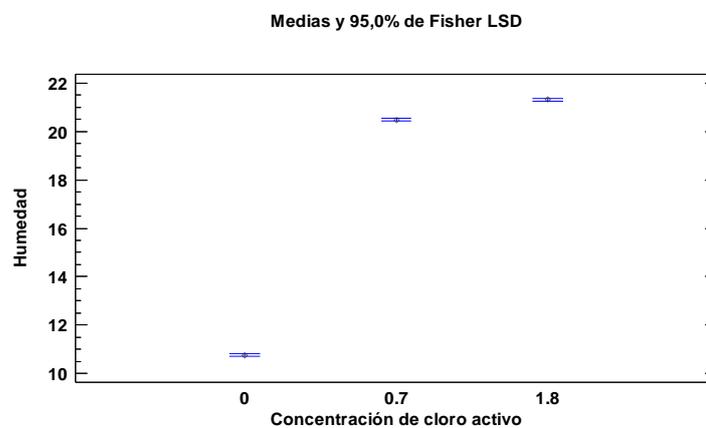
Tabla 9. Análisis proximal de almidón nativo y modificado

Composición proximal (%)	Concentración de cloro activo (%)		
	0	0.7	1.8
Fibra	1.61±0.147986 ^a	0.04±0 ^b	0.02±0 ^b
Grasa	0.0233333±0.0057735 ^a	0.02±0 ^a	0.19±0.01 ^b
Ceniza	1.26±0.0173205 ^a	0.01±0 ^b	0.01±0 ^b
Carbohidrato	84.3967±0.225019 ^a	36.9967±0.70614 ^b	30.9±0.710422 ^c
Proteína	1.93667±0.106927 ^a	2.22667±0.122202 ^a	7.64333±0.398037 ^b
Humedad	10.7733±0.0351188 ^a	20.4767±0.0702377 ^b	21.3033±0.0404145 ^c
pH	5.801±0.0242487 ^a	6.34667±0.0208167 ^b	5.51667±0.0152753 ^c

Media de tres determinaciones en diferentes niveles ± desviación estándar. Letras que no son iguales en concentración de cloro activo; 0, 0.7, y 1.8%, muestran diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

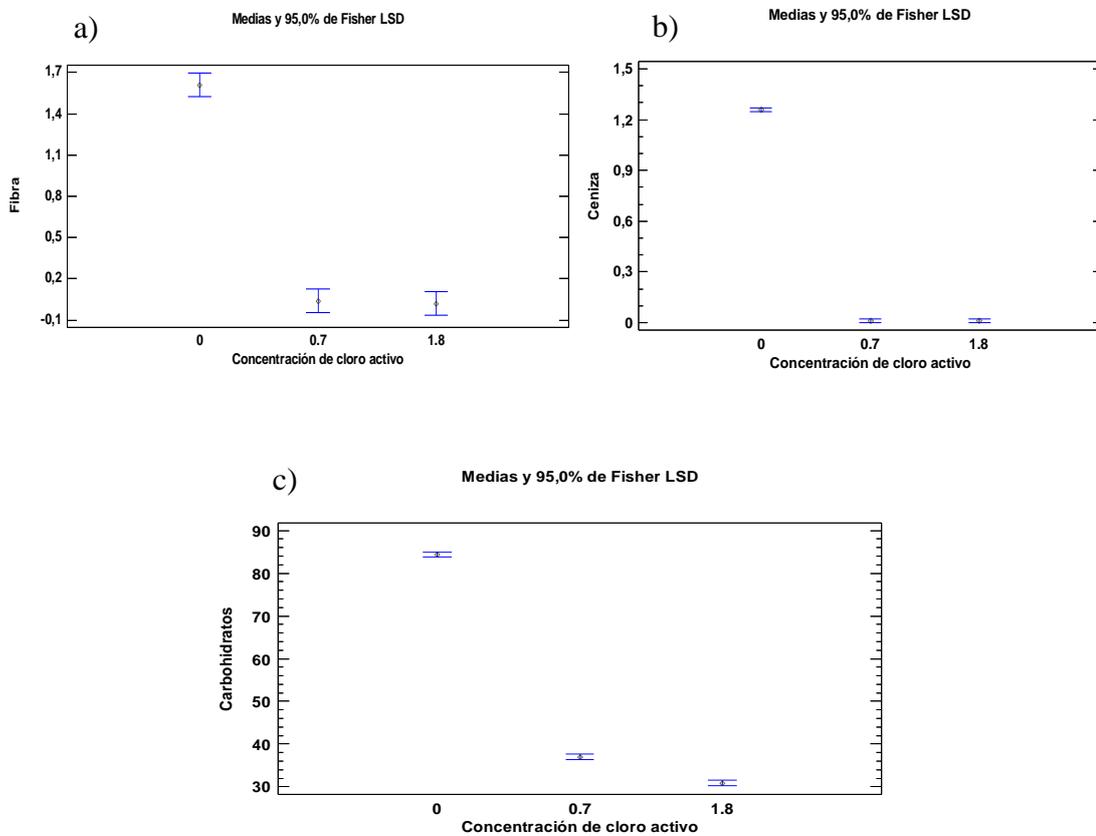
En la tabla 9 se evidenció que existe diferencia significativa en todos los componentes del almidón: fibra, grasa, ceniza, carbohidrato, proteína, humedad y pH ($p < 0.05$); se evidencia un incremento en el valor de los componentes de humedad y proteína (figura 6); sin embargo se registró una disminución en fibra, ceniza y carbohidrato (figura 7); no obstante el valor de pH aumenta cuando se somete el almidón a una oxidación con la concentración de 0.% de cloro activo, en tanto que, disminuye a la concentración de 1.8% de cloro activo (ver figura 8).

Figura 6. Contenido de Humedad

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

La humedad de los almidones modificados, a las concentraciones de cloro activo 0.7% y 1.8%, aumentan significativamente con respecto al almidón nativo (ver figura 6), resultado que depende en gran medida del método, grado de secado y la humedad de la atmósfera circundante ⁷³.

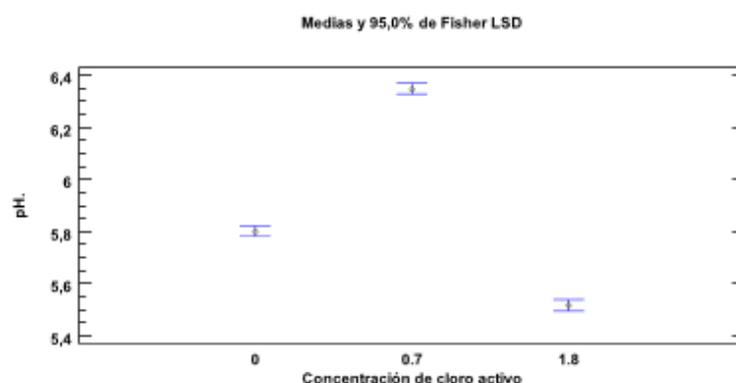
Figura 7. a) Contenido de fibra, b) Contenido de ceniza, y, c) Contenido de carbohidratos.



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

La cantidad de la fibra, ceniza y carbohidrato de los almidones químicamente modificados se reduce en comparación con el almidón nativo (ver figuras 7, 8 y 9), debido a las degradaciones químicas que toma lugar en el proceso oxidación por hipoclorito de sodio en la molécula de almidón, estos resultados son similares a lo expuesto por Koteswara, Chagam et al y Lawal, Olayide ^{73,74}.

Figura 8. Medición de pH



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

El valor de pH del almidón modificado, a la concentración de 1.8%, refleja una disminución respecto al almidón nativo; debido a su elevada concentración, y, en gran medida a la disociación de grupos carboxilos a lo largo del polisacárido, dando a lugar un almidón con mayor acidez ⁷⁵.

3.3 Evaluación de las propiedades funcionales de almidón nativo y oxidado a diferentes concentraciones de cloro activo

De acuerdo con el estadístico de Shapiro-Wilk se cumple con distribución normal ($p > 0.05$), así como también la prueba de Levene ($p > 0.05$) que identifica la varianza, posteriormente se procedió a realizar (ANOVA) (tabla 10).

Tabla 10. Propiedades funcionales del almidón nativo y oxidado

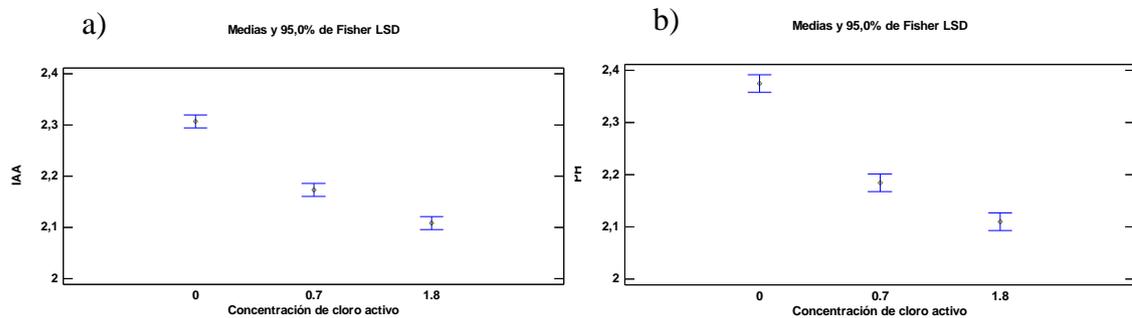
Concentración de cloro activo (%)	IAA	ISA	PH
	(g de almidón insoluble / g de muestra)	(g de almidón soluble / g de muestra)	(g de almidón insoluble/g de muestra - soluble)
0	2.30745±0.00887 ^a	0.0167567±0.000682447 ^a	2.37514±0.0203428 ^a
0.7	2.1732±0.019688 ^b	0.0287733±0.00209939 ^b	2.18397±0.0195296 ^b
1.8	2.10824±0.00405415 ^c	0.03768±0.00137546 ^c	2.11012±0.00744595 ^c

Media de tres determinaciones en diferentes niveles ± desviación estándar. Diferentes letras a, b, c, en la misma columna de IAA, ISA, y PH, indican diferencias estadísticas significativas debido a la oxidación ($p < 0.05$).

Fuente: Elaboración propia.

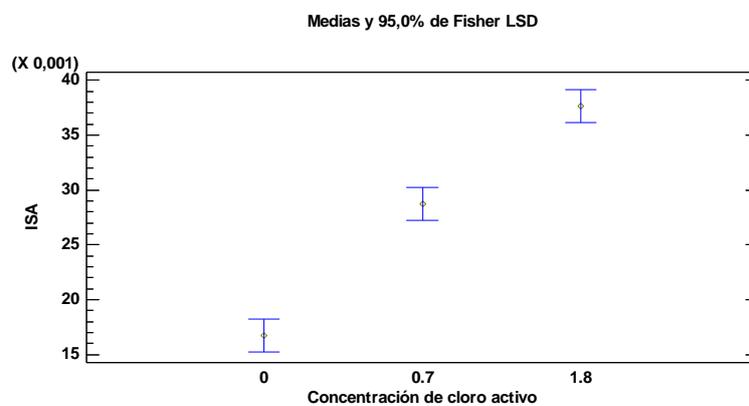
Se observó que el aumento de los niveles de cloro activo provoca diferencias significativas ($p < 0.05$), evidenciándose una disminución en el índice de absorción de agua y Poder de hinchamiento (ver figura 9), mientras que aumenta el índice de solubilidad (ver figura 10).

Figura 9. a) Índice de absorción en agua, y b) Poder de hinchamiento



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Figura 10. Índice de solubilidad en agua



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Las propiedades funcionales de los almidones dependen en del contenido de amilosa, debido a que es el responsable de afectar al poder de hinchamiento, solubilidad y formación de gel. La amilosa en almidones oxidados decrece conforme aumenta la concentración de hipoclorito de sodio, esto se debe a que la estructura lineal y disposición de esta molécula la hace susceptible a la degradación oxidativa ⁷⁶.

En la tabla 10 se muestra una reducción en el contenido del poder de hinchamiento mientras que la solubilidad incrementa, los resultados fueron similares a los encontrados por Sanchez M. et al y Kaur, Maninder et al. ^{76,77}, la reducción del poder de hinchamiento

puede atribuirse a la desintegración estructural de los gránulos de almidón durante la reacción oxidativa resultando en la disminución de la capacidad de retener agua y aumentando progresivamente la solubilidad mientras aumenta la concentración de cloro activo. En el almidón nativo se observa una mayor capacidad de absorción de agua en referencia a los almidones oxidados, podría explicarse que debido a la estructura molecular del almidón nativo tiene el mecanismo de fácil movilidad de sus componentes por la gelatinización y retrogradación ⁷⁸.

3.4 Propiedades físicas y de barrera en películas de almidón oxidado y MCC

Las propiedades físicas y de barrera de las películas compuestas de almidón oxidado y MCC, se evaluaron en base a un diseño factorial multinivel 2², los resultados obtenidos se presentan en la tabla 11.

Tabla 11. Tratamientos para elaboración de películas

Tra.	Glicerol (% p/v)	MCC (% p/v)	Cont. Humedad (%)	Solubilidad (%)	PVA (g mm-1 h-1 Pa-1)
1	2.5	0.05	8.365±0.035	20.01916±0.12387	4.54854E-08±2,031E-10
2	2.5	0.1	7.955±0.045	19.43006±0.021315	4.48677E-08±6,591E-10
3	1.5	0.1	7.295±0.005	16.76509±0.02759	3.30875E-08±4,081E-10
4	1.5	0.05	7.33±0.19	18.66272±0.286	3.89812E-08±1,8745E-10
5	2.5	0.1	7.875±0.125	19.07186±0.33714	4.33961E-08±1,307E-10
6	2.5	0.05	8.355±0.045	20.15688±0.26188	4.54106E-08±1,2825E-10
7	1.5	0.05	7.32±0.2	17.92647±0.022535	3.93687E-08±5,7495E-10
8	1.5	0.1	7.085±0.025	16.02947±0.00048	3.36949E-08±1,9925E-10

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.1 Contenido de humedad

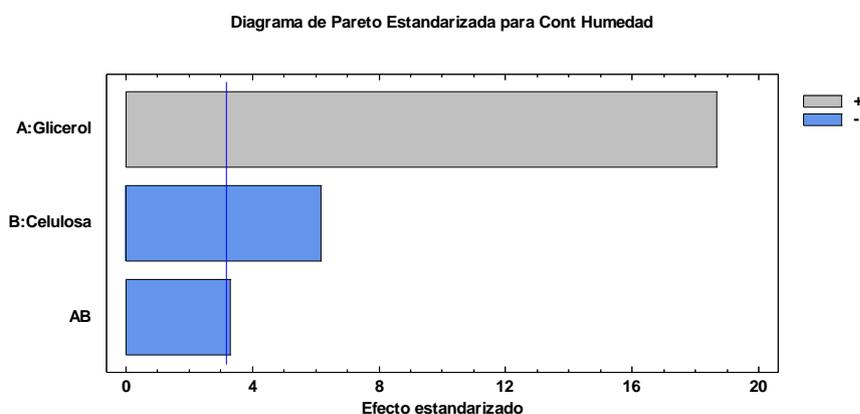
Para analizar el porcentaje de humedad en las películas, se procedió al análisis del ANOVA, producto del diseño factorial multinivel aplicado, como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Análisis de varianza para contenido de humedad

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Glicerol	1.5488	1	1.548	348.37	0.0003
B: MCC	0.1682	1	0.1682	37.83	0.0086
AB	0.04805	1	0.04805	10.81	0.0462
bloques	0.0120125	1	0.0120125	2.70	0.1988
Error total	0.0133375	3	0.00444583		
Total (corr.)	1.7904	7			

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

De acuerdo con el estudio, los factores A y B inciden en el porcentaje de humedad de las películas ($p < 0.05$), siendo el glicerol el factor más significativo (figura 11), esto quiere decir que, a mayor porcentaje de plastificante en la formulación, existe un aumento en el porcentaje de humedad, mientras que el aumento del porcentaje de MCC provoca la disminución de la humedad, resultados similares fueron presentados por Edhirej et al.⁷⁹, y Chen et al.⁸⁰, en estudios de películas de almidón de yuca e hidroxipropil almidón respectivamente, indicando que, las cantidades gradualmente crecientes de MCC promueven la formación de enlaces de hidrogeno entre el almidón y las moléculas de MCC, disminuyendo el valor de la humedad significativamente. Por otra parte, Ramya et al.⁸¹, y Maulida et al.⁸², según su estudio de películas en base a almidón de semilla de mango y de cascara de yuca, respectivamente, mencionan que, la higroscopicidad de las películas compuestas con grandes cantidades de MCC es pobre, debido a la menor hidrofilia de la MCC en comparación con el glicerol y el almidón oxidado.

Figura 11. Diagrama de Pareto estandarizado para contenido de humedad

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

De acuerdo con el experimento desarrollado, el modelo de regresión (tabla 13), Existe una R-cuadrada de 99.2551% y una R-cuadrada (ajustada por g.l.) de 98.2618%.

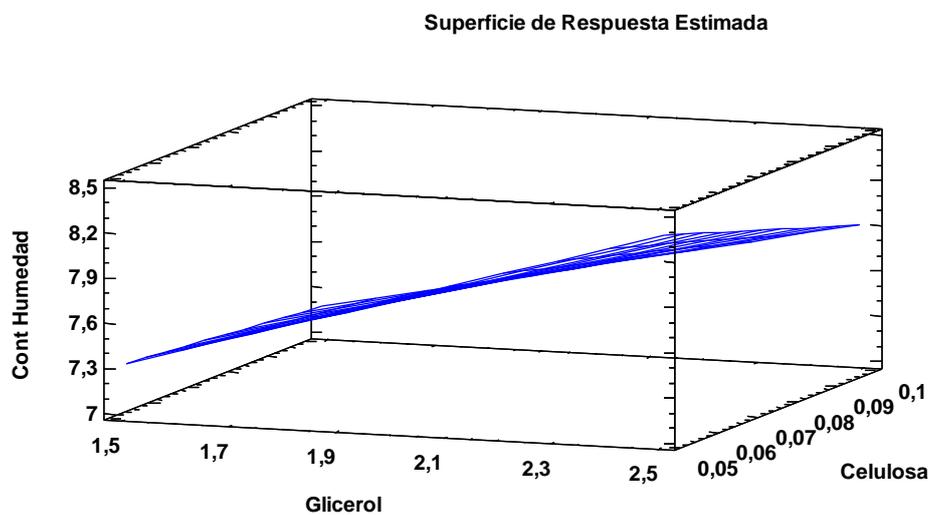
Tabla 13. Modelo ajustado para contenido de humedad

	$\% \text{Humedad} = 5.4425 + 1.345 * \% \text{Glicerol} +$	
Porcentaje de	$6.6 * \% \text{Celulosa} - 6.2 * \% \text{Glicerol} * \% \text{Celulosa}$	
humedad	R-cuadrada	R-cuadrada (ajustada por g.l.)
	99.2551%	98.2618%

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama superficie respuesta (figura 12), se muestra la interacción entre el porcentaje de glicerol y MCC, evidenciando la afectación sobre el porcentaje de humedad, de modo que, los porcentajes óptimos de glicerol (1.5% p/v) y celulosa (0.1% p/v) disminuyen el contenido de humedad en la película (tabla 14).

Figura 12. Diagrama superficie respuesta para contenido de humedad



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Tabla 14. Modelo de optimización para minimizar el porcentaje de humedad

Factor	Baja	Alto	Optimo
Glicerol	1.5	2.5	1.5
MCC	0.05	0.1	0.1

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

3.4.2 Solubilidad

Para analizar el porcentaje de solubilidad en las películas, se procedió al análisis del ANOVA, producto del diseño factorial multinivel aplicado, como se muestra en la tabla 15.

Tabla 15. Análisis de varianza para el porcentaje de solubilidad

Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Glicerol	10.7978	1	10.7978	125.93	0.0015
B: MCC	3.7384	1	3.7384	43.60	0.0071
AB	0.56207	1	0.56207	6.56	0.0823
bloques	0.358006	1	0.38006	4.18	0.1336
Error total	0.257231	3	0.0857438		
Total (corr.)	15.7135	7			

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

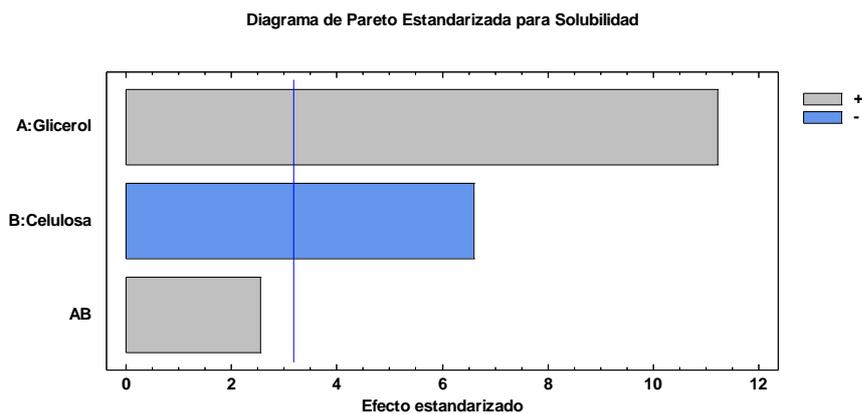
De acuerdo con el estudio, los factores A y B inciden en el porcentaje de solubilidad de las películas compuestas de almidón oxidado y MCC ($p < 0.05$), siendo el glicerol el factor más significativo (figura 13), esto quiere decir que, a mayor porcentaje de plastificante en la formulación, existe un aumento en la solubilidad de la película, mientras que el aumento del porcentaje de MCC provoca la disminución de la solubilidad. De acuerdo con Basiak et al,⁸³ los enlaces de hidrogeno que estabilizan la red de almidón se rompen, lo que reduce la cohesión de la matriz de almidón, aumentando la solubilidad de la película, obteniendo un ligero aumento en la solubilidad al incrementar el porcentaje de glicerol.

Acorde al estudio en películas elaboradas a partir de almidón de cebada y MCC, presentado por El Halal et al.⁸⁴, el aumento de la solubilidad en agua de las películas de almidón oxidado, puede ser el resultado de la inclusión de grupos carboxilo en la cadena de almidón, lo que produce fuerzas de repulsión entre el polímero permitiendo una mayor movilidad del agua. Por otro lado, Bruni et al.⁸⁵, expresan que, la MCC en las películas de almidón promueve la disminución de la solubilidad en agua, estos autores atribuyen

estos resultados a una menor higroscopicidad de la MCC en relación con el almidón. Además, la MCC interactúa con los sitios hidrofílicos del almidón, disminuyendo la hidrofilia en la matriz polimérica del mismo.

Por otra parte, Dao et al. ⁸⁶, de acuerdo a su estudio de almidón de maíz, explican que, la reducción de la solubilidad en agua de las películas de almidón oxidado puede atribuirse al aumento de las interacciones entre las moléculas de amilosa, así como a los fuertes enlaces intramoleculares promovidos por la oxidación del almidón, lo que reduce la capacidad de la película para absorber agua.

Figura 13. Diagrama de Pareto estandarizado para porcentaje de solubilidad



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

De acuerdo con el experimento desarrollado, el modelo de regresión (tabla 16), Existe una R-cuadrada de 98,363% y una R-cuadrada (ajustada por g.l.) de 96,1803%.

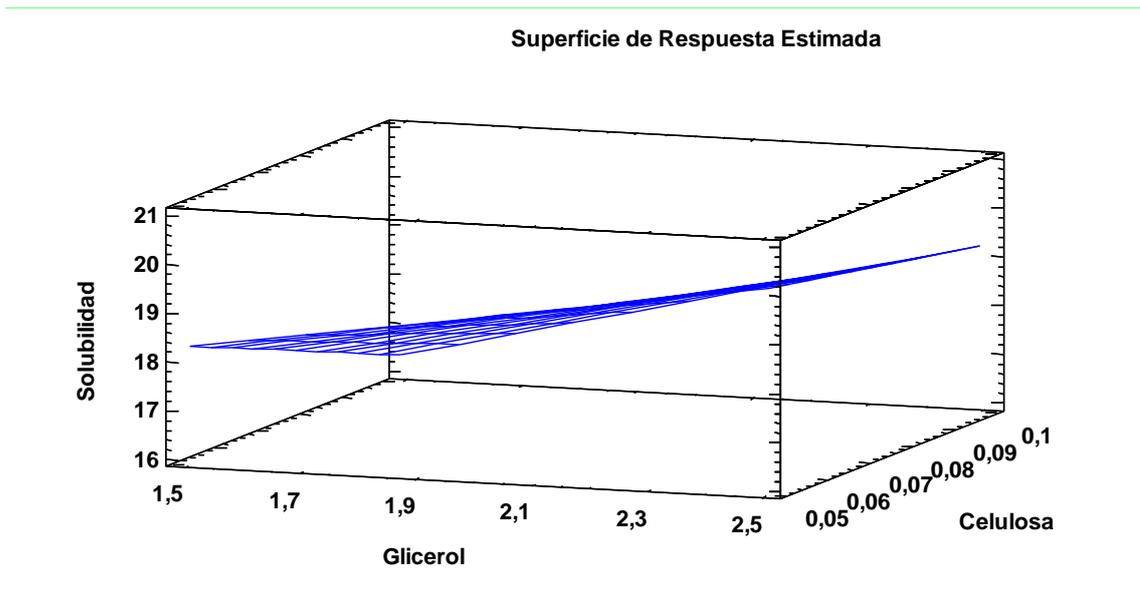
Tabla 16. Modelo ajustado para porcentaje de solubilidad

	$\% \text{Solubilidad} = 19.0922 + 0.73317 * \% \text{Glicerol} -$	
Porcentaje de solubilidad	$69.7539 * \% \text{Celulosa} + 21.2051 * \% \text{Glicerol} * \% \text{Celulosa}$	
	R-cuadrada	R-cuadrada (ajustada por g.l.)
	98.363%	96.1803%

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama superficie respuesta (figura 14), se muestra la interacción entre el porcentaje de glicerol y MCC, evidenciando la afectación sobre el porcentaje de solubilidad, de modo que, los porcentajes óptimos de glicerol (1.5% p/v) y celulosa (0.1% p/v) disminuyen el porcentaje de solubilidad en la película (tabla 17).

Figura 14. Diagrama superficie respuesta para porcentaje de solubilidad



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Tabla 17. Modelo de optimización para minimizar el porcentaje de solubilidad

Factor	Baja	Alto	Óptimo
Glicerol	1.5	2.5	1.5
MCC	0.05	0.1	0.1

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

3.4.3 Permeabilidad al vapor de agua (PVA)

Para analizar la permeabilidad al vapor de agua en las películas, se procedió al análisis del ANOVA, producto del diseño factorial multinivel aplicado, como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18. Análisis de varianza para PVA

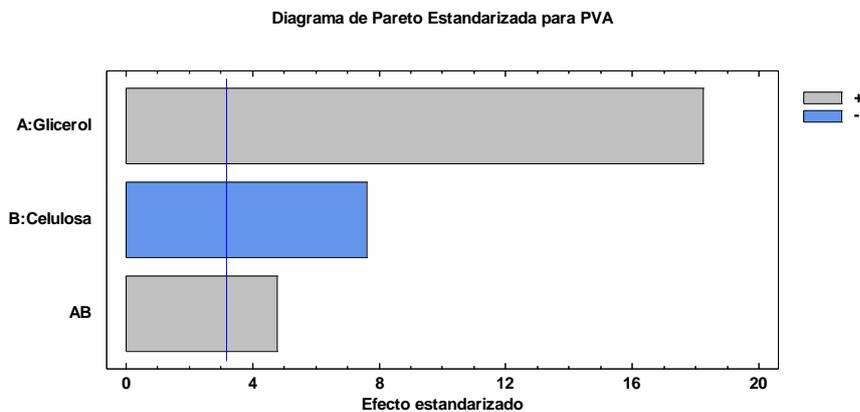
Fuente	Suma de cuadrados	Gl	Cuadrado medio	Razón-F	Valor-P
A: Glicerol	1.44734	1	1.44734	332.18	0.0004
B: MCC	0.252039	1	0.252039	57.85	0.0047
AB	0.0997995	1	0.0997995	22.91	0.0173
bloques	0.00038019	1	0.00038019	0.09	0.7870
Error total	0.0130713	3	0.00435709		
Total (corr.)	1.81263	7			

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

En el diagrama de Pareto (figura 15) se muestra que es significativo las concentraciones de glicerol, MCC y la combinación de ambos en la formulación de las películas. La adición de glicerol contribuye la permeabilidad de vapor de agua (PVA) debido a la reducción de la hidrofobicidad de las películas, como resultado de la adición de un compuesto polar (grupo carbonilo); además como espaciador entre las cadenas de proteínas, disminuyendo las fuerzas intermoleculares y permitiendo una mayor movilidad de las cadenas proteicas ³⁶.

La MCC como material de refuerzo en las películas disminuye la permeabilidad de vapor de agua por motivo que este material de refuerzo en las películas es menos hidrofílico ⁸⁷. La relación AB muestra que la permeabilidad de vapor de agua en la película, se encontraron estudios similares en Argüello, Elizabeth et al ³⁶; esto se debe a que en bajas concentraciones de celulosa microcristalina impide el paso de vapor de agua pero en concentraciones mayores generalmente se forma aglomeraciones permitiendo el paso de vapor de agua ⁶⁷.

Figura 15. Diagrama de Pareto estandarizado para PVA



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

De acuerdo con el experimento desarrollado, el modelo de regresión (tabla 19), Existe una R-cuadrada de 99.2789% y una R-cuadrada (ajustada por g.l.) de 98.3174%.

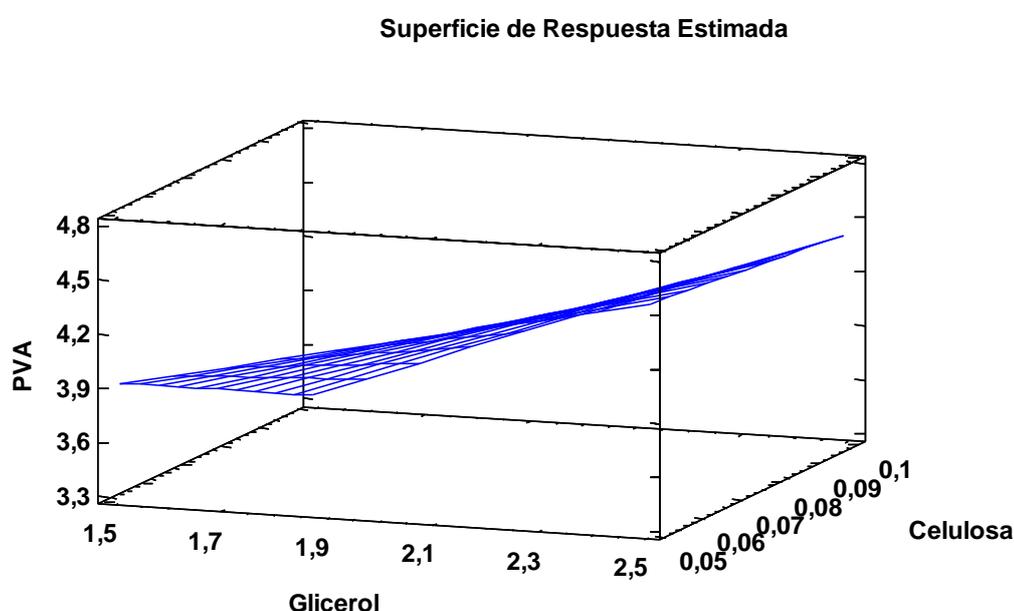
Tabla 19. Modelo ajustado para PVA

Permeabilidad al vapor de agua (PVA)	PVA = 4.22506 + 0.18054*%Glicerol –	
	24.9704*%Celulosa + 8.9353*%Glicerol*%Celulosa	
	R-cuadrada	R-cuadrada (ajustada por g.l.)
	99.2789%	98.3174%

Fuente: Elaboración propia.

En el diagrama superficie respuesta (figura 16), se muestra la interacción entre el porcentaje de glicerol y MCC, evidenciando la afectación sobre el valor de PVA, de modo que, los porcentajes óptimos de glicerol (1.5% p/v) y celulosa (0.1% p/v) disminuyen el valor de la PVA en la película (tabla 20).

Figura 16.. Diagrama superficie respuesta para PVA



Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

Tabla 20. Modelo de optimización para minimizar el valor de PVA

Factor	Baja	Alto	Optimo
Glicerol	1.5	2.5	1.5
MCC	0.05	0.1	0.1

Fuente: Tomado de Statgraphics Centurión XVI.

4. CONCLUSIONES

Se utiliza como materia prima la pulpa de banano, variedad *Cavendish*, que no cumple los requisitos de exportación, para la obtención del almidón nativo. La extracción de este almidón se realizó por el método de vía húmeda, con un rendimiento del $2.35\% \pm 0.21$. El almidón fue sometido al proceso de oxidación a dos concentraciones de cloro activo (0.7% y 1.8%), donde se determinó que a mayor concentración de cloro activo hay incremento en la formación de grupos carbonilos y carboxilos ($p < 0.05$), evidenciando un mayor grado de oxidación.

En la composición química, el cloro activo incide significativamente ($p < 0.05$), se observa que los porcentajes de humedad y proteína aumentaron; mientras que, los porcentajes de fibra, ceniza y carbohidratos disminuyeron, debido a la degradación química por el cloro activo. El valor de pH aumenta cuando se oxida el almidón nativo a la concentración de 0.7% de cloro activo y disminuye cuando se oxida a 1.8%; en consecuencia, la disociación de grupos carboxilos en el polisacárido genera un almidón con mayor acidez.

Las propiedades funcionales, entre ellas, el índice de solubilidad de agua (ISA), índice de absorción de agua (IAA) y poder de hinchamiento (PH), registran una diferencia significativa ($p < 0.05$), al incrementar la concentración de cloro activo en la oxidación. Los valores de IAA y PH disminuyen, caso contrario ocurre en el ISA; debido a que, se produce una desintegración estructural de los gránulos de almidón que facilitan la solubilidad e impiden su capacidad de retención de agua.

De acuerdo con el diseño experimental de tipo factorial 2^2 utilizado, los porcentajes de glicerol y MCC influyen significativamente en las variables respuesta de las películas ($p < 0.05$). El glicerol genera un incremento en la solubilidad, la humedad y la PVA en la matriz polimérica, por su naturaleza hidrofílica; sin embargo, la MCC produce una disminución en estas variables por su comportamiento hidrofóbico.

Los modelos de regresión obtenidos se expresan en las siguientes formulaciones, para **porcentaje de humedad** ($\%Humedad = 5.4425 + 1.345*\%Glicerol + 6.6*\%Celulosa - 6.2*\%Glicerol*\%Celulosa$), con R^2 de 99.2551% y R^2 ajustada de 98.2618%; **porcentaje de solubilidad** ($\%Solubilidad = 19.0922 + 0.73317*\%Glicerol - 69.7539*\%Celulosa + 21.2051*\%Glicerol*\%Celulosa$), con R^2 de 98,363% y R^2 ajustada de 96,1803%; y, **valor de PVA** ($PVA = 4.22506 + 0.18054*\%Glicerol - 24.9704*\%Celulosa + 8.9353*\%Glicerol*\%Celulosa$), con R^2 de 99.2789% y R^2 ajustada de 98.3174%.

Finalmente, con base en los resultados obtenidos mediante las pruebas y análisis empleados en la presente investigación se concluye, que los tratamientos T3 y T8, con concentraciones de 1.5% p/v de glicerol y 0.1% p/v de MCC, son los óptimos para la elaboración de películas a base de almidón oxidado de banano, variedad *Cavendish*.

5. RECOMENDACIONES

Utilizar otras alternativas de reactivo antioxidante, para determinar el rendimiento de extracción del almidón de banano y comparar con los resultados obtenidos al emplear el metabisulfito de sodio.

Realizar análisis que permitan cuantificar el contenido de amilosa y amilopectina en el almidón nativo y oxidado, por el efecto que tienen estos dos componentes sobre las propiedades funcionales y la temperatura de gelatinización.

Efectuar análisis de espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR), para los almidones nativos y oxidados, que permitan ratificar la formación de grupos carbonilos y carboxilos en la molécula del almidón, a diferentes concentraciones de cloro activo.

Calcular el porcentaje del material de refuerzo (MCC), con relación al peso del almidón oxidado utilizado para la formulación de las películas, ya que el exceso de MCC ocasiona aglomeraciones en la matriz polimérica.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Buteler, M. El Problema Del Plástico: ¿Qué Es La Contaminación Por Plástico y Por Qué Nos Afecta a Todos? *Desde la Patagon. Difundiendo Saberes* **2019**, 16 (28), 56–60.
- (2) Meza, P.; Quipezco, L.; Meza, V. Elaboración de Bioplásticos y Determinación de Su Biodegradabilidad-Proyecto de Laboratorio. *Rev. del Inst. Investig.* **2019**, 22 (4), 67–80.
- (3) Riera, M. A.; Maldonado, S.; Palma, R. Residuos Agroindustriales Generados En Ecuador Para La Elaboración De Bioplásticos. *Rev. Ing. Ind.* **2019**, 17 (3), 227–246. <https://doi.org/10.22320/s07179103/2018.13>.
- (4) Pertuz, Otero, Alex; Benavides, Guevara, R. Alternativa Verde: Bioplásticos Elaborados Con Biopolímeros de Origen Renovable - Revisión. *Doc. Trab. ECBTI* **2016**, No. July, 1–23. <https://doi.org/https://doi.org/10.22490/ECBTI.4793>.
- (5) Masina, N.; Choonara, Y. E.; Kumar, P.; du Toit, L. C.; Govender, M.; Indermun, S.; Pillay, V. A Review of the Chemical Modification Techniques of Starch. *Carbohydr. Polym.* **2017**, 157, 1226–1236. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2016.09.094>.
- (6) Molina, P.; Encalada, K.; Valle, V. Estudio Preliminar Del Efecto de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ En La Oxidación Del Almidón de Achira (Canna Edulis) Con Peróxido de Hidrógeno Preliminary Evaluation of the Effect of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Over the Oxidation of Achira St. *Scielo* **2017**, 39 (2), 7–12.
- (7) Raúl, C.; Bustos, B.; Pablo, J.; Sánchez, G.; Guevara, A.; Suarez, D.; Lozano, N.; Castillo, S. Propiedades, Modificaciones y Usos de Los Almidones, Con Miras a La Obtención de Películas Biodegradables. *Rev. Investig.* **2017**, 10 (2), 135–152.
- (8) Zia-ud-Din; Xiong, H.; Fei, P. Physical and Chemical Modification of Starches: A Review. *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.* **2017**, 57 (12), 2691–2705. <https://doi.org/10.1080/10408398.2015.1087379>.
- (9) Astudillo, Pardo, A. Análisis de Factibilidad Para La Elaboración de Productos Alimenticios a Partir Del Rechazo de Banano En La Provincia Del Guayas.,

Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2015.

- (10) Prado, Prado, H. Uso de La Harina de Banano En El Ecuador. *Utmach* **2016**, 1 (2), 26–37.
- (11) Cabrera, Romero, L. Estudio de Factibilidad Para El Desarrollo Agroindustrial Del Rechazo de Banano En La Provincia de El Oro., Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2019.
- (12) Li, L. F.; Ge, X. J. Origin and Domestication of Cultivated Banana. *Ecol. Genet. Genomics* **2017**, 2, 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.egg.2016.10.001>.
- (13) Navas, S. M. *TIPOS DE CONTROL PARA EL (Radopholus Similis) EN BANANO (Musa Paradisiaca)*, UNIVERSIDA.; Miladro, 2019.
- (14) Sidhu, J. S.; Zafar, T. A. Bioactive Compounds in Banana Fruits and Their Health Benefits. *Food Qual. Saf.* **2018**, 2 (4), 183–188. <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy019>.
- (15) Qamar, S.; Shaikh, A. Therapeutic Potentials and Compositional Changes of Valuable Compounds from Banana- A Review. *Trends Food Sci. Technol.* **2018**, 79, 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.06.016>.
- (16) Elayabalan, S.; Subramaniam, S.; Shobana, V. G.; Ashok Kumar, K. An Overview on Phytochemical Composition of Banana (Musa Spp.). *Int. Bimon. Indian J. Nat. Sci. www.tnsroindia.org.in ©IJONS* **2017**, 7 (42), 12408–12419.
- (17) Fida, R.; Pramafisi, G.; Cahyana, Y. Application of Banana Starch and Banana Flour in Various Food Product: A Review. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2020**, 443 (1), 38–53. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/443/1/012057>.
- (18) Escalante-Minakata, P.; Ibarra-Junquera, V.; Puente-Preciado, J. H.; Chávez-Rodríguez, A. M.; Ornelas-Paz, J. de J.; Pérez-Martínez, J. D.; Orozco-Santos, M. Optimización de La Extracción Enzimática de Jugo de Banano a Partir de Los Cultivares Enano Gigante, FHIA-17 y FHIA-23. *Univ. y Cienc.* **2013**, 29 (1), 01–09.
- (19) Campo-Arana, R. O.; Vélez-Leiton, S. M.; Barrera-Violeth, J. L. LA SIGATOKA NEGRA *Mycosphaerella Fijiensis* Morelet , EN LOS CULTIVOS DE PLATANO Y BANANO. *Fitopatol. Colomb.* **2020**, 44 (December), 61–66.

- (20) Galan, V.; Rangel, A.; Lopez, J.; Hernandez, J. B. P.; Sandoval, J.; Rocha, H. S. Propagación Del Banano: Técnicas Tradicionales, Nuevas Tecnologías e Innovaciones. *Rev. Bras. Frutic.* **2018**, *40* (4). <https://doi.org/10.1590/0100-29452018574>.
- (21) Andre, J.; Paredes, C.; Panamericana, E. A. Multiplicación in Vitro de Plátano : Revisión de Literatura Multiplicación in Vitro de Plátano : Revisión de Literatura. *Esc. Agrícola Panam. Zamor. Honduras* **2020**, *26*.
- (22) Torres, L. C.; Zamora, L. C. Benefits in Latin America and the Caribbean about Production of Cavendish AAA Banana Resistant to Black Sigatoka. *Rev. Bionatura* **2018**, *3* (4). <https://doi.org/10.21931/RB/2018.03.04.9>.
- (23) Vásquez-Castillo, W.; Racines-Oliva, M.; Moncayo, P.; Viera, W. Calidad Del Fruto y Pérdidas Poscosecha de Banano Orgánico (Musa Acuminata) En El Ecuador (Fruit Quality and Post-Harvest Losses of Organic Bananas (Musa Acuminata) in Ecuador). *Scielo* **2019**, *57–66*. <https://doi.org/doi.org/10.29019/enfoque.v10n4.545>.
- (24) Villaroel, P. G. C. V. C. Almidón Resistente: Características Tecnológicas e Intereses Fisiológicos. *Rev Chil Nutr* **2018**, *271–278*. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/s0717-75182018000400271>.
- (25) Gutierrez Montiel, E. Modificación Dual Del Almidón de Yuca: Ocidación-Esterificación, y Termoplastificación, Para La Compatibilización Con PLA". *CIQA Repos.* **2018**, *1–96*.
- (26) Herlina, M.; Yana, C.; Mohamad, D.; Giffary, P. The Properties , Modification , and Application of Banana Starch. *MDPI* **2022**, *14*, *1–20*. <https://doi.org/doi.org/10.3390/polym14153092>.
- (27) Thanyapanich, N.; Jimtaisong, A.; Rawdkuen, S. Functional Properties of Banana Starch (Musa Spp.) and Its Utilization in Cosmetics. *Molecules* **2021**, *26* (12), *1–16*. <https://doi.org/10.3390/molecules26123637>.
- (28) Bala Dhull, Senju; Malik Tany; Kaur, R. Banana Starch: Properties Illustrations and Food Applications- A Reviw. *Starch-Journal* **2021**, *1–9*. <https://doi.org/10.1002/star.202000085>.This.

- (29) Huamani, Alberto Luis; Ponce, Juan Carlos; Málaga, J. Optimización Del Proceso de Cocción de Quinoa Utilizando El Diseño 3k y La Función de Deseabilidad: Grado de Gelatinización, Índice de Absorción de Agua, Índice de Solubilidad y Desprendimiento de Cotiledones. *Sci. Agropecu.* **2022**, No. Dx, 1–13.
- (30) Badui Dergal, S. *Química de Los Alimentos - QUIMICA-DE-LOS-ALIMENTOS-4ta-Edicion.Pdf*, Cuarta.; Pearson: México, 2006.
- (31) Carhuallay, Oscar; Cerna, Ever; Polo, Jorge; Sandoval, H. Efecto de La Concentración de Hipoclorito de Sodio y Tiempo de Oxidación Sobre El Grado de Sustitución de Grupos Carboxilo, Índice de Absorción de Agua y Temperatura de Gelatinización de Almidón de Achira (*Canna Edulis Ker*). *Agroindustrial Sci.* **2020**, No. 1, 165–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.07>.
- (32) Molina, P.; Encalada, K.; Valle, V. Estudio Preliminar Del Efecto de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ En La Oxidación Del Almidón de Achira (*Canna Edulis*) Con Peróxido de Hidrógeno Preliminary Evaluation of the Effect of $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ and $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Over the Oxidation of Achira St. *Esc. Politécnica Nac.* **2017**, 39 (2), 7–12.
- (33) Vanier, N. L.; El Halal, S. L. M.; Dias, A. R. G.; Da Rosa, Z. E. Molecular Structure, Functionality and Applications of Oxidized Starches: A Review. *Food Chem.* **2017**, 221, 1546–1559. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2016.10.138>.
- (34) Aparecida, M.; Teixeira, V.; Garcia, C. F.; Augusto, A.; Faraco, G. Maria Aparecida Vieira Teixeira GARCIA 1 *, Cleverson Fernando GARCIA 2 , André Augusto Gomes FARACO 3 1 -. *Wiley Online Libr.* **2020**, 72 (7–8), 44. <https://doi.org/10.1002/star.201900270>.This.
- (35) Haq, F.; Yu, H.; Wang, L.; Teng, L.; Haroon, M.; Khan, R. U.; Mehmood, S.; Bilal-Ul-Amin; Ullah, R. S.; Khan, A.; Nazir, A. Advances in Chemical Modifications of Starches and Their Applications. *Carbohydr. Res.* **2019**, 476, 12–35. <https://doi.org/10.1016/j.carres.2019.02.007>.
- (36) Argüello-García, E.; Solorza-Feria, J.; Rendón-Villalobos, J. R.; Rodríguez-González, F.; Jiménez-Pérez, A.; Flores-Huicochea, E. Properties of Edible Films Based on Oxidized Starch and Zein. *Int. J. Polym. Sci.* **2014**, 2014.

<https://doi.org/10.1155/2014/292404>.

- (37) Torres, González; García Robles; Frausto, Pradilla; Rodriguez, B. Preparacion y Caracterizacion de Almidon Modificado Para Elaborar a Futuro Biopelículas Para Productos Hortofrutícolas. In *XX Congreso Internacional Inocuidad de Alimentos*; 2018; pp 1–4.
- (38) Carhuallay, Oscar; Cerna, Ever; Polo, Jorge; Sandoval, H. Efecto de La Concentración de Hipoclorito de Sodio y Tiempo de Oxidación Sobre El Grado de Sustitución de Grupos Carboxilo, Índice de Absorción de Agua y Temperatura de Gelatinización de Almidón de Achira (*Canna Edulis Ker*). *Agroindustrial Sci.* **2020**, No. 1, 165–173. <https://doi.org/https://doi.org/10.17268/agroind.sci.2020.02.07>.
- (39) Abdul Khalil, H. P. S.; Banerjee, A.; Saurabh, C. K.; Tye, Y. Y.; Suriani, A. B.; Mohamed, A.; Karim, A. A.; Rizal, S.; Paridah, M. T. Biodegradable Films for Fruits and Vegetables Packaging Application: Preparation and Properties. *Food Eng. Rev.* **2018**, 10 (3), 139–153. <https://doi.org/10.1007/s12393-018-9180-3>.
- (40) Henning, F. G.; Ito, V. C.; Demiate, I. M.; Lacerda, L. G. Non-Conventional Starches for Biodegradable Films: A Review Focussing on Characterisation and Recent Applications in Food. *Carbohydr. Polym. Technol. Appl.* **2021**, 100157. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2021.100157>.
- (41) Oluwasina, O. O.; Olaleye, F. K.; Olusegun, S. J.; Oluwasina, O. O.; Mohallem, N. D. S. Influence of Oxidized Starch on Physicomechanical, Thermal Properties, and Atomic Force Micrographs of Cassava Starch Bioplastic Film. *Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, 135, 282–293. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.150>.
- (42) Vinod, A.; Sanjay, M. R.; Suchart, S.; Jyotishkumar, P. Renewable and Sustainable Biobased Materials: An Assessment on Biofibers, Biofilms, Biopolymers and Biocomposites. *J. Clean. Prod.* **2020**, 258. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120978>.
- (43) Pirsá, S.; Aghbolagh Sharifi, K. A Review of the Applications of Bioproteins in the Preparation of Biodegradable Films and Polymers. *J. Chem. Lett.* **2020**, 1 (2), 47–58. <https://doi.org/10.22034/JCHEMLETT.2020.111200>.
- (44) Sondari, D.; Falah, F.; Suryaningrum, R.; Sari, F. P.; Sari, F. P.; Septefani, A. A.;

- Septefani, A. A.; Restu, W. K.; Restu, W. K.; Sampora, Y.; Sampora, Y. Biofilm Based on Modified Sago Starch: Preparation and Characterization. *Reaktor* **2019**, *19* (3), 125–130. <https://doi.org/10.14710/reaktor.19.3.125-130>.
- (45) Lescano, M.; Vásquez, N.; Tarrillo, S.; Yoplac, I.; Velásquez-Barreto, F. F. Development and Optimization of Biofilms Made from Potato or Arracacha Starch. *Starch/Staerke* **2021**, *73* (9–10), 1–8. <https://doi.org/10.1002/star.202100075>.
- (46) Ventura, Cruz, S.; Tecante, A. Nanocellulose and Microcrystalline Cellulose from Agricultural Waste: Review on Isolation and Application as Reinforcement in Polymeric Matrices. *Food Hydrocoll.* **2021**, *118* (December 2020), 106771. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2021.106771>.
- (47) Cazón, P.; Velazquez, G.; Ramírez, J. A.; Vázquez, M. Polysaccharide-Based Films and Coatings for Food Packaging: A Review. *Food Hydrocoll.* **2017**, *68*, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>.
- (48) Corrêa, V. T.; Oliveira, M. C.; Marangoni, J. L.; Adnan, I. S.; Pioli, V. R. Essential Oils as Additives in Active Starch-Based Food Packaging Films: A Review. *Int. J. Biol. Macromol.* **2021**, *182*, 1803–1819. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.170>.
- (49) Maghsoudi, K.; Vazirinasab, E.; Momen, G.; Jafari, R. Advances in the Fabrication of Superhydrophobic Polymeric Surfaces by Polymer Molding Processes. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, *59* (20), 9343–9363. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00508>.
- (50) Abbas, M.; Buntinx, M.; Deferme, W.; Peeters, R. (Bio)Polymer/ZnO Nanocomposites for Packaging Applications: A Review of Gas Barrier and Mechanical Properties. *Nanomaterials* **2019**, *9* (10), 1–14. <https://doi.org/10.3390/nano9101494>.
- (51) Lauer, M. K.; Smith, R. C. Recent Advances in Starch-Based Films toward Food Packaging Applications: Physicochemical, Mechanical, and Functional Properties. *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.* **2020**, *19* (6), 3031–3083. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12627>.
- (52) Bangar, S. P.; Purewal, S. S.; Trif, M.; Maqsood, S.; Kumar, M.; Manjunatha, V.;

- Rusu, A. V. Functionality and Applicability of Starch-based Films: An Eco-friendly Approach. *Foods* **2021**, *10* (9), 1–24. <https://doi.org/10.3390/foods10092181>.
- (53) Thakur, R.; Pristijono, P.; Scarlett, C. J.; Bowyer, M.; Singh, S. P.; Vuong, Q. V. Starch-Based Films: Major Factors Affecting Their Properties. *Int. J. Biol. Macromol.* **2019**, *132*, 1079–1089. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.03.190>.
- (54) Oluwasina, O. O.; Falola, T.; Wahab, O. J.; Idahagbon, N. B. Research Article Enhancement of Physical and Mechanical Properties Of. *Strach* **2017**, *Volumen 70*, 1–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/star.201700148>.
- (55) Aye Mon Thida Nyo | Arnt Win | Baby San Chit Su | Mar Pi Myint | Phyu Phyu Khaing. Study on Characterization of Various Biofilms Prepared by Starch Isolated from Maranta Arundinacea L. *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.* **2019**, *3* (5), 990–995. <https://doi.org/https://doi.org/10.31142/ijtsrd26588>.
- (56) Tesfaye, T.; Sithole, B.; Ramjugernath, D. Preparation, Characterization and Application of Keratin Based Green Biofilms from Waste Chicken Feathers. *Int. J. Chem. Sci.* **2018**, *16* (3), 1–16. <https://doi.org/10.21767/0972-768x.1000281>.
- (57) Venkatesa , Prabhu, S.; Hemalatha, P.; Tizazu, Belachew, Z.; Gosu, A. Development of Teff-Starch Based Edible Film: Mechanical and Optical Properties. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2021**, *1091* (1), 012050. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1091/1/012050>.
- (58) Jaramillo, C. M.; González Seligra, P.; Goyanes, S.; Bernal, C.; Famá, L. Biofilms Based on Cassava Starch Containing Extract of Yerba Mate as Antioxidant and Plasticizer. *Starch/Staerke* **2015**, *67* (9–10), 780–789. <https://doi.org/10.1002/star.201500033>.
- (59) Warsiki, E.; Bawardi, J. T. Assessing Mechanical Properties and Antimicrobial Activity of Zinc Oxide-Starch Biofilm. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* **2018**, *209* (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/209/1/012003>.
- (60) Ceballos, R. L.; Ochoa-Yepes, O.; Goyanes, S.; Bernal, C.; Famá, L. Effect of Yerba Mate Extract on the Performance of Starch Films Obtained by Extrusion and Compression Molding as Active and Smart Packaging. *Carbohydr. Polym.*

- 2020, 244. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116495>.
- (61) Barraza-Jáuregui, G; Siche, R. Almidón de Semilla de Palta: Optimización Del Índice de Blancura Durante El Proceso de Extracción. *Agroindustrial Sci.* **2013**, 2 (1), 81–85. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17268/agroind.sci.2021.01.10>.
- (62) Meza R., Paola; Quipuzco U., Lawrence; Meza C., V. ELABORACIÓN DE BIOPLÁSTICOS Y DETERMINACIÓN DE SU BIODEGRADABILIDAD - PROYECTO DE LABORATORIO ELABORATION. *Revista Del Instituto de Investigación. Rev. del Inst. Investig. FIGMMG-UNMSM* **2019**, 22, 67–80.
- (63) DOF. Norma Mexicana NMX-K-281-SCFI-2012 Concentración De Hipoclorito De Sodio En Solución. *D. Of. la Fed.* **2012**.
- (64) Wei, B.; Qi, H.; Wang, Z.; Bi, Y.; Zou, J.; Xu, B.; Ren, X.; Ma, H. The Ex-Situ and in-Situ Ultrasonic Assisted Oxidation of Corn Starch: A Comparative Study. *Ultrason. Sonochem.* **2020**, 61 (November 2019), 104854. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104854>.
- (65) Zhou, F.; Liu, Q.; Zhang, H.; Chen, Q.; Kong, B. Potato Starch Oxidation Induced by Sodium Hypochlorite and Its Effect on Functional Properties and Digestibility. *Int. J. Biol. Macromol.* **2016**, 84, 410–417. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.12.050>.
- (66) Salcedo-Mendoza, J. G.; Rodriguez-Lora, M. C.; Figueroa-Florez, J. A. Effect of Acetylation on Structural and Functional Properties. *Rev. Mex. Ing. Química* **2016**, 15 (3), 787–796.
- (67) Othman, S. H.; Majid, N. A.; Tawakkal, I. S. M. A.; Basha, R. K.; Nordin, N.; Shapi'i, R. A. Tapioca Starch Films Reinforced with Microcrystalline Cellulose for Potential Food Packaging Application. *Food Sci. Technol.* **2019**, 39 (3), 605–612. <https://doi.org/10.1590/fst.36017>.
- (68) Riaz, A.; Lei, S.; Akhtar, H. M. S.; Wan, P.; Chen, D.; Jabbar, S.; Abid, M.; Hashim, M. M.; Zeng, X. Preparation and Characterization of Chitosan-Based Antimicrobial Active Food Packaging Film Incorporated with Apple Peel Polyphenols. *Int. J. Biol. Macromol.* **2018**, 114 (2017), 547–555. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.03.126>.

- (69) Adjouman, Y.; Nindjin, C.; Tetchi, F.; Dalcq, A.; Amani, N.; Sindic, M. Water Vapor Permeability of Edible Films Based on Improved Cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) Native Starches. *J. Food Process. Technol.* **2017**, *08* (03). <https://doi.org/10.4172/2157-7110.1000665>.
- (70) Kringel, D. H.; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. da R.; Gandra, E. A. Fruit Wastes as Promising Sources of Starch: Extraction, Properties, and Applications. *Starch/Staerke* **2020**, *72* (3–4). <https://doi.org/10.1002/star.201900200>.
- (71) Naknaen, P.; Tobkaew, W.; Chaichaleom, S. Properties of Jackfruit Seed Starch Oxidized with Different Levels of Sodium Hypochlorite. *Int. J. Food Prop.* **2017**, *20* (5), 979–996. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1191868>.
- (72) Halal, S. L. M. El; Colussi, R.; Pinto, V. Z.; Bartz, J.; Radunz, M.; Carreño, N. L. V.; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. D. R. Structure, Morphology and Functionality of Acetylated and Oxidised Barley Starches. *Food Chem.* **2015**, *168*, 247–256. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.07.046>.
- (73) Lawal, O. S. Composition, Physicochemical Properties and Retrogradation Characteristics of Native, Oxidised, Acetylated and Acid-Thinned New Cocoyam (*Xanthosoma Sagittifolium*) Starch. *Food Chem.* **2004**, *87* (2), 205–218. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2003.11.013>.
- (74) Koteswara, Reddy, C.; Vidya, P. V.; Haripriya, S. Effect of Chemical Modification on Molecular Structure and Functional Properties of Musa AAB Starch. *Int. J. Biol. Macromol.* **2015**, *81*, 1039–1045. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2015.09.049>.
- (75) Garrido, L. H.; Schnitzler, E.; Zortéa, M. E. B.; de Souza Rocha, T.; Demiate, I. M. Physicochemical Properties of Cassava Starch Oxidized by Sodium Hypochlorite. *J. Food Sci. Technol.* **2014**, *51* (10), 2640–2647. <https://doi.org/10.1007/s13197-012-0794-9>.
- (76) Sánchez-Rivera, M. M.; García-Suárez, F. J. L.; Velázquez Del Valle, M.; Gutierrez-Meraz, F.; Bello-Pérez, L. A. Partial Characterization of Banana Starches Oxidized by Different Levels of Sodium Hypochlorite. *Carbohydr. Polym.* **2005**, *62* (1), 50–56. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2005.07.005>.
- (77) Kaur, M.; Bhullar, G. K. Partial Characterization of Tamarind (*Tamarindus Indica* L.) Kernel Starch Oxidized at Different Levels of Sodium Hypochlorite. *Int. J.*

Food Prop. **2016**, *19* (3), 605–617.
<https://doi.org/10.1080/10942912.2015.1038722>.

- (78) Reddy, C. K.; Haripriya, S.; Vidya, P. V. Morphology, Physico-Chemical and Functional Characteristics of Starches from Different Banana Cultivars. *J. Food Sci. Technol.* **2015**, *52* (11), 7289–7296. <https://doi.org/10.1007/s13197-015-1809-0>.
- (79) Edhirej, A.; Sapuan, S. M.; Jawaid, M.; Zahari, N. I. Cassava/Sugar Palm Fiber Reinforced Cassava Starch Hybrid Composites: Physical, Thermal and Structural Properties. *Int. J. Biol. Macromol.* **2017**, *101*, 75–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.03.045>.
- (80) Chen, J.; Long, Z.; Wang, J.; Wu, M.; Wang, F.; Wang, B.; Lv, W. Preparation and Properties of Microcrystalline Cellulose/Hydroxypropyl Starch Composite Films. *Cellulose* **2017**, *24* (10), 4449–4459. <https://doi.org/10.1007/s10570-017-1423-6>.
- (81) Ramya, K.; Waware, A.; Manoj, K.; Radhashyam, G. Design and Development of Poly Lactic Acid (PLA)/ Mango Seed Kernel Starch Composites Films. *J. Sci. Tech. Res.* **2021**, No. December 2018.
- (82) Maulida; Siagian, M.; Tarigan, P. Production of Starch Based Bioplastic from Cassava Peel Reinforced with Microcrystalline Cellulose Avicel PH101 Using Sorbitol as Plasticizer. *J. Phys. Conf. Ser.* **2016**, *710* (1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012012>.
- (83) Basiak, E.; Lenart, A.; Debeaufort, F. How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based Edible Films. *Polymers (Basel)*. **2018**, *10* (4). <https://doi.org/10.3390/polym10040412>.
- (84) El Halal, S. L. M.; Colussi, R.; Deon, V. G.; Pinto, V. Z.; Villanova, F. A.; Carreño, N. L. V.; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. D. R. Films Based on Oxidized Starch and Cellulose from Barley. *Carbohydr. Polym.* **2015**, *133*, 644–653. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2015.07.024>.
- (85) Bruni, G. P.; Oliveira, J. P. de; Fonseca, L. M.; Silva, F. T. da; Dias, A. R. G.; Zavareze, E. da R. Biocomposite Films Based on Phosphorylated Wheat Starch and Cellulose Nanocrystals from Rice, Oat and Eucalyptus Husks. *Wiley Online*

Libr. **2019**, 72 (3–4), 1–26. <https://doi.org/10.1002/star.201900051>.This.

- (86) Dao, P. H.; Nam, T. T.; Phuc, M. Van; Hiep, N. A.; Thanh, T. Van; Vuong, N. T.; Xuan, D. D. Oxidized Maize Starch: Characterization and Effect of It on the Biodegradable Films.Ii. Infrared Spectroscopy, Solubility of Oxidized Starch and Starch Film Solubility. *Vietnam J. Sci. Technol.* **2017**, 55 (4), 395–402. <https://doi.org/10.15625/2525-2518/55/4/7919>.
- (87) Chen, J.; Wang, X.; Long, Z.; Wang, S.; Zhang, J.; Wang, L. Preparation and Performance of Thermoplastic Starch and Microcrystalline Cellulose for Packaging Composites: Extrusion and Hot Pressing Jie. *Int. J. Biol. Macromol.* **2020**, 1–27. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.10.117>.

ANEXOS

Anexo A. Proceso de extracción de almidón nativo de banano variedad *Cavendish*

	
<p>Pelado</p>	<p>Preparación de solución de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$</p>
	
<p>Troceado</p>	<p>Licuado y filtrado</p>
	
<p>Secado</p>	<p>Molienda y tamizado</p>

Anexo B. Proceso de oxidación de almidón nativo de banano variedad *Cavendish*

 <p>Se muestran varios frascos de laboratorio con etiquetas que indican: HCl 0.2, H₂SO₄, SO₂, CLORO DE HIDRÓGENO, NaOH, y NaOH. A la izquierda hay un frasco de agua destilada.</p>	 <p>Un procesador de alimentos portátil de color amarillo y negro está funcionando sobre una base de laboratorio. Dentro del recipiente se encuentra una mezcla amarilla. A la derecha se encuentra un medidor digital de pH.</p>
<p>Preparación de soluciones para la oxidación</p>	<p>Oxidación de almidón (0.7% de cloro activo)</p>
 <p>Un científico con un gorro azul y guantes blancos está trabajando en un laboratorio. En el fondo, otro científico sonríe. Se ve un procesador de alimentos portátil en uso sobre una base de laboratorio.</p>	 <p>Se muestra un sistema de filtración hecho a mano con un soporte de madera. Hay tres embudos de papel que contienen una sustancia amarilla. Debajo de los embudos hay dos recipientes que recogen el líquido filtrado.</p>
<p>Oxidación de almidón (1.8% de cloro activo)</p>	<p>Filtrado</p>
 <p>Una bandeja de aluminio que contiene una gran cantidad de trozos de material sólido, de color beige claro, que se están secando.</p>	 <p>Se muestra un recipiente de aluminio que contiene el material ya seco y molido. Alrededor hay otros recipientes, un frasco de vidrio con tapa verde y un recipiente blanco.</p>
<p>Secado</p>	<p>Molienda y tamizado</p>

Anexo C. Determinación de propiedades químicas y funcionales del almidón nativo y oxidado



Determinación de grupos carboxilo



Determinación de grupos carbonilo



Determinación de propiedades funcionales de almidón nativo y oxidado

Anexo D. Preparación de películas a base de almidón oxidado y MCC

	
<p>Preparación de solución formadora de película</p>	<p>Solución formadora de película en placa de moldeo</p>
	
<p>Secado</p>	<p>Almacenado</p>

Anexo E. Determinación de propiedades físicas y de barrera de películas elaboradas a partir de almidón oxidado y MCC



Determinación de contenido de humedad



Determinación de porcentaje de solubilidad



Determinación de permeabilidad al vapor de agua