

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

ESCUELA DE POSGRADO

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA DE ALIMENTOS



TESIS

**OBTENCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE BIOPELÍCULAS
COMESTIBLES PARA RECUBRIR ALIMENTOS A PARTIR
DE MUCÍLAGO DE NOPAL (*Opuntia ficus indica*) Y
ALMIDÓN DE OCA (*Oxalis tuberosa*)**

PRESENTADO POR:

Bach. Diego Elio PERALTA GUEVARA.

Para optar al Grado Académico de:

**Maestro en Ciencia y Tecnología de
Alimentos.**

ASESOR:

Dr. David CHOQUE QUISPE

COASESOR:

Msc. Carlos Alberto LIGARDA SAMANEZ

CUSCO – PERÚ

2022

DEDICATORIA

Dedicado a mis padres, Gladys Guevara Flores y Serapio Peralta Velazque, por ser personas extraordinarias, por su apoyo y comprensión.

“Nada en la vida es para ser temido, es sólo para ser comprendido. Ahora es el momento de entender más, de modo que podamos temer menos”. Marie Curie.

INDICE GENERAL

RESUMEN	10
ABSTRAC.....	11
INTRODUCCIÓN.....	12
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
Descripción del problema.....	13
Formulación del problema.....	15
Problema general	15
Problemas específicos.....	15
Justificación de la investigación.....	15
Objetivos de la investigación.....	16
Objetivo general	16
Objetivos específicos.....	16
MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL.....	17
Bases Teóricas	17
Oca (<i>Oxalis tuberosa</i>).....	17
Taxonomía.....	17
Composición fisicoquímica	18
Almidón.....	18
Composición química y estructura del almidón	19
Amilosa.....	19
Amilopectina	20
Propiedad funcional del almidón.....	20
Gelatinización.....	20
Nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>).....	21
Taxonomía.....	22
Mucílago de nopal	22
Composición proximal del mucílago de nopal	23
Pectina.....	25
Composición química y estructura de la pectina.....	25
Propiedades funcionales de la pectina	26
Gelificación de la pectina	26
Plastificantes.....	27
Glicerina.....	28

Biopelícula comestible	28
Propiedades físicas y químicas	29
Transparencia y translucidez	30
Propiedades mecánicas	30
Elongación.....	31
Esfuerzo máximo.....	31
Propiedades térmicas	32
Métodos de Análisis Térmicos	33
Termogravimetría (TG)	33
Análisis térmico diferencial (DTA).....	33
Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	34
Parámetros de caracterización de una curva DSC	34
Transición vítrea	34
Cristalización.....	35
Fusión.....	36
Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión	37
Análisis mecánico-dinámico (DMA).....	37
Análisis termogravimétrico (TGA)	37
Propiedades estructurales	38
Espectrofotometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).....	38
Marco Conceptual.....	41
Mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>).....	41
Almidón.....	41
Biopelícula comestible	41
Análisis termogravimétrico (TGA)	41
Análisis infrarrojo.....	41
Antecedentes de investigación	42
HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	46
Hipótesis general	46
Hipótesis específicas.....	46
Variables e indicadores.....	47
Variables independientes.....	47
Variables dependientes	47
Operacionalización de variables.....	47
Diseño de experimentos.....	48

METODOLOGÍA.....	49
Ámbito de estudio.....	49
Tipo y nivel de investigación.....	49
Unidad de análisis.....	49
Población de estudio.....	49
Acondicionamiento de la materia prima.....	49
Extracción de almidón de oca.....	49
Extracción de mucílago de nopal	51
Elaboración de la biopelícula comestible	52
Técnicas de recolección de información	54
Caracterización física y química de la biopelícula	54
Densidad.....	54
Humedad.....	54
Transparencia.....	54
Solubilidad.....	54
Actividad de agua (a_w).....	55
Caracterización térmica	55
Análisis termogravimétrico (TGA)	55
Caracterización mecánica	55
Caracterización estructural	55
Espectrofotometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).....	55
Técnicas de análisis e interpretación de la información	56
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	56
Características fisicoquímicas	56
Determinación de la densidad.....	56
Determinación de la humedad	58
Determinación de la solubilidad.....	61
Determinación de la transparencia (T)	63
Determinación de la actividad de agua (a_w)	66
Características mecánicas	68
Esfuerzo máximo de las biopelículas	68
Características térmicas	73
Análisis termogravimétrico	73
Características estructurales	77
Identificación de grupos funcionales por IR.....	77

CONCLUSIONES.....	81
RECOMENDACIONES	82
BIBLIOGRAFÍA	83
ANEXOS.....	101
Anexo A. Matriz de consistencia.....	101
Anexo B. Instrumentos de recolección de información	102
Anexo B1: Datos densidad	102
Anexo B2: Datos solubilidad.....	103
Anexo B3: Datos humedad.....	104
Anexo B4: Datos transparencia	105
Anexo B5: Datos actividad de agua	106
Anexo B6: Datos propiedades mecánicas	107
Anexo C. Métodos de prueba estándar empleadas en los análisis.....	112
Anexo D. Panel Fotográfico	115

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición proximal de la oca	18
Tabla 2. Composición proximal del mucílago de nopal (g/100g) en base húmeda	23
Tabla 3. Variables Independientes	47
Tabla 4. Variables Dependientes	47
Tabla 5. Operacionalización de variables.....	48
Tabla 6. Formulación para la síntesis de las biopelículas comestibles.....	48
Tabla 7. Densidad (g/cm ³) de las biopelículas comestibles.....	56
Tabla 8. Porcentaje de Humedad de las biopelículas comestibles	59
Tabla 9. Porcentaje de solubilidad de las biopelículas comestibles	61
Tabla 10. Transparencia de las biopelículas comestibles	64
Tabla 11. Actividad de agua (a_w) de las biopelículas comestibles	66
Tabla 12. Características mecánicas de las biopelículas comestibles	70
Tabla 13. Pérdida de masa por la temperatura por TGA en las biopelículas	75

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura química de enrollamiento helicoidal de la amilosa	19
Figura 2. Estructura química de la amilopectina	20
Figura 3. Gelatinización del almidón	21
Figura 4. Propuesta de estructura parcial para el mucílago	24
Figura 5. Distribución estructural del mucílago de nopal	24
Figura 6. Estructura química de la pectina	25
Figura 7. Estructura química básica de la pectina:	26
Figura 8. Estructura de la glicerina (1, 2, 3- propanotriol).....	28
Figura 9. Relación entre el σ_{max} y σ_{nom} vs distancia de la imperfección (r).....	32
Figura 10. Temperatura de Transición Vítrea (T_g).....	35
Figura 11. Cristalización y temperatura de cristalización (T_c).....	35
Figura 12. Fusión y temperatura de fusión	36
Figura 13. Módulo de elasticidad vs T_g y T_m	37
Figura 14. Espectro infrarrojo (IR).....	40
Figura 15. Flujo de proceso de extracción del almidón de oca	51
Figura 16. Flujo de proceso de extracción de mucílago de nopal	52
Figura 17. Proceso de síntesis de la película comestible.....	53
Figura 18: Diagrama de efectos para la densidad.....	57
Figura 19: Diagrama de intervalos para la densidad	58
Figura 20: Diagrama de efectos para el porcentaje de humedad	60
Figura 21: Diagrama de intervalos para % humedad	60
Figura 22: Diagrama de efectos para el porcentaje solubilidad.....	62
Figura 23: Diagrama de intervalos para el porcentaje de solubilidad	63
Figura 24: Diagrama de efectos para la Transparencia	65
Figura 25: Diagrama de intervalos para la Transparencia.....	65
Figura 26: Diagrama de efectos para la Actividad de agua.....	67
Figura 27: Diagrama de intervalos para la Actividad de agua	68
Figura 28: Variación del esfuerzo de las biopelículas comestibles	69
Figura 29: Porcentaje de elongación de las biopelículas.....	71
Figura 30, Diagrama de efectos del esfuerzo máximo de las biopelículas comestibles.....	72
Figura 31, Diagrama de efectos del % elongación de las biopelículas comestibles.....	73
Figura 32, Termograma TGA de las biopelículas comestibles	75
Figura 33, Diagrama de efectos para pérdida de masa en la primera fase	76
Figura 34, Diagrama de efectos para máxima pérdida de masa en las biopelículas.....	77

Figura 35, Espectros IR del almidón y el mucílago	78
Figura 36. Espectros IR de las biopelículas comestibles.....	80

RESUMEN

En la actualidad la formulación y preparación de materiales biodegradables en la industria alimentaria es un reto, debido a que permite minimizar los impactos ambientales y reducir el uso de materiales plásticos en la cadena de valor. La investigación tuvo como objetivo obtener y caracterizar biopelículas comestibles para recubrir alimentos a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y almidón de oca (*Oxalis tuberosa*). Se prepararon 9 biopelículas comestibles por termoformado que fueron secadas a 40, 50 y 60 °C. Se evaluaron propiedades fisicoquímicas, las características mecánicas fueron evaluadas a través de un esfuerzo de tensión, además las características térmicas se evaluaron mediante un análisis termogravimétrico y la identificación estructural por medio de un análisis infrarrojo (IR). Las biopelículas comestibles presentaron una solubilidad en agua superior a 91 %. En cuanto a la actividad de agua, este osciló entre 0.402 y 0.573, que tiene relación directa con el porcentaje de humedad (<25.3 %), el contenido de almidón y pectina afectan estas propiedades, así como sucede con la transparencia ($T < 2.08$). La densidad reportó valores entre 1.803 y 2.238 g.mL⁻¹ que se ve influenciada por la porosidad de la película. El estudio mecánico mostró que la elongación se ve favorecida por la glicerina, pero afecta su resistencia a la tensión. Mientras que, las biopelículas alcanzaron la mayor pérdida de masa (60.8 a 68.4 %) alrededor de los 300 °C en el análisis termogravimétrico y el análisis IR mostró relación entre los componentes y el nuevo ordenamiento molecular de las biopelículas, que se ven afectadas por las concentraciones de almidón de oca. Los resultados muestran la posibilidad de preparar biopelículas comestibles con buenas condiciones elaborados a base de almidón de oca y mucílago de nopal, así como su potencial uso como recubrimiento de alimentos.

Palabras clave: Infrarrojo, almidón de oca, mucílago de nopal, actividad de agua, transparencia, biopelícula comestible.

ABSTRACT

The formulation and preparation of biodegradable materials in food industry is a challenge, because it allows minimizing the environmental impacts and reduce the use of plastic materials. The objective was to obtain and characterize edible biofilms to cover foods based on nopal (*Opuntia ficus indica*) mucilage and oca (*Oxalis tuberosa*) starch. Nine edible biofilms were prepared by thermoforming and dried at 40, 50 and 60 °C. Physicochemical analyzes were carried out and mechanical characteristics were evaluated through tensile strength analysis. Besides, thermal characteristics were evaluated through thermogravimetric analysis, and structural identification through infrared (IR) analysis. The solubility in water of the edible biofilms were greater than 91%. Regarding the water activity, it ranged between 0.402 and 0.573, and it is directly related to the moisture content (<25.3%), the starch content and pectin affect these properties, as well as transparency ($T < 2.08$). Moreover, the density reaches values from 1,803 to 2,238 g.mL⁻¹. Concerning the mechanical analysis, this showed that the glycerin affected positively the elongation, but it affects negatively its tensile strength. Thermogravimetric analysis reported the highest mass loss (60.8 to 68.4%) around 300 °C and the IR analysis showed the relationship between the components and the new molecular ordering of the biofilms, which were influenced by the concentrations of oca starch and pectin. The results show that edible biofilms can be prepared from oca starch, pectin, and nopal mucilage; as well as it can be used as a food coating.

Keywords: Infrared, oca starch, nopal mucilage, water activity, transparency, edible biofilm.

INTRODUCCIÓN

Las biopelículas elaboradas a partir de subproductos de la industria de los alimentos han ganado una importancia en el sector, debido a su amplia gama de aplicaciones como por ejemplo el recubrimiento de los alimentos, pues la industria de los envases y empaques ha ocasionado un impacto en los ecosistemas debido principalmente al tiempo de degradación que les toma a estos materiales.

En investigaciones recientes se han elaborado biopelículas a partir de materiales de poco valor económico como son el almidón de papa nativa, yuca y mijo, mucílago de nopal, y como plastificantes emplearon la glicerina o glicerol. Encontraron que las biopelículas presentan buenas características fisicoquímicas, térmicas, mecánicas entre otras propiedades que tienen gran aptitud para la aplicación en la industria de alimentos.

Es por ello que esta investigación pretende encontrar alternativas al uso del almidón de oca y el mucílago de nopal, debido principalmente al poco valor económico que tiene actualmente. Como es el caso de la comercialización de la oca que se expende apenas es cosechada, así como también ocurre con el nopal, que se encuentra principalmente empleada para la producción de cochinilla y tuna, teniendo muy poca importancia en la industria y en la cadena de valor económica. El trabajo de investigación tuvo como objetivo, elaborar y caracterizar biopelículas comestibles para recubrir alimentos a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y almidón de oca (*Oxalis tuberosa*).

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Los alimentos son altamente susceptibles al deterioro por diversos factores como son los; físicos, químicos, biológicos y microbiológicos; estos últimos son aquellos que a través de técnicas convencionales de conservación son difíciles de controlar y así extender la vida de anaquel.

La demanda de alimentos de mayor calidad y amigables con el ambiente trae como resultado la necesidad de reducir desechos que se generan por su empaque, por lo que las investigaciones se han orientado a buscar alternativas con base en películas y recubrimientos comestibles a partir de fuentes naturales (González, 2011).

El progresivo interés por la disminución de contaminación proveniente de plásticos y la necesidad de extender la vida de anaquel de los alimentos, el desarrollo y aplicación de biopelículas comestibles ha recibido enorme atención (Espino *et al.*, 2010)

Por ello, en las últimas décadas se han investigado y mejorado métodos de conservación a través de biopolímeros empleados para recubrir o ser parte del recubrimiento en los alimentos, y que han ganado una especial atención, principalmente por ser biodegradables debido a su composición, estos biopolímeros son formulados a través de fuentes naturales de almidones y proteínas, tales como, raíces semillas tubérculos y semillas entre otros.

La oca es un tubérculo que se produce en la región andina sobre los 3300 metros de altitud, su producción es principalmente para el mercado local y el consumo familiar, debido principalmente a la falta de incentivos para la producción y la pérdida genética de las especies (Surco, 2004)

Los agricultores de la provincia de Andahuaylas han ido reduciendo los cultivos de oca por productos más rentables como la papa, quinua y kiwicha. En la actualidad se

cultiva este tubérculo para el consumo familiar en las comunidades campesinas y que eventualmente estas se expenden en mercados locales y de la región, dejando de lado su producción extensiva, debido a los costos de producción y precios del tubérculo.

Asimismo, Andahuaylas cuenta con producción silvestre de nopal, que se emplean principalmente para la producción de cochinilla y el aprovechamiento de sus frutos conocidos comúnmente como tuna, que son abastecidos a los mercados locales en épocas de cosecha. Además, debido a su composición química, el nopal cuenta con altos contenidos de azúcares reductores, que son ideales para el empleo de biopolímeros y recubrimientos para alimentos en especial de procedencia hortofrutícola.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema general

¿Es posible elaborar y caracterizar biopelículas comestibles adecuadas para recubrir alimentos, a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*), almidón de oca (*Oxalis tuberosa*)?

1.2.2. Problemas específicos

- ✓ ¿Las propiedades fisicoquímicas de biopelículas comestibles permiten su uso para recubrir alimentos, elaborados a partir de almidón de oca y mucílago de nopal?
- ✓ ¿Las características mecánicas de biopelículas comestibles serán las más óptimas para recubrir alimentos, elaborados a partir de mucílago de nopal y almidón de oca?
- ✓ ¿Las características térmicas de biopelículas comestibles serán adecuadas para recubrir alimentos, elaborados a partir de mucílago de nopal y almidón de oca?
- ✓ ¿Cuáles serán las características estructurales de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborados a partir de mucílago de nopal y almidón de oca?

1.3. Justificación de la investigación

Hoy en día la importancia de conservar y cuidar el ambiente, ha llevado a que las biopelículas ganen mayor importancia en las 2 últimas décadas, pues, se desea emplear nuevas tecnologías no solo para empaques, si no también, para la conservación de alimentos; debido a que diversos detractores de la industria alimentaria señalen que la industria sea la principal causante de los desechos sólidos generados, que entre ellos se encuentran los envases, empaques, etiquetas, etc., que son obtenidos de los derivados del petróleo.

El Perú no está exento de esta problemática, en el 2014 en el país se generó 7497482 tm/año de residuos sólidos producidos en el área urbana, cabe destacar que a diario se produce 13244 tm (MINAM, 2015). Sin embargo, al 2018 el país generó 23 mil

toneladas de residuos sólidos y que terminaron siendo vertidos en rellenos sanitarios (RPP, 2018), cabe señalar que, el mayor porcentaje de estos residuos son aquellos derivados del petróleo que se degradan en cientos de años.

Por tal motivo, el desarrollo de biopelículas comestibles son una gran alternativa para enfrentar los nuevos retos que conlleva la responsabilidad ambiental, además de ello, la legislación está restringiendo y limitando el uso plásticos y derivados en los alimentos.

La innovación de nuevos materiales para la industria alimentaria mediante el uso de productos orgánicos, como son las biopelículas comestibles, plantea el uso de material vegetal como: la oca que debido a problemas de producción y deterioro en su almacenamiento (Tupac, 1999), es una alternativa para la síntesis de biopelículas y así revalorar la oca; del mismo modo, el nopal tiene un gran potencial agroindustrial, del que se pueden obtener diversos productos como el mucílago (Sáenz *et al.*, 2006).

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo general

Elaborar y caracterizar biopelículas comestibles para recubrir alimentos a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y almidón de oca (*Oxalis tuberosa*).

1.4.2. Objetivos específicos

- ✓ Determinar las propiedades fisicoquímicas de biopelículas comestibles elaboradas para recubrir alimentos.
- ✓ Evaluar las características mecánicas de biopelículas comestibles elaboradas para recubrir alimentos.
- ✓ Evaluar las características térmicas de biopelículas comestibles elaboradas para recubrir alimentos.
- ✓ Determinar las características estructurales de biopelículas comestibles elaboradas para recubrir alimentos.

II. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

2.1. Bases Teóricas

2.1.1. Oca (*Oxalis tuberosa*)

La oca se desarrolla desde Argentina hasta Venezuela (Ugent y Ochoa, 2006) entre los 2000 a 4000 m de altitud, (Fernandez y Rodríguez, 2007). Con una mayor aptitud entre los 3000 y 3900 metros de altitud (Arbizu y Tapia, 1992). Fuera de Sudamérica se le encuentra cultivada comercialmente (a baja escala) en México y Nueva Zelanda (National Research Council, 1989).

La oca (*Oxalis tuberosa*) pertenece al género *Oxalis* y es considerada la especie de mayor importancia económica debido a su alto contenido de proteínas, carbohidratos, minerales y oxalatos (Talledo y Escobar, 1995). La oca se encuentra como el tercer tubérculo más cultivado de los Andes después de la papa y el olluco (MINAGRI, 2013) caracterizándose por su rusticidad, tolerancia a climas adversos y tener poca incidencia de plagas y enfermedades; además se cultiva en terrenos y en altitudes donde otros cultivos alimenticios difícilmente se desarrollan, es de fácil manejo agronómico y no se emplea químicos durante la producción (National Research Council, 1989).

a. Taxonomía

Según Chase y Reveal (2009), la oca presenta la siguiente clasificación taxonómica:

Dominio: Eukarya

Reino: Plantae

División: Equisetophyta

Clase: Equisetopsida

Subclase: Magnoliidae

Superorden: Rosane

Orden: Oxalidales

Familia: Oxalidaceae

Género: *Oxalis*

Especie: *Oxalis tuberosa*.

b. Composición fisicoquímica

Según León, Villacorta, y Pagador (2011), la oca presenta la siguiente composición proximal.

Tabla 1.
Composición proximal de la oca

Componente	Oca (<i>Oxalis tuberosa</i>)
Humedad (g/100g)	86.79
Proteína (g/100g)	0.77
Extracto etéreo (g/100g)	0.47
Fibra cruda (g/100g)	0.78
Carbohidratos (g/100g)	10.41
Cenizas (g/100g)	0.78
Fósforo (g/100g)	28.20
Hierro (g/100g)	12.53
Calcio (g/100g)	17.18
Cinc (g/100g)	1.79
Vitamina A (UI/100 g)	0.99
Vitamina B1 (mg/100 g)	0.05
Vitamina B2 (mg/100 g)	0.94
Vitamina B3 (mg/100 g)	1.09
Vitamina B12 (mg/100 g)	0.91
Vitamina C (mg/100 g)	39.68

1 UI vitamina C = 50 µg (0,05 mg) de vitamina C. 1 mg B12 = 1000 µg de vitamina B12. (Villacorta, y Pagador, 2011).

2.1.2. Almidón

El almidón es un polisacárido semicristalino, compuesto por dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina que presentan diferente estructura; la proporción de estas varía según la fuente del material vegetal (Cowieson, 2005).

La organización de gránulos de almidón es muy compleja y depende en gran medida de origen botánico, existe naturalmente en forma de gránulos discretos dentro células vegetales que se almacenan en los amiloplastos (Santacruz, 2004).

El almidón es una materia prima con un amplio campo de aplicaciones que van desde la impartición de textura y consistencia en alimentos hasta la manufactura de papel, adhesivos y empaques biodegradables (Zhao y Wistler, 1994).

2.1.2.1. Composición química y estructura del almidón

Químicamente, compuesto por la amilosa y la amilopectina que son polisacáridos muy similares, el primero es consecuencia de la condensación de D-glucopiranosas de enlaces glucosídicos α (1,4), de largas cadenas lineales con 200 a 2500 unidades y pesos moleculares hasta de un millón; la amilosa es una α -D- (1,4) - glucana, que tiene como unidad repetitiva la α -maltosa (Badui, 2006).

a) Amilosa

En la composición de los gránulos de almidón en la mayoría de las plantas aproximadamente una cuarta parte de moléculas de amilosa se encuentra presente; esta es fácilmente soluble en agua y forma una solución ligeramente viscosa difícil de gelatinizar, tiende a formar estructuras helicoidales, capaces de incluir otras moléculas como ácidos grasos o hidrocarburos (Charley, 2008). Presenta la siguiente estructura química:

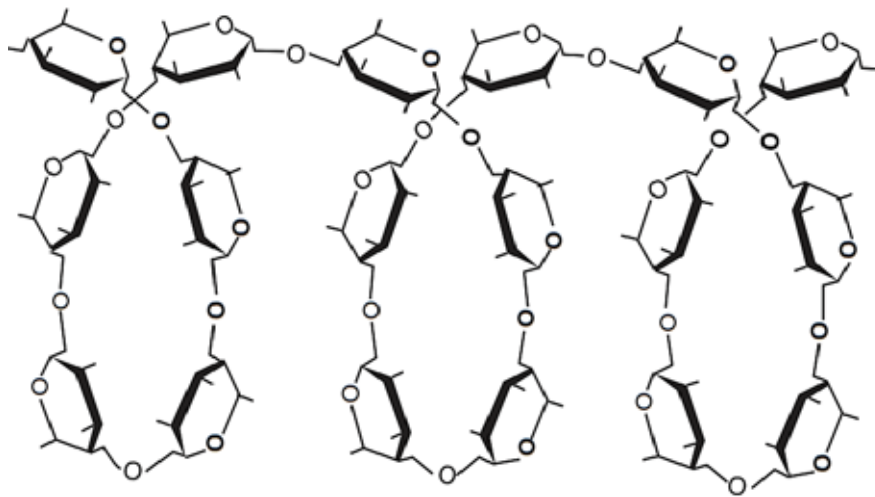


Figura 1. Estructura química de enroscamiento helicoidal de la amilosa (Badui, 2006)

b) Amilopectina

La amilopectina presenta más estabilidad que la amilosa, esto se debe a que su estructura es ramificada, por lo que, su tendencia a la retrogradación después de la gelatinización es mucho menor. Las pastas de amilopectina se mantienen fluidas durante largos períodos y aunque se origine una cierta retrogradación, es reversible con el calentamiento (Varnam, 1994).

Fundamentalmente la amilopectina y la amilosa se diferencian en el contenido de ramificaciones que están incorporadas a la cadena principal ubicadas cada 15 a 25 unidades lineales de glucosa con enlaces α -D-(1,6) (Badui, 2006). Presenta la siguiente estructura química:

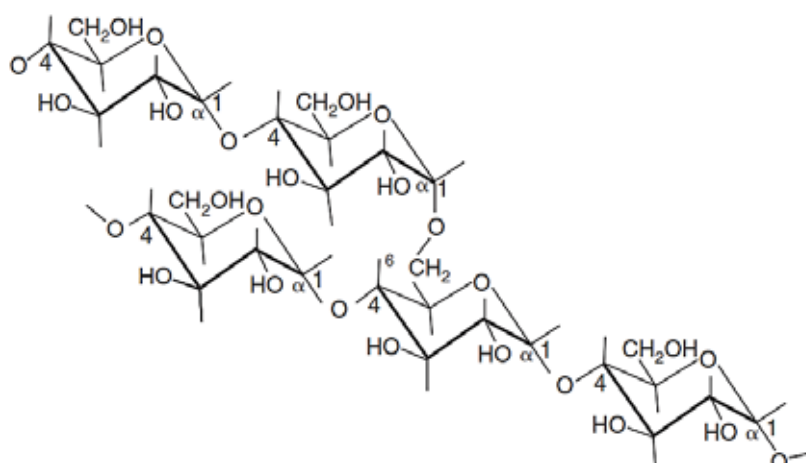


Figura 2. Estructura química de la amilopectina (Badui, 2006)

2.1.2.2. Propiedad funcional del almidón

A. Gelatinización

El almidón al momento que está expuesto a la humedad y al calor al mismo tiempo, ocurre una “gelatinización” que sucede a una temperatura a partir de 55 a 70 °C. Debido a que los enlaces polares hidroxilo en el almidón tienen afinidad hidrófila y absorben agua; por ello, los gránulos incrementan su volumen. Durante la gelatinización la viscosidad de la suspensión del almidón aumenta notablemente, debido a que los gránulos hinchados se adhieren entre sí (Cheftel y Cheftel, 1979).

Según Badui (2006), la temperatura de gelatinización es cuando se logra la máxima viscosidad; debido a que los gránulos presentan desigual grado de cristalinidad y constitución, a pesar de que puedan ser del mismo origen botánica, es así que algunos son más resistentes que otros, por el cual la temperatura de gelatinización maneja un intervalo. Por ello, hay un rango de diferencia entre 8 y 12°C, entre los primeros gránulos y los últimos para alcanzar su temperatura de gelatinización.

En la Figura 3, se observa que los gránulos se hinchan y retienen un máximo de agua hasta que se rompen y producen una dispersión de moléculas de amilosa y amilopectina en un sistema en suspensión (Badui, 2006).

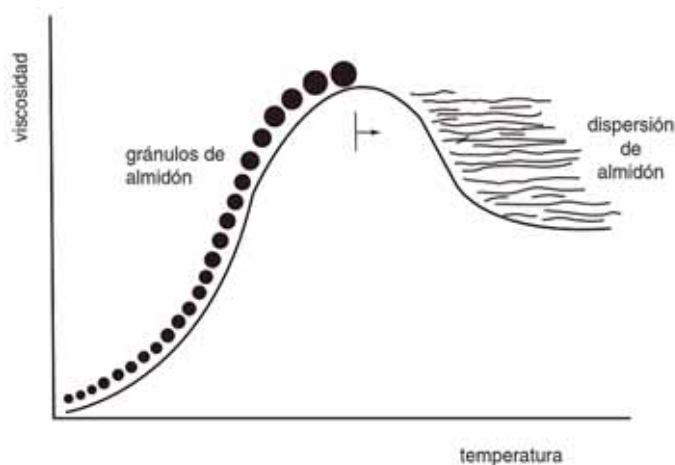


Figura 3. Gelatinización del almidón (Badui, 2006)

2.1.3. Nopal (*Opuntia ficus indica*)

El nopal pertenece a la familia Cactaceae, se encuentra presente en zonas áridas y semiáridas, con gran diversidad de especies y amplia distribución no solo en el Perú; si no también, están presentes en Canadá, Chile, Argentina, Bolivia, Brasil, Colombia, Estados Unidos de América, México, Perú, Venezuela y varios países de América Central y el Caribe (Sáenz *et al.*, 2006).

La taxonomía de los nopales debido a sus fenotipos es compleja, presentan amplia variación de acuerdo a las condiciones ambientales; frecuentemente, algunas variedades como los híbridos se reproducen en forma sexual o asexual. Hay un aproximado de 300

especies del género *Opuntia*. Sin embargo, hay solo 10 o 12 especies hasta ahora utilizadas por el hombre, ya sea para producción de fruta y nopalitos para alimentación humana, forraje o cochinilla para obtención de colorante (Uzun, 1996).

Sólo un intenso trabajo de campo puede permitir reconocer e identificar las especies, sus variedades y adaptaciones reflejadas en su fenotipo (Scheinvar, 1999).

a) Taxonomía

El nopal se encuentra dentro de la familia Cactaceae, se conoce como cactácea o cactus. Las cactáceas son plantas que caracterizan los paisajes de desiertos y zonas áridas, aunque una gran diversidad de especies se encuentra en zonas tropicales, subtropicales y templadas (Rios y Quintana, 2004).

Dominio: Eukarya

Reino: Plantae

Subreino: Embryophita

División: Angiospermae

Clase: Dicotyledonea

Subclase: Dialipetalas

Orden: Opuntiales

Familia: Cactaceae

Subfamilia: Opuntioideae

Género: *Opuntia ficus-indica*

2.1.3.1. Mucílago de nopal

El mucílago del nopal es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, está compuesto aproximadamente de 35 a 40 % de arabinosa, entre 20 a 25 % de galactosa y xilosa entre los mismos valores, y de 7 a 8 % de ramnosa y ácido galacturónico cada uno (Gibson y Nobel, 1990).

Según Sáenz *et al.*, (2006) en la producción de alimentos, el mucílago de nopal es considerada importante por sus características de viscosidad. Además, tiene la capacidad

de formar redes moleculares y retener grandes cantidades de agua (Guzmán, Villabona, Tejada, y García, 2013); así como de modificar propiedades como: elasticidad, textura, retención de agua, además de que es un buen gelificante, espesante, y emulsificante (Sáenz *et al.*, 2006).

a) Composición proximal del mucílago de nopal

La complejidad del mucílago es evidente debido al contenido de carbohidratos que presenta. Estos monómeros contenidos son, por ejemplo: ácido galacturónico, L-ramnosa, D-Xilosa, L-arabinosa, y D-galactosa. La proporción de estos monómeros en la molécula varía de acuerdo a diversos factores como: variedad, edad, condiciones ambientales y estructura utilizada en la extracción (fruto, cáscara, cladodio) (Sáenz, Sepúlveda, y Matsuhira, 2004).

Tabla 2.
Composición proximal del mucílago de nopal (g/100g) en base húmeda

Componente	Autor		
	Almendárez, (2004)	(Sepúlveda, Sáenz, Aliaga, y Aceituno, 2007)	Hong y Ibrahim, (2012)
Humedad	7.56	6.0±0.1	13.69
Proteína	5.0	7.23±0.1	4.81
Cenizas	38.74	37.3±0.1	28.67
Grasas	0.47	-	-
Fibra	0.47	-	-
Carbohidrato	55.32	49.47	52.83

Fuente: elaboración propia

En la Figura 4, Sáenz, Sepúlveda, y Matsuhira (2004), muestran una propuesta de la estructura química del mucílago de nopal. Se puede observar la tendencia a la ramificación por parte de L-ramnosa, ácido galacturónico, L-arabinosa y D-xilosa; a pesar que la estructura principal tiene tendencia lineal.

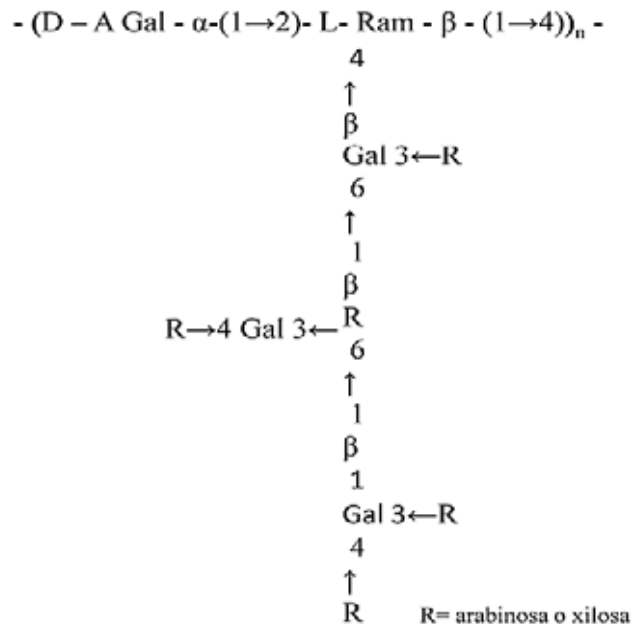


Figura 4. Propuesta de estructura parcial para el mucílago

Cardenas, Higuera-Ciapara, y Goycoolea (1997), hacen mención de la cantidad de ácido galacturónico (8.4 %), que tiende a asociarse fuertemente en presencia de iones de calcio, presentando una estructura ampliamente ramificada (Figura 5).

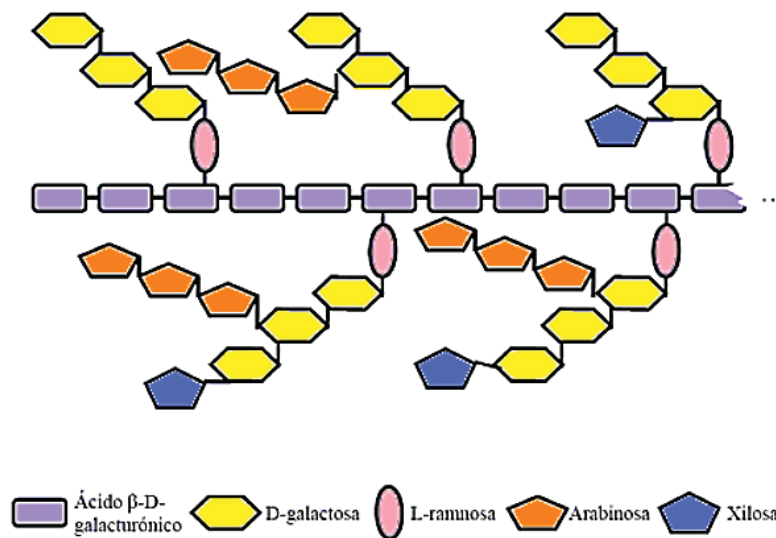


Figura 5. Distribución estructural del mucílago de nopal (Cardenas, Higuera-Ciapara, y Goycoolea, 1997)

2.1.4. Pectina

La pectina es un polisacárido, que se obtiene de materiales vegetales tales como manzanas, frutas cítricas, piña, entre otros. Los subproductos de la industria de frutas, el bagazo de manzanas y cítricos, constituyen básicamente las fuentes industriales de pectinas (Cabarcas, Guerra, y Henao, 2012).

2.1.4.1. Composición química y estructura de la pectina

La pectina es un polisacárido de alto peso molecular y contienen largas cadenas formadas por unidades de 1,4- α -D-ácido galacturónico (GalpA) (Chasquibol, Arroyo, y Morales, 2008). Contiene al menos 65 % de unidades de ácido galacturónico, $C_6H_{10}O_7$; las cadenas de pectina están formadas por anillos de este ácido, cuyo número varía, desde algunos centenares, hasta alrededor de 1000, con masas moleculares de aproximadamente 50000 a 150000 daltons (Zegada, 2015). Puede presentar la siguiente estructura química:

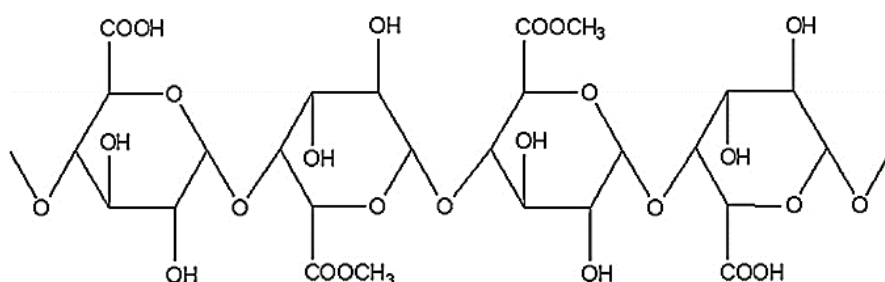


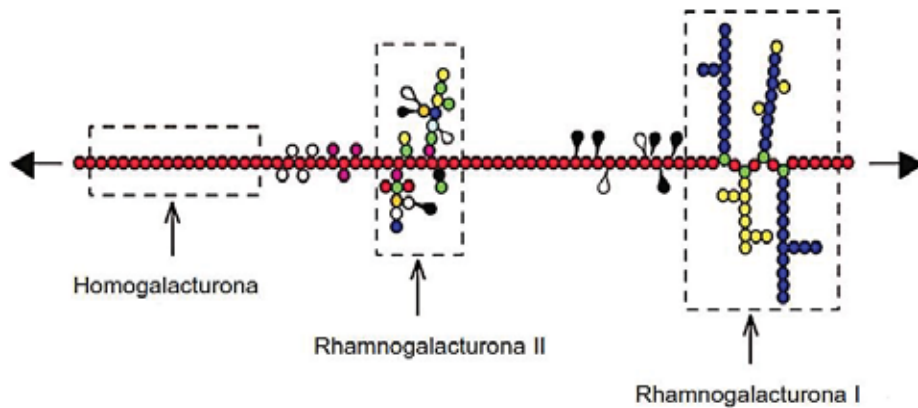
Figura 6. Estructura química de la pectina (Sharma y Ahuja, 2011)

Cada anillo de la cadena posee un grupo carboxilo (-COOH), que puede estar esterificado con metanol, produciendo ésteres metílicos (-COOCH₃), o quedar neutralizado por una base (Figura 6), también viene acompañado de azúcares neutros, como la D-galactosa, L-arabinosa y L-ranamosa (Zegada, 2015).

La pectina bajo condiciones adecuadas es capaz de formar geles con azúcares y ácidos (Arellanes *et al.*, 2011), los residuos de ácido galacturónico (Figura 7a), otorgan una carga global negativa. Hay pectinas que suelen ir unidas a calcio como pectatos de calcio, que forman geles rígidos e insolubles (Baena y Cardona-García, 2012).

Los principales constituyentes de los polímeros pécticos son los polisacáridos homogalacturona y rhamnogalacturona I. Sin embargo, en una estructura alternativa, propuesta recientemente, el polisacárido homogalacturona es una larga cadena de rhamnogalacturona I (Figura 7b) (Chasquibol, Arroyo, y Morales, 2008).

a.



b.

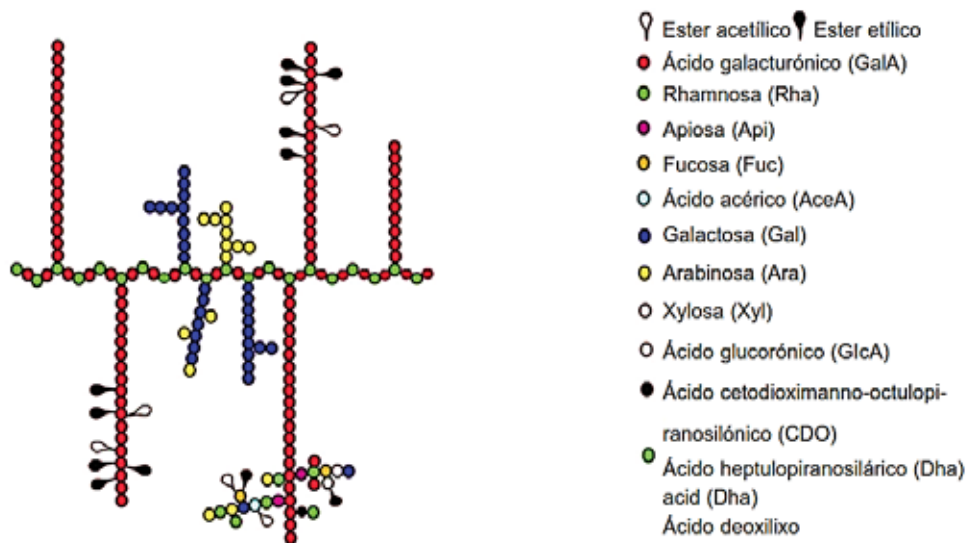


Figura 7. Estructura química básica de la pectina: (a) Representación esquemática convencional; (b) Representación nueva (Chasquibol, Arroyo, y Morales, 2008)

2.1.4.2. Propiedades funcionales de la pectina

A. Gelificación de la pectina

En la tecnología alimentaria la propiedad más importante de las pectinas es su aptitud para formar geles, estos consisten en moléculas poliméricas con enlaces entrecruzados en la red, interconectada y tupida que se encuentran inmersas en un líquido

(agua); las propiedades del gel son el resultado neto de interacciones complejas entre el soluto y el solvente, la influencia del agua como solvente, la naturaleza y magnitud de las fuerzas intermoleculares que mantienen la integridad del gel permiten tener una gran capacidad de retención de agua. (Pagan, 1999)

El ritmo lento de gelificación otorga suficiente tiempo entre 25 a 30 minutos para que las burbujas de aire atrapadas puedan escapar; las pectinas de alto metoxilo se pueden subdividir según su temperatura de gelificación:

- i)* aquellas que gelifican en menos de cinco minutos a 95 °C, presentan un grado de esterificación (DE) entre 68 y 75 % y
- ii)* aquellas con un DE entre el 60 y 68 % que gelifican en tiempos superiores a los cinco minutos a 65 °C (Muñoz, 2011).

2.1.5. Plastificantes

Además de los componentes de origen polimérico, otro elemento significativo para la elaboración de biopelículas comestibles, son los plastificantes. Estos componentes presentan moléculas pequeñas de bajo peso molecular y baja volatilidad y son empleados para mejorar la flexibilidad y la funcionalidad de los recubrimientos; dentro de los agentes plastificantes utilizados más frecuentemente se encuentra glicerol, polietilenglicol, sorbitol, aceites, ácidos grasos, ceras, entre otros., siendo el glicerol el plastificante más utilizado en las formulaciones a base de polisacáridos y proteína (Sothornvit, Olsen, Mchugh, y Krochta, 2007).

Los plastificantes son necesarios en las formulaciones de biopelículas a partir de proteínas y polisacáridos, porque aumentan la flexibilidad de los recubrimientos, incrementan el movimiento molecular en los polímeros, ya que reduce los enlaces de hidrógeno intermolecular de los polímeros y acrecienta el espacio entre ellos. Los plastificantes afectan la capacidad de atracción de agua del sistema y generalmente suelen

augmentar la permeabilidad al oxígeno de las biopelículas comestibles (McHugh y Krochta, 1994).

2.1.5.1. Glicerina

La glicerina presenta características como: ser un líquido viscoso incoloro, inodoro, higroscópico y dulce. Los términos glicerina o glicerol son utilizados indistintamente para referirse al compuesto; su punto de ebullición con descomposición es a 290 °C, y es miscible con agua y etanol (Knothe, Gerpen, y Krahl, 2005).

La glicerina pura es un polialcohol de una cadena carbonada de tres átomos de carbono y tres grupos hidroxilos ($\text{CH}_2\text{OH}-\text{CHOH}-\text{CH}_2\text{OH}$) (Díaz y Cadierno, 2013).

Es una sustancia higroscópica con un pH neutro (no libera cationes hidronio, ni hidroxilo cuando se disuelve en agua), es químicamente estable bajo condiciones normales de almacenamiento y manejo (Tan, Abdul-Aziz, y Aroua, 2013).

Knothe, Gerpen, y Krahl (2005), muestran la siguiente estructura molecular de la glicerina (Figura 8) que también es conocido como glicerol.

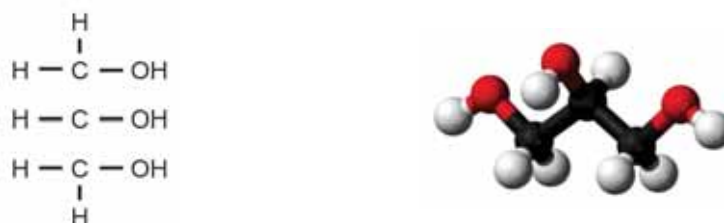


Figura 8. Estructura química de la glicerina (1, 2, 3- propanotriol)

Fue descubierta en Suecia por Carl W. Scheele en 1779 al calentar litargirio y aceite de oliva, al que nombró glicerol; posee una variedad amplia de aplicaciones en la fabricación de productos domésticos, industriales y farmacéuticos, comercialmente se le conoce como glicerina (Herrera, 2004).

2.1.6. Biopelícula comestible

Es aquel material biodegradable que tiene potencial para emplearse como recubrimiento comestible (RC) en alimentos procesados o mínimamente procesados, con

el objeto de retardar su deterioro. Cabe destacar que, este es una matriz alimentaria de capa continua, delgada y simple, para preservar las características fisicoquímicas y organolépticas de los alimentos se coloca en su superficie.

Carrasco, Villarroel y Cevallos (2002), menciona que, las biopelículas comestibles son capas delgadas de un material biopolímero, que son aplicadas sobre la superficie de un alimento en adición o reemplazo de la corteza natural, y que se comportan principalmente como barreras que reducen la difusión de gases (O_2 , CO_2 , vapor de agua, etc.), permitiendo extender la vida útil del alimento.

Las biopelículas pueden actuar positivamente sobre la calidad y el tiempo de vida del alimento mediante la formación de barreras al oxígeno, aromas o humedad, incorporando aditivos como antioxidantes, agentes antimicrobianos o mejorando la apariencia, estructura o facilidad para la manipulación vinculada a la logística de distribución comercial; el desarrollo de aplicaciones y estudios documentados de los últimos 20 años, permiten contar con una extensa variedad de biopelículas con buenas propiedades mecánicas y de barrera (Daraba, 2008).

2.1.7. Propiedades físicas y químicas

Las propiedades físicas son aquellas que se pueden medir, sin que se afecte la composición o identidad de la sustancia, son aquellas características propias de la sustancia, que al ser observadas o medidas no producen nuevas especies químicas o subproductos de nueva estructura molecular (Levine, 2004).

En cambio, las propiedades químicas, se observan cuando una sustancia sufre un cambio que altera su naturaleza, es decir, que su estructura interna, se transforma en otra sustancia con nuevas propiedades y reordenamiento molecular propio, dichos cambios químicos, son generalmente irreversibles, pueden ser observadas y medidas; además nos

permiten determinar el comportamiento de las sustancias cuando se ponen en contacto con otras (Levine, 2004).

Según Rahman y McCarthy (1999), las propiedades en la caracterización de matrices alimentarias, son:

- ✓ Transparencia y translucidez.
- ✓ Densidad.
- ✓ Humedad.
- ✓ Permeabilidad al vapor de agua.
- ✓ Solubilidad.
- ✓ Geometría y estructura cristalina
- ✓ Actividad de agua, etc.

Levine (2004), puntualiza que la química física o fisicoquímica estudia los principios físicos fundamentales que gobiernan las propiedades y el comportamiento de los sistemas químicos y los fenómenos que ocurren en ella.

2.1.7.1. Transparencia y translucidez

Los materiales transparentes son los que permiten pasar fácilmente la luz y ver a través del material; por otra parte, los objetos translúcidos dejan pasar la luz, pero no se puede ver a través de él, las formas y colores se alteran. Los materiales transparentes y translúcidos son difíciles de analizar, debido a que la mayor parte de la luz que llega a su superficie se refracta, y solo una pequeña porción es reflejada (Miyazaki, Karino, Endo, y Haraguchi, 2007).

2.1.8. Propiedades mecánicas

Es un material con la capacidad de transferir y oponer resistencia a fuerzas o deformaciones. Asimismo, los materiales brindan resistencia al ser sometidos a esfuerzos exteriores, por tanto, el estudio del comportamiento mecánico resulta ser necesaria debido

a que muestra la relación entre la fuerza que se aplica al material y la respuesta que muestra este.

Callister (1995), menciona que, el comportamiento mecánico de los polímeros es más complicado que el de los metales, y sus características mecánicas (módulo elástico y resistencia a tracción) claramente inferiores. La respuesta del material frente al esfuerzo mecánico, no únicamente está sujeta a la magnitud de este; por el contrario, actúan significativamente otros factores como, por ejemplo:

- ✓ Temperatura del material.
- ✓ Tiempo de aplicación de la fuerza.
- ✓ Velocidad de aplicación de la fuerza.

2.1.8.1. Elongación

Es la capacidad del material para deformarse antes de llegar a su punto de fractura; indica que tan dúctil puede ser un material. Se determina a través de la siguiente (Ecuación 1) (Newell, 2009).

$$\% \text{ Elongación} = \frac{L_f - L_i}{L_i} * 100 \quad (\text{Ecuación 1})$$

2.1.8.2. Esfuerzo máximo

Material capaz de sobrellevar la máxima cantidad de esfuerzo. Desde este punto, el material comienza a deformarse incluso frente a cargas menores; asimismo, corresponde a las fuerzas internas, debido a las cargas, sometidas a un elemento resistente. La máxima tensión que se concentra en una grieta que surge o forma espontánea se llama esfuerzo máximo. En la Figura 9, se muestra la relación entre los esfuerzos máximo y nominal versus la distancia de la imperfección; que no es otra cosa que, la magnitud del factor de concentración del esfuerzo depende que de la geometría de la imperfección (Smith y Hashemi, 2004; Newell, 2009).

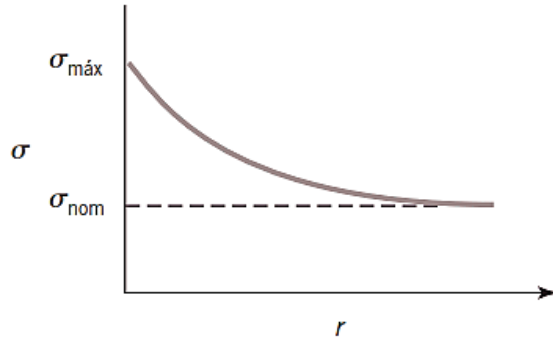


Figura 9. Relación entre el σ_{max} y σ_{nom} vs distancia de la imperfección (r)

2.1.9. Propiedades térmicas

Son manifestaciones de un material a la exposición de calor durante un periodo de tiempo; en el transcurso de que un material absorbe energía, su temperatura, dimensiones físicas y otras características del material sufren un cambio. Para la selección adecuada de un material en un determinado proceso, se requiere de un amplio conocimiento y comprensión del comportamiento térmico de los materiales como, por ejemplo: la capacidad calorífica, la dilatación térmica, la conductividad térmica, entre otras.

Las propiedades físicas, químicas y mecánicas, están sujetas a la acción de la temperatura y tienen una dependencia directa con el aumento o la disminución de esta. Las propiedades térmicas son útiles para entender, por ejemplo, el fenómeno de falla mecánica de los materiales; así como, permite entender y predecir el comportamiento de dicho material en una situación específica durante un proceso u operación, como es el caso de un material para transferir calor (Askeland, 1998).

Las propiedades térmicas están íntimamente ligadas a los procesos térmicos en la industria de los alimentos; a pesar que, en la literatura se puede encontrar cierta información experimental sobre las propiedades térmicas de algunos alimentos comunes, la inmensa cantidad de productos alimenticios, sus diferentes composiciones, y las diferentes temperaturas en las que se llevan a cabo su manufactura, hacen que las posibilidades de encontrar un valor adecuado sean reducidas (Toledo, 1991).

2.1.9.1. Métodos de Análisis Térmicos

Es un conjunto de técnicas que se emplean para medir una propiedad y observar su comportamiento en función de la temperatura, mientras el material es sometido a temperatura controlada (Weber-Anneler y Arndt, 1985). Los métodos se definen a continuación:

A. Termogravimetría (TG)

Técnica que permite observar el comportamiento que sufre una determinada masa de un particular compuesto por acción de la temperatura, mientras esta es elevada habitualmente de forma lineal en una atmósfera controlada. Permite observar la evolución del peso de una muestra en el tiempo, así evaluar las posibles ganancias o pérdidas de peso que sufre dicha muestra; este comportamiento puede ser observado en una termobalanza o analizador termogravimétrico, y las curvas obtenidas se llaman curvas termogravimétricas o curvas TG (Klančnik, 2010).

B. Análisis térmico diferencial (DTA)

Se observa el comportamiento de la diferencia entre un material de referencia y el material que se desea observar, cuando se aplica un ciclo de temperatura controlado. Permite detectar fenómenos que se producen en la muestra como, por ejemplo: es posible observar la descomposición térmica, fusión y solidificación, oxidación, etc. Esta técnica consiste en incrementar paulatinamente la temperatura en una muestra y del material de referencia, dicha temperatura a la cual la muestra es sometida sube con el tiempo de forma lineal. La divergencia de temperatura entre la temperatura de la muestra y la temperatura del material de referencia se controla y se representa en el eje de ordenadas, dando lugar a un termograma diferencial (Klančnik, 2010).

C. Calorimetría diferencial de barrido (DSC)

Muestra la diferencia de energía que presenta un material de referencia y la muestra a analizar frente a la acción de la temperatura. Se menciona que todas las transformaciones o reacciones donde se produce un cambio de energía, pueden medirse a través de esta técnica; que permite observar, la capacidad calorífica aparente, transición vítrea, transición ferro-paramagnética, cristalización, transformaciones polimórficas, fusión, ebullición, sublimación, descomposición, isomerización en los materiales (Suriñach, Baro, Bordas, Clavaguera, y Clavaguera-Mora, 1992).

a. Parámetros de caracterización de una curva DSC

Dentro de los diferentes métodos que se emplean para evaluar las transiciones térmicas, es importante conocer los parámetros elementales a aplicar y observar el comportamiento térmico característico de un material termoplástico.

i. Transición vítrea

Se identifica la transición vítrea como un salto respecto de la línea base debido a un cambio en la capacidad calorífica del material, ya que la capacidad calorífica aumenta por encima de la temperatura de transición vítrea del material, que es la temperatura en el cual un polímero cambia de un estado rígido y quebradizo a otro blando y maleable, está presente sólo en polímeros amorfos y es diferente para cada polímero, se debe de considerar como el efecto de la excitación, debido al aumento de la temperatura, de los movimientos vibratorios o rotacionales de los átomos, grupos atómicos y segmentos de cadena (Kissinger, 1957).

Los lugares amorfos que presenta un polímero son una característica de la temperatura de transición vítrea (T_g), que indica el movimiento de las cadenas poliméricas en un polímero. Las cadenas presentan escasa movilidad por debajo de esta temperatura

por lo que es más resistente y por encima de la T_g , las cadenas poliméricas muestran mayor facilidad para moverse, por ello material muestra baja resistencia.

Asimismo, la Figura 10 muestra que el cambio no ocurre súbitamente, por el contrario, sucede a través de un rango de temperaturas; lo que resulta ligeramente complicado escoger una T_g discreta, pero generalmente se toma como T_g el punto medio de la región inclinada (Kissinger, 1957).

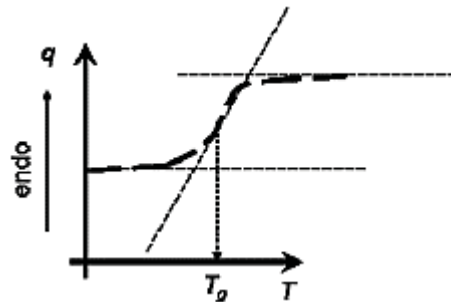


Figura 10. Temperatura de Transición Vítrea (T_g)

ii. Cristalización

Los polímeros muestran una gran movilidad por encima de la T_g , cuando consiguen la temperatura apropiada ganan la energía suficiente, para una disposición fuertemente ordenada (cristales). Los polímeros se disponen en esos ordenamientos cristalinos y liberan calor, de modo que el módulo DSC no suministra más calor para aumentar la temperatura del crisol (Mathot, 1994). Esta caída en el flujo de calor puede verse como una gran depresión en la curva calorimétrica (Figura 11).

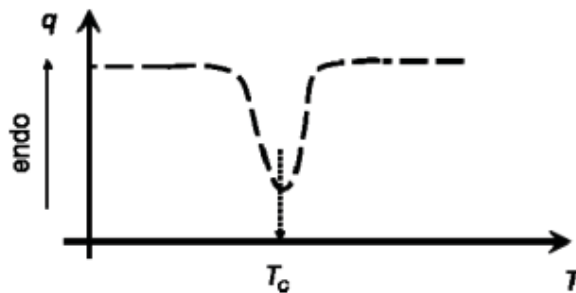


Figura 11. Cristalización y temperatura de cristalización (T_c)

La temperatura en la depresión (Figura 11), es considerada como la temperatura de cristalización del polímero, o T_C . El área de la depresión puede ser calculada, y es aquella que indica la energía latente (entalpía) de cristalización. Asimismo, esta depresión muestra la capacidad de cristalización que posee un polímero, debido a que el polímero entrega calor cuando se cristaliza, por ello se afirma que la cristalización es una transición exotérmica (Kissinger, 1957).

iii. Fusión

A medida que se incrementa la temperatura sobre el polímero después de su T_C , se alcanza otra transición térmica conocida como fusión. Al alcanzar la temperatura de fusión, o T_m , los cristales en el polímero empezaran a disgregarse, en otras palabras, estas se funden. Estas cadenas poliméricas comienzan a moverse libremente dejando de lado su ordenamiento molecular. Asimismo, hay un calor latente (entalpía) de fusión, como ocurre con el de cristalización y que también puede ser calculada. Los cristales poliméricos al fundirse, deben absorber calor del sistema para lograrlo, conocido como proceso endotérmico. Por ello, cuando se alcanza la temperatura de fusión, hasta que se hayan fundido todos los cristales presentes, la temperatura no aumentará. Por lo que se tiene que aprovisionar calor en gran medida al polímero, para que la temperatura siga aumentando a la misma velocidad, este calor extra durante la fusión aparece como un gran pico en la curva de DSC (Figura 12) (Charsley y Warrington, 1992).

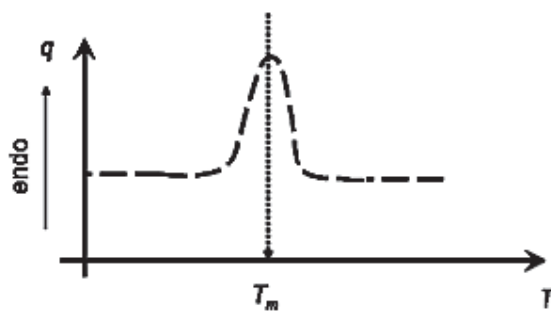


Figura 12. Fusión y temperatura de fusión

iv. Temperatura de transición vítrea y temperatura de fusión

La Figura 13 muestra que, se observa que cuando un material polimérico semicristalino es sometido al calor su módulo de elasticidad, conocido como module E (Pa) decrece conforme la temperatura aumenta, luego atraviesa por un periodo de estabilización; en esta fase el material se vuelve muy viscoso. Si la temperatura se incrementa aún más, el material llega a fundirse (T_m) y el modulo llega a ser cero. Entre el estado rígido y el viscoso se encuentra la temperatura de transición vítrea (T_g) (Brown, 2004).

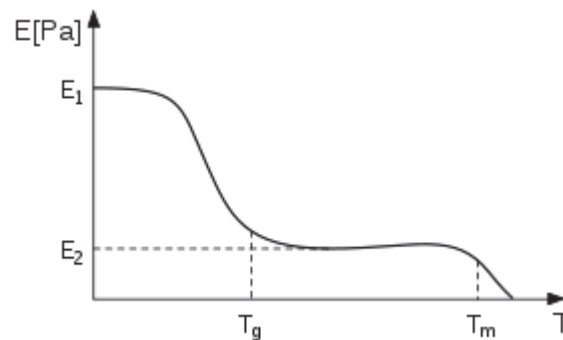


Figura 13. Módulo de elasticidad vs T_g y T_m

D. Análisis mecánico-dinámico (DMA)

Esta técnica mide el módulo dinámico y/o amortiguamiento en función de la temperatura de una sustancia que se encuentra sometida a una carga oscilatoria en el que se evalúan la torsión, tensión, flexión y compresión; quiere decir, que se observa las propiedades viscoelásticas que dependen de la acción de la temperatura y determina el módulo de elasticidad a través de la aplicación de una fuerza de oscilación en la muestra de un material en un ciclo de temperatura controlado (TA Instruments, 2018).

2.1.9.2. Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica frecuentemente utilizada para estudiar las reacciones de disgregación de materiales, en la determinación de características de la devolatilización y parámetros cinéticos, tales como la energía de activación y el factor pre-exponencial, así como la influencia de la temperatura y

velocidad de calentamiento durante las reacciones de descomposición térmica y los mecanismos de reacción (Jauhiainen, Conesa, Font, y Martín-Gullón, 2004).

Según Yaman (2004), en los procesos de termoconversión la información relativa a la distribución de los productos y el desarrollo cinético se obtiene, en general, por dos vías clásicas:

- ✓ A partir de la curva de pérdida de masa, o curva termogravimétrica.
- ✓ A través de reactores de pirólisis para la formación de productos.

Esta técnica analítica permite medir la variación de peso de una muestra, frente a la temperatura en el tiempo, cuando se le aplica un programa de temperatura controlada a una atmósfera específica (Carrier *et al.*, 2011).

La pérdida de peso de una muestra se registra a medida en que se incrementa la temperatura, hasta temperaturas de 1200 °C, bajo condiciones controladas de velocidad de calentamiento y diferentes atmósferas de reacción; obteniéndose por esta vía las curvas denominadas TG o termogramas y las curvas de análisis termogravimétrico diferencial (DTG) (Mésáros, Jakab, Várhegyi, Szepesváry, y Marosolgyi, 2004).

2.1.10. Propiedades estructurales

La estructura de un material rige sus propiedades, por lo que se muestran características apropiadas para una determinada función, dichas propiedades establecen la idoneidad del material. El comprender las estructuras de los materiales abre el camino al entendimiento de las propiedades del material que estas estructuras originan y los procedimientos de procesamiento que se pueden utilizar para alterar las estructuras y como resultado las propiedades del material (Newell, 2009).

2.1.10.1. Espectrofotometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

Fourier Transform InfraRed (FT-IR), es un método por el cual la radiación IR se pasa a través de la estructura de una muestra, una fracción de dicha radiación se absorbe

por la muestra y la fracción restante se transmite. La absorción molecular y transmisión en una determinada muestra resulta en un espectro, creando una huella molecular. Como una huella digital no hay dos moléculas únicas con estructuras que producen el mismo espectro infrarrojo; esto hace que la espectroscopía infrarroja sea útil para varios tipos de análisis (Thermo Nicolet Corporation, 2001).

La composición de líquidos, sólidos y gases pueden ser descubiertos a través de los espectros de FT-IR; esta técnica ayuda en la identificación de materiales desconocidos y la ratificación de materiales de elaboración. La información que proporciona es bastante específica para una gran cantidad de casos, permitiendo identificar la más mínima diferencia entre materiales similares. La velocidad del análisis FT-IR lo hace particularmente útil en aplicaciones de detección, mientras que la sensibilidad potencia muchas aplicaciones de investigación avanzadas. (Thermo Fisher Scientific, 2013)

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FT-IR) sondea las características vibratorias de los cofactores y aminoácidos, que son frágiles a cambios mínimos en su estructura. La espectroscopía de diferencia de FT-IR inducida por reacción se emplea para elegir vibraciones adecuadas a grupos químicos particulares implicados en una reacción determinada. La química teórica es empleada para los cálculos de modos normales que permiten descifrar las frecuencias IR en términos de propiedades estructurales determinadas del grupo funcional químico o molécula de utilidad. La técnica de espectroscopía FT-IR proporciona información estructural y funcional específica obtenida del análisis de fotosistemas (Berthomieu & Hienerwadel, 2009).

La espectroscopía infrarroja ha sido una técnica de caballo de batalla para el análisis de materiales en el laboratorio durante más de setenta años, un espectro infrarrojo representa una huella digital de una muestra con picos de absorción que corresponden a

las frecuencias de vibraciones entre los enlaces de los átomos que forman el material (Thermo Nicolet Corporation, 2001).

Los modos vibracionales que provocan oscilaciones entran en resonancia con un haz de IR, produciendo un cambio de energía entre las moléculas integrantes y el haz. Hay un comportamiento particular para cada enlace con un tipo atómico, una concentración de enlaces definidas y un entorno químico. Por lo que, en un espectro infrarrojo se consiguen mostrar bandas ligadas a todos los compuestos moleculares, cada banda corresponde a un movimiento de vibración dentro de la molécula para cada uno de los enlaces que conforman la molécula. Por ello se afirma que el conjunto de estos conforma la huella dactilar de un determinado compuesto, que evidencia un comportamiento particular frente a la exposición de un haz de infrarrojo, en esto se basa la eficacia del IR (Piqué & Vázquez, 2012).

Font, (2012) menciona que, en un análisis IR se mide la intensidad del haz de luz que interacciona con la muestra, y se expresa en función a la frecuencia de la luz incidente. La Figura 14 muestra señales que informan sobre el compuesto, los enlaces químicos constituyentes presentan movimientos vibracionales entre 500 a 4000 cm^{-1} .

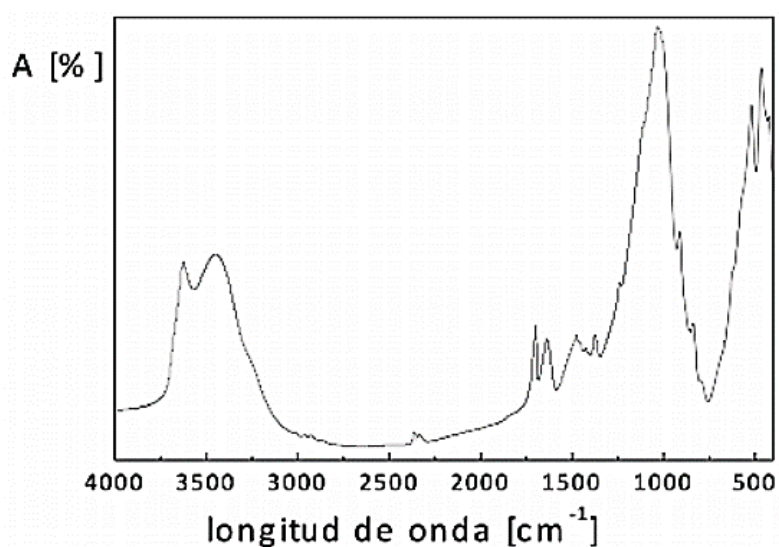


Figura 14. Espectro infrarrojo (IR).

2.2. Marco Conceptual

Mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*)

Es un polisacárido fibroso, altamente ramificado, que tiene la capacidad de formar redes moleculares y retener grandes cantidades de agua, así como de modificar propiedades fisicoquímicas (Gibson y Nobel, 1990).

Almidón

Es una mezcla de dos polisacáridos muy similares, la amilosa y la amilopectina, presenta una organización de gránulos muy compleja, que depende en gran medida de origen botánico (Cowieson, 2005).

Biopelícula comestible

Es aquel material biodegradable compuesto por capas delgadas que se comportan como barreras que reducen la difusión de gases (O₂, CO₂, vapor de agua, etc.); pueden actuar positivamente sobre la calidad y el tiempo de vida del alimento (Carrasco, Villarroel y Cevallos, 2002).

Análisis termogravimétrico (TGA)

Esta técnica analítica permite medir la variación de peso de una muestra, frente a la temperatura en el tiempo; para estudiar las reacciones de disgregación de materiales (Jauhiainen, Conesa, Font, y Martín-Gullón, 2004).

Análisis infrarrojo

Es aquel que permite conocer el comportamiento de un material, cuando este sufre un cambio en su composición molecular. La espectroscopía infrarroja sondea las propiedades vibratorias de átomos y moléculas; el espectro resultante representa la absorción molecular y transmisión, creando una huella molecular que revela la composición de sólidos, líquidos y gases (Berthomieu & Hienerwadel, 2009).

2.3. Antecedentes de investigación

Choque-Quispe *et al.* (2021), tuvieron como objetivo preparar películas comestibles a partir de almidón de papa nativa variedad Allcca sipas (*Solanum tuberosum* subsp. Andigena), mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y glicerina. Formularon doce películas comestibles en diferentes proporciones por termosíntesis. Observaron que el mucílago y el glicerol tienen un efecto directo significativo sobre la solubilidad de la película y un efecto inverso sobre la a_w , mientras que el efecto del almidón es el contrario. Asimismo, mencionan que, la a_w osciló entre 0,562 y 0,639 y el análisis FTIR mostró que la interacción de los componentes en las películas se ve influenciada considerablemente por la adición de mucílago. Además, observaron que el análisis TGA/DTA reportó baja estabilidad térmica en las películas, reteniendo agua alrededor de los 100 °C, y mostrando tendencia a perder peso cuando el contenido de almidón es alto, mientras que ocurría lo contrario con la adición de mucílago; también se observó que alrededor de los 310 °C, la máxima pérdida de peso se observó entre 53,6 y 86,1%. Mientras que, las imágenes SEM mostraron películas uniformes sin grietas. Finalmente mencionan que, los resultados son prometedores y muestran la posibilidad de preparar películas comestibles a partir de almidón y mucílago de papa nativa.

Sandhu, K. S., Sharma, L., Kaur, M., y Kaur, R. (2020), tuvieron como objetivo desarrollar películas compuestas comestibles a partir de mezclas de almidón de mijo perla (PMS) y goma de carragenina (CG). Utilizaron la metodología del diseño giratorio compuesto central de la superficie de respuesta para optimizar las concentraciones de PMS (2-5 %), carragenina (1-0,5 %) y glicerol (15-35 %) para el desarrollo de una película compuesta. Evaluaron el espesor, permeabilidad al vapor de agua (WVP), solubilidad y resistencia a la tracción (TS). Mencionan que las concentraciones de almidón como las de carragenina afectaron positivamente la TS de las películas, mientras

que con una mayor concentración de glicerol sucedió lo contrario. Observaron que, la película compuesta con valores máximos de TS y WVP y solubilidad más bajos se obtuvieron en condiciones de concentraciones de 4,9 % de almidón, 5 % de carragenina y 15,73 % de plastificante. Asimismo, afirman que, la temperatura de fusión de la película PMS/CG optimizada fue más alta que la película PMS. Mientras que los estudios morfológicos mostraron una estructura homogénea de la película de PMS, mientras que la película compuesta de PMS/CG tenía una superficie áspera, más gruesa y ligeramente irregular. Las regiones estiradas en la espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier y el análisis del calorímetro de barrido diferencial confirmaron la miscibilidad y la estabilidad térmica de los diferentes componentes de las películas compuestas de PMS/CG. Finalmente, reportan que los resultados indicaron que la película PMS/CG optimizada desarrollada poseía menor WVP, solubilidad, pero mayor transparencia y TS en comparación con la película PMS.

González *et al.* (2019), midieron el rendimiento de extracción de mucílago, el espesor, el color, la permeabilidad al vapor de agua, la tasa de transmisión de luz, la transparencia de la película, la solubilidad, la estabilidad de la dispersión y la resistencia a la punción. Asimismo, indica que Jalpa proporcionó el mucílago más soluble con el mayor espesor (0.105 mm). Copena F1 proporcionó la película más clara con la mayor transparencia (3,81), el mejor índice de amarillamiento y la mayor resistencia (4,44 $\text{N}\cdot\text{mm}^{-1}$). Además, esta película tuvo la mejor tasa de transmisión de luz (48,93%). La Copena F1 mostró la mejor viscosidad de la solución de formación de película. Finalmente reportaron que los resultados indican que el mucílago mezclado con pectina es una fuente viable para la elaboración de películas comestibles.

Salinas, Trejo, y Lira, (2015), desarrollaron biopelículas comestibles a base de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) variedad “Milpa alta” con un componente

proteico (grentina) y otro lipídico (cera de abeja), de igual manera caracterizaron las propiedades mecánicas, físicas y de barrera. Menciona que, cada formulación tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.05$) en las propiedades evaluadas y que la adición de cera de abeja disminuye la permeabilidad al vapor de agua de las biopelículas. Asimismo, indican que el esfuerzo de fractura creció al aumentar mucílago de nopal en mezcla con un alto porcentaje de grenetina y disminuyó con la adición de cera de abeja. Las biopelículas con dos componentes (1.5 % (p/v) de grenetina con 0.5, 1 y 1.5 % (p/v) de mucílago de nopal presentaron mayor esfuerzo de punción (0.25-0.36 MPa). Concluyeron que las biopelículas elaboradas a base de mucílago de nopal, cera de abeja y grenetina fueron las que presentaron mejores características físicas y de barrera.

Dussán-Sarria, Torres-León, y Hleap-Zapata (2014), evaluaron las condiciones adecuadas para el almacenamiento de mango (*Tommy Atkins*) mínimamente procesado a través del uso de un recubrimiento comestible a base de almidón de yuca y cera de carnauba adicionando ácidos orgánicos (1 %) y cloruro de calcio (1 %). Emplearon un diseño experimental completamente al azar con tres repeticiones, con un total de ocho tratamientos. Además, aplicaron la estadística descriptiva, ANOVA y comparación de medias utilizando el ensayo Tukey y utilizaron el software SAS 9.3 ($p < 0.05$). Asimismo, evaluaron el efecto de cuatro empaques (PVC, vacío, bolsa y PET). El fruto lo almacenaron a 5 ± 1 °C y 90 ± 2 % de humedad relativa y se midieron la calidad cada cuatro días, durante 24 días. Concluyeron que, el mango mínimamente procesado tratado con ácido cítrico, ácido ascórbico, cloruro de calcio y recubrimiento comestible, envasado en PET (tereftalato de polietileno) presentó mejor condición de almacenamiento.

Moncayo (2013) desarrolló formulaciones de recubrimientos comestibles las cuales se emplearon para recubrir frutas y elaborar biopelículas comestibles por la técnica de moldeo por evaporación de solvente. Evaluó el efecto en las propiedades de espesor,

permeabilidad al vapor de agua, mecánicas y color. Las biopelículas fueron elaboradas con dextrana en concentraciones de 2, 3 y 5 % p/v, pectina 0, 0.1, 0.4, 1 y 2 % p/v, glicerol y sorbitol al 70 % p/v en concentraciones 0, 0.2, 0.5, 1 y 1.5, % v/v, polisorbato 80 en concentraciones de 0.1, 0.2, 0.5 %v/v, el aceite de canola; lo evaluó en concentraciones de 0.1, 0.2, 0.5 % v/v y el aceite de canela en la concentración de 0.005 % v/v. El método de aplicación del recubrimiento en frutas fue por inmersión y aspersion durante el almacenamiento en refrigeración. Las formulaciones fueron aplicadas en fresa, arándano y feijoa. Además, durante su investigación realizó un seguimiento de las características sensoriales, de textura, propiedades fisicoquímicas y microbiológicas durante el almacenamiento. Encontró que las biopelículas con alto contenido de dextrana fueron quebradizas y que con altas concentraciones de plastificantes las biopelículas son elásticas y altamente higroscópicas, estas biopelículas no fueron caracterizadas. Asimismo, menciona que la aplicación del recubrimiento por los métodos de inmersión y aspersion no presentaron diferencias significativas en cuanto a sólidos solubles, pH y pérdida de peso y que sensorialmente el parámetro de apariencia y brillo presentaron mayor aceptación. Finalmente, menciona que los recubrimientos comestibles a base de dextrana muestran potencial para extender la vida útil de frutas.

Espino-Díaz *et al*, (2010), en su investigación desarrollaron y caracterizaron biopelículas comestibles elaboradas con el mucílago de la variedad *Opuntia ficus - indica*, prepararon dispersiones formadoras de película de mucílago a diferentes pH (3, 4, 5.6, 7 y 8) y concentración de calcio (0% y 30% de CaCl_2 , con respecto al peso del mucílago), y determinaron su tamaño de partícula, prepararon biopelículas de mucílago con y sin calcio (MFCa y MF, respectivamente). El efecto del calcio y el pH sobre las biopelículas de mucílago lo evaluaron determinando el color, la resistencia a la tracción (TS), el espesor y el porcentaje de elongación (% E). El peso molecular promedio de las diferentes

fracciones de mucílago fue: 3.4×10^6 (0.73%), 1×10^5 (1.46%), 1.1×10^3 (45.79%) y 2.4×10^2 Da (52.03%). Las dispersiones acuosas de mucílago sin calcio presentaron partículas con un tamaño promedio de 15.4 μm , mayor que las dispersiones con calcio, 13.2 μm . Las biopelículas de MFCa mostraron mayor espesor (0,13 mm) que las biopelículas de MF (0,10 mm). El calcio y el pH afectaron las propiedades mecánicas de las biopelículas; el TS más grande se observó en las biopelículas MF, mientras que el % E más alto se observó en las biopelículas MFCa. Las mayores diferencias entre las biopelículas de MF y MFCa se observaron a pH 5.6 y 7 para TS y a pH 4 y 8 para % E. No observaron ningún efecto del pH y el calcio sobre la luminosidad y el ángulo de tonalidad. Mencionan que, para MF los valores de croma más altos que la formulación MFCa, y aumentaron a medida que aumentó el pH de las biopelículas.

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Hipótesis general

Las biopelículas comestibles elaborados a partir de mucílago de nopal (*Opuntia ficus indica*) y almidón de oca (*Oxalis tuberosa*) presentan buenas características para el empleo como recubrimiento de alimentos.

3.2. Hipótesis específicas

- ✓ Las biopelículas obtenidas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, presentan características físicas y químicas adecuadas.
- ✓ Las biopelículas obtenidas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, muestran buenas características mecánicas.
- ✓ La incorporación de mucílago de nopal en las biopelículas elaboradas con almidón de oca, presentan características resistentes a la degradación térmica.
- ✓ Las biopelículas elaboradas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, muestran características estructurales optimas.

3.3. Variables e indicadores

3.3.1. Variables independientes

Tabla 3.

Variables Independientes

VARIABLE	Codificación
Concentración de almidón de oca (<i>Oxalis tuberosa</i>)	AO
Concentración de mucílago de nopal (<i>Opuntia ficus indica</i>)	M
Concentración de pectina	P
Concentración de glicerina	G

3.3.2. Variables dependientes

Tabla 4.

Variables Dependientes

VARIABLE
Características físicas y químicas
Características mecánicas.
Características térmicas
Características estructurales (grupos funcionales)

3.3.3. Operacionalización de variables

En la siguiente Tabla 5 se muestra la operacionalización de las variables identificadas.

Tabla 5.
Operacionalización de variables

Variables	Indicador	Unidad	Definición de operaciones			Instrumento
			Método	Técnica		
DE ENTRADA						
Glicerina	% adición	mL	Formulación	Medida	Probeta	
Almidón de oca	% adición	mL	Formulación	Medida	Probeta	
Mucílago	% adición	mL	Formulación	Medida	Probeta	
Pectina	% adición	mL	Formulación	Medida	Probeta	
DE SALIDA O DEPENDIENTES						
	Densidad	g/cm ³	Gravimétrico		Micrómetro y balanza analítica	
Características físicas y químicas	Transparencia	Transmitancia	Fotométrico	Espectroscopia	Espectrofotómetro	
	Solubilidad	%	Gravimétrico	Solubilidad	Balanza analítica	
	Humedad	%	Gravimétrico		Balanza analítica	
	Actividad de agua	-	Higrométrico		Higrómetro eléctrico	
Características mecánicas	Esfuerzo máximo	MPa	Tracción	Tracción	Máquina de esfuerzos	
	Elongación	%	Tracción	Tracción	Máquina de esfuerzos	
Características terminas	Estabilidad térmica	%	Térmico/ Gravimétrico	Termogravimétrico	Calorímetro	
Características estructurales	Grupos funcionales	Transmitancia	Espectroscópico	Espectroscopia de infrarrojo	Espectrofotómetro FTIR	

Fuente: elaboración propia

3.3.3.1. Diseño de experimentos

La Tabla 6 muestra las formulaciones de las biopelículas comestibles que fueron elaborados y caracterizados.

Tabla 6.
Formulación para la elaboración de las biopelículas comestibles

Tratamiento	% AO (2%)	% P (2%)	% G	% M	T (°C)
T1-40	50	42	4	4	40
T2-40	60	32	4	4	40
T3-40	70	22	4	4	40
T4-50	50	42	4	4	50
T5-50	60	32	4	4	50
T6-50	70	22	4	4	50
T7-60	50	42	4	4	60
T8-60	60	32	4	4	60
T9-60	70	22	4	4	60

Donde: AO, almidón de oca; P, pectina; G, glicerina; M, mucílago de nopal y T, temperatura

IV. METODOLOGÍA

4.1. Ámbito de estudio

La investigación tuvo lugar en las instalaciones de la Universidad Nacional José María Arguedas, en el Laboratorio de Investigación en Control y Análisis de Aguas, que se encuentra ubicado en la región de Apurímac.

4.2. Tipo y nivel de investigación

La investigación fue experimental debido a la manipulación de variables y descriptiva debido al interés de observación del cambio o caracterización de las variables de respuesta. El nivel de investigación es básico.

4.3. Unidad de análisis

Fueron las biopelículas comestibles sintetizadas a partir de almidón de oca y mucílago de nopal.

4.4. Población de estudio

La población estudiada fueron las biopelículas comestibles elaboradas (Tabla 7) a partir de almidón de oca, mucílago de nopal, pectina y glicerina, los cuales se sometieron a pruebas para determinar sus propiedades fisicoquímicas, térmicas, mecánicas y estructurales.

4.5. Acondicionamiento de la materia prima

Para la elaboración de las biopelículas comestibles primero, se procedió a la extracción de almidón de oca y mucílago de nopal.

4.5.1. Extracción de almidón de oca

Para la extracción de almidón, se utilizó la metodología de extracción por decantación descrita por Melian (2010) con algunas modificaciones basadas en Salwa, Hanan, y Nesserien (2010) y Aprianita, Purwandari, Watson, y Vasiljevic (2009), y

adaptada para las muestras de oca. La Figura 15, muestra el diagrama de flujo del proceso de extracción del almidón.

La oca empleada para la extracción del almidón fue de la variedad Lunchuchu, estas se lavaron con agua destilada, luego fueron cortadas en rodajas de aproximadamente 3 cm de espesor. Seguidamente se llevó a una licuadora marca Oster modelo BLSTBESTE con una proporción de agua (1:1). El licuado se filtró empleando una muselina y se adicionó agua destilada para lograr obtener la mayor cantidad de almidón. Lo retenido en la muselina nuevamente se colocó licuo añadiendo agua en una relación de (1:1). Inmediatamente se filtró en la muselina y se vertió más agua destilada con la finalidad de arrastrar la mayor cantidad de almidón. El agua filtrada se dejó decantar 4 h a temperatura ambiente. Transcurrido el tiempo se obtuvo una capa estable de almidón en el fondo del recipiente. Seguidamente, se desechó el sobrenadante, y se procedió a agregar agua para eliminar la fibra aun presente y se dejó reposar durante 1,5 horas. A partir de la segunda decantación se realizó el mismo procedimiento hasta obtener un sobrenadante limpio y transparente y que la superficie del almidón formado en la base no contuviera de fibra. Finalmente, el almidón obtenido fue llevado a una estufa de convección forzado Marca Binder modelo FED 115 a 45 ± 2 °C por 24 horas, a continuación, se procedió a moler el almidón previamente secado en un mortero y se tamizó a 500 μm en un tamizador eléctrico de marca Retsch modelo AS 200.

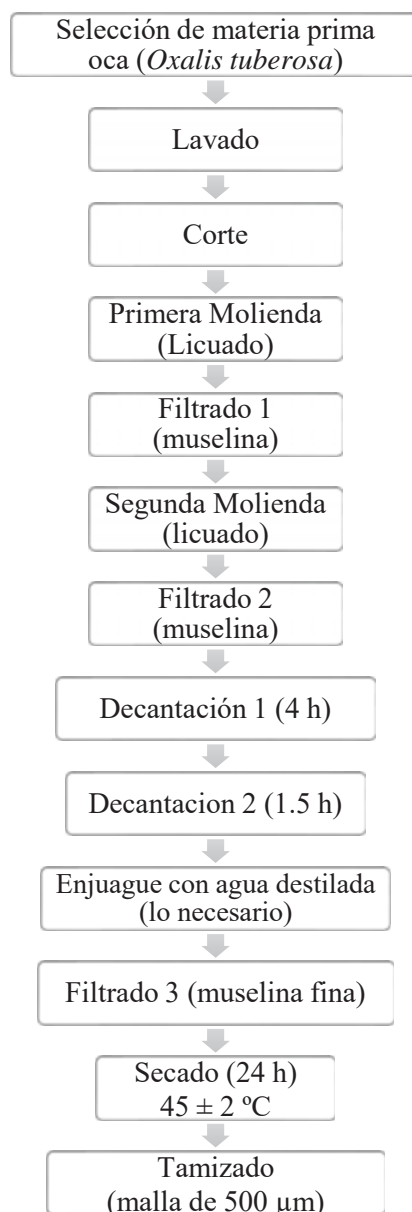


Figura 15. Flujo de proceso de extracción del almidón de oca

4.5.1.1. Extracción de mucílago de nopal

Para la extracción del mucílago de nopal se empleó la propuesta de Guadarrama (2016), tal como se muestra en la Figura 16.

Se seleccionaron nopales frescos y tiernos de aproximadamente de 20 a 30 cm de longitud y aquellos exentos de daño físico o microbiológico, posteriormente se procedió a realizar su desinfección, para ello primero se lavaron con agua potable e inmediatamente se procedió a desinfectar en una solución de NaClO a 100 ppm por 10 minutos. Luego se pelaron y quitaron las espinas de los nopales para poder cortarlos en trozos de 1x1 cm

aproximadamente. Los trozos de nopal (1.0 kg) se sumergieron en una solución con una relación de 1:1 agua-nopales, luego se dejaron sumergidos alrededor de 24 h. Transcurrido el tiempo se procedió a filtrar y separar los trozos de nopal del mucílago. Finalmente, se obtuvo 750 mL de mucílago que se refrigeró a una temperatura de 4 °C para ser usados posteriormente.

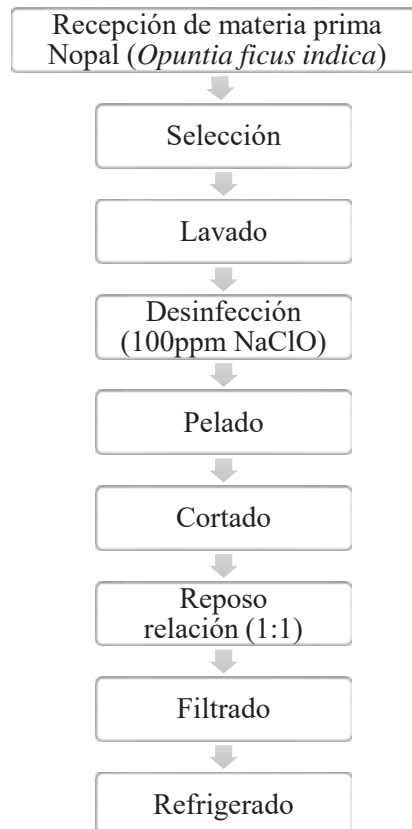


Figura 16. Flujo de proceso de extracción de mucílago de nopal

4.5.1.2. Elaboración de la biopelícula comestible

La elaboración de las biopelículas comestibles se realizó en base a las formulaciones propuestas en la Tabla 6.

La solución de almidón de oca (AO) se preparó al 2 % y se procedió a realizar su gelatinización a 70 °C, que se mantuvo en reposo hasta alcanzar temperatura ambiente, asimismo se preparó la solución de pectina (P) al 2 % a 40 °C. Luego se procedió a homogenizar la baba de mucílago (M), para ello se empleó un agitador magnético marca CAT modelo M6 a 500 rpm hasta alcanzar la homogenización.

La Figura 17, muestra el proceso de elaboración de la película comestible, a partir de almidón de oca (AO), glicerina (G), pectina (P) y mucílago (M).

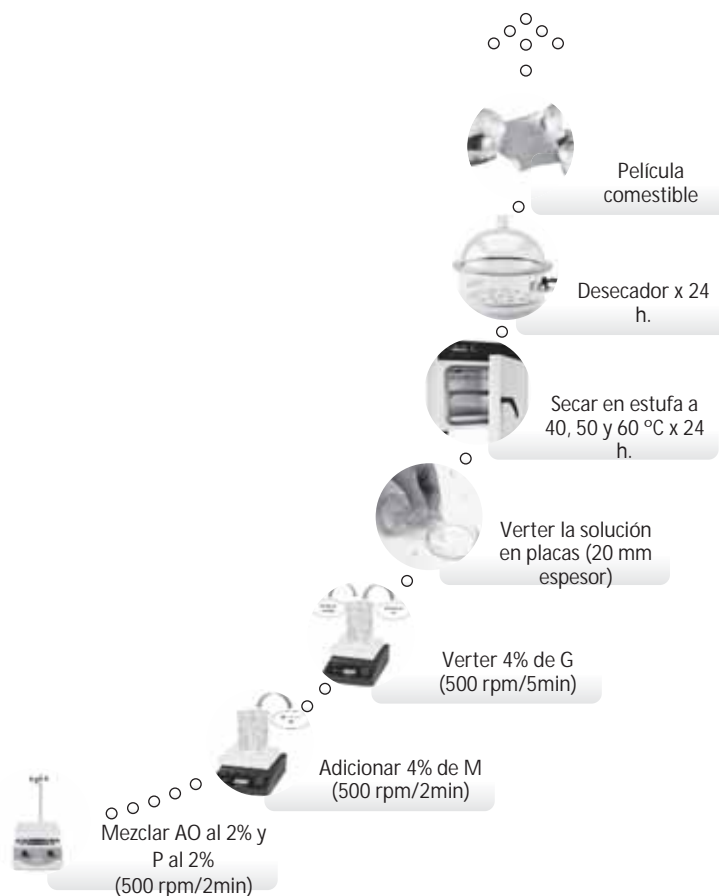


Figura 17. Proceso de elaboración de la biopelícula comestible.

En base a las formulaciones propuestas (Tabla 7), se empleó un vaso de precipitado y se vertió la solución AO al 2%, e inmediatamente se añadió la solución de P al 2% y se agitó a 500 rpm por 2 min, luego se adicionó la baba de mucílago dejando en agitación a 500 rpm por 2 min, posteriormente se adicionó la glicerina y se agitó por 5min. Luego, se dejó en reposo por 30 min, la agitación se llevó a cabo en un termoagitador magnético marca CAT modelo M6. La nueva matriz en reposo se vertió en placas Petri, midiendo el espesor (altura de 20 mm) con un Vernier y para ayudar con la distribución la solución en la placa Petri se agitó suavemente, luego se llevaron a una estufa de convección forzado Marca Binder modelo FED 115 a temperaturas de 40, 50 y 60 °C por 24 h, a continuación, las muestras se transportaron a un desecador por 24 h.

4.6. Técnicas de recolección de información

4.6.1. Caracterización física y química de la biopelícula

4.6.1.1. Densidad

Se utilizó la técnica propuesta por Salgado, Molina, Petruccelli, y Mauri, (2010) con algunas modificaciones; la densidad de las biopelículas se calculó directamente a partir del peso y dimensiones de la biopelícula a través de la siguiente (Ecuación 2)

$$\rho = \frac{m}{A * \delta} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Dónde: A = área de la biopelícula (cm²);

δ = espesor de la biopelícula (cm)

m = masa de la biopelícula seca (g) y

ρ = densidad de la materia seca de la biopelícula (g/cm³).

4.6.1.2. Humedad

Esta prueba se realizó empleando la metodología AOAC 2001.12-2005 (AOAC, 2005). Las biopelículas comestibles que fueron recortadas en un aproximado de 2 cm², se pusieron en contenedores hechos de papel aluminio. La humedad de las biopelículas se determinó por diferencia de peso. Para ello, se empleó una estufa de convección forzada marca Binder modelo FED 115 a una temperatura de 105 °C por un tiempo de 24 h.

4.6.1.3. Transparencia

Se utilizó la metodología empleada por Oregel-Zamudio *et al.*, (2016), la absorbancia de una tira de biopelícula (1x4 cm) se determinó a una longitud de onda de 600 nm en un equipo espectrofotométrico UV-Vis marca Thermo Scientific, modelo Genesys 150, los valores obtenidos de absorbancia se dividieron por el espesor de la biopelícula y se calculó la transparencia (abs.mm⁻¹).

4.6.1.4. Solubilidad

Se empleó el método de Bertuzzi, Armada, y Gottifredi (2007), con algunas modificaciones. Las muestras de biopelículas se colocaron en un desecador por una

semana para obtener el peso seco inicial. Las biopelículas previamente pesadas se colocaron en 40 mL de agua desionizada a 25 °C por 24 h a 100 rpm en un sistema de agitación marca Velp Scientifica modelo F10230270. Los restos que no se solubilizaron se retiraron por centrifugación y secaron para obtener el peso seco final. La ecuación 3, fue empleada para determinar el porcentaje de solubilidad de las biopelículas comestibles:

$$\% \text{ solubilidad} = \frac{\text{peso seco inicial} - \text{peso seco final}}{\text{peso seco inicial}} \times 100 \quad (\text{Ecuación 3})$$

4.6.1.5. Actividad de agua (a_w)

La a_w de las biopelículas comestibles se evaluó a través de un analizador de actividad de agua marca Rotronic modelo HP23-AW.

4.6.2. Caracterización térmica

4.6.2.1. Análisis termogravimétrico (TGA)

La estabilidad térmica de las biopelículas comestibles se analizó en un equipo de marca LINSEIS modelo STA PT1600 se pesaron de 7.9 a 21.6 mg de muestra, se consideró la norma ASTM E1131-08 (2014). (ASTM, 2014)

4.6.3. Caracterización mecánica

Se determinó el esfuerzo máximo a la ruptura y elongación de los biopolímeros a través de un texturómetro TA.XT2 marca Stable Micro Systems, se tomó en cuenta el protocolo propuesto por la ASTM D882-18 (ASTM, 2018).

4.6.4. Caracterización estructural

4.6.4.1. Espectrofotometría de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

El análisis infrarrojo fue realizado empleando un espectrómetro marca Thermo Fisher modelo Nicolet iS50 323/5000, se prepararon tabletas prensadas con 0.1% de la biopelícula en KBr y se llevaron al módulo de transmisión del espectrómetro FT-IR, en un rango de 400 a 4000 cm^{-1} con resolución de 4 cm^{-1} .

4.7. Técnicas de análisis e interpretación de la información

Se aplicó la estadística descriptiva (media y desviación estándar) a los análisis realizados en las variables de estudio. Asimismo, los resultados de las características fisicoquímicas y mecánicas, se sometieron a un ANDEVA (análisis de varianza), incluyendo pruebas de comparación múltiple Tukey, para el procesamiento de datos se usaron los paquetes estadísticos Statgraphics Centurion XVII, Minitab V.17 y Excel.

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Características fisicoquímicas

5.1.1. Determinación de la densidad

Los valores de la densidad en las biopelículas comestibles se observan en la Tabla 7, en ella se puede apreciar que los valores oscilaron entre 1.803 a 2.238 g/cm³. Además, se puede apreciar que hay diferencia significativa entre los tratamientos (p-value<0.05, Anexo B1). Asimismo, el tratamiento T5-50, es el que presentó la mayor densidad, mientras que, el tratamiento T9-60, reportó menor densidad. Además, el coeficiente de variabilidad fue menor 9.1 % para todos los tratamientos. Alimi, Workneh y Femi (2021) reportaron valores similares para biopelículas comestibles hechas de almidón de acha (*Digitalia exilis*) e iburu (*Digitalia iburua*).

Tabla 7.
Densidad (g/cm³) de las biopelículas comestibles

Tratamiento	\bar{x}	\pm	s	CV (%)	Dif. Sig.*
T1-40	1.979	\pm	0.162	8.2	AB
T2-40	2.102	\pm	0.144	6.9	AB
T3-40	1.864	\pm	0.138	7.4	AB
T4-50	1.966	\pm	0.119	6.0	AB
T5-50	2.238	\pm	0.065	2.9	A
T6-50	1.884	\pm	0.171	9.1	AB
T7-60	2.069	\pm	0.166	8.0	AB
T8-60	1.978	\pm	0.181	9.1	AB
T9-60	1.803	\pm	0.156	8.7	B

*Evaluados a través del Test de Tukey al 5% de significancia, CV: coeficiente de variabilidad, \bar{x} : promedio, s: desviación estándar, Dif. Sig.: diferencia significativa, Letras diferentes indican diferencia significativa.

En la Figura 18, muestra el diagrama de efectos principales, en el cual la densidad es mayor para proporciones de 60% de almidón, 32% de pectina, y 50 °C, tal como se apreció en la Tabla 8 para el tratamiento T5-50; esto se debe al efecto del plastificante, ya que los enlaces almidón-almidón se sustituyen por enlaces almidón-glicerol-almidón que conlleva a un aumento del espesor de la biopelícula (Bourtoom, 2008). Además, es posible que la distribución de la mezcla (almidón-pectina-mucílago-glicerina) para formar la biopelícula haya tenido una mejor distribución en la placa de secado, evitando la formación de poros y microporos.

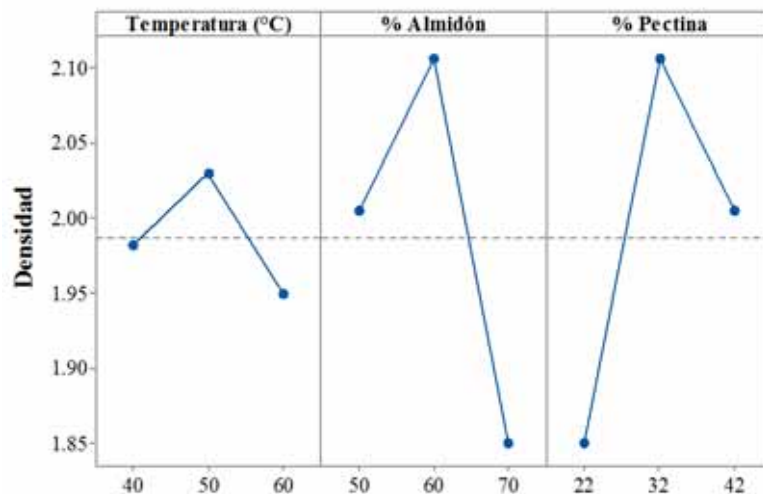


Figura 18: Diagrama de efectos para la densidad

Por otra parte, esto no se observa para los tratamientos con formulaciones de 70 % de almidón y 22 % de pectina en su composición. Los tratamientos que presentan una densidad intermedia son aquellos que han sido formulados con 50 % de almidón y 43 % de pectina. Para el caso específico de la temperatura, aquellos tratamientos que han sido secados a 50 °C presentan mayor densidad; en cambio, aquellos secados a 60 °C, presentan menor densidad en las formulaciones realizadas, es probable que para estas formulaciones se hayan formado poros en la matriz y que, durante la operación de secado, el agua atrapada en el poro al difundirse por su cambio de estado haya dejado vacíos y como consecuencia la biopelícula tenga menor masa. Asimismo, es posible que, al

momento de verter la solución en las placas de secado, debido a la variación de forma y tamaño no perceptible de las placas, las biopelículas comestibles tengan diferencias significativas de densidad. Ratna *et al.*, (2018) menciona que, cuanto más volumen de solución de la biopelícula comestible se vierte, se obtendrá una biopelícula comestible más gruesa.

La Figura 19, muestra el diagrama de intervalos para la densidad, en la cual se puede observar que, los tratamientos T2-40, T5-50 y T7-60, presentan mayor densidad frente a los tratamientos T1-40, T3-40, T4-50, T6-50, T8-60 y T9-60, esta variación se atribuye a la presencia de poros en la microestructura de la biopelícula comestible que fue observado por Alimi, Workneh y Femi (2021) en un microscopio electrónico de barrido.

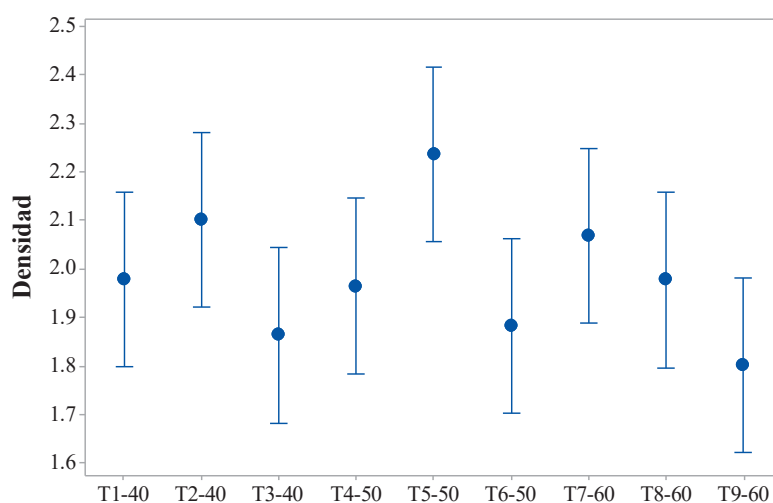


Figura 19: Diagrama de intervalos para la densidad

5.1.2. Determinación de la humedad

La humedad de las biopelículas comestibles se muestra en la Tabla 8, en el que se observa que, la humedad de los tratamientos se encuentra en un rango de 22.3 a 25.3 % con un coeficiente de variabilidad menor a 1.8 %, similares resultados obtuvieron Galindez *et al.*, (2019) y Susmitha *et al.*, (2021) en biopelículas comestibles hechas a partir de almidón de ulluco y almidón de maíz-gelatina respectivamente.

El tratamiento T2-40, es el que presenta mayor humedad, este fenómeno se debe a que la pectina presenta estructuras abiertas con al menos 2 grupos hidroxilo que facilita

el enlace con el agua (Damodaran *et al.*, 2007). Asimismo, a bajas temperaturas de secado, las moléculas de agua quedan atrapadas en las microestructuras porosas de la biopelícula comestible; asimismo, se puede atribuir a que el plastificante (glicerina) evita la difusión del vapor del agua hacia el exterior, debido a su viscosidad.

Por otra parte, el tratamiento T9-60 es el que mostró menor contenido de humedad, esto se podría deber a la interacción entre las cadenas del polímero y las moléculas de agua, que permiten la evaporación del agua durante el proceso de secado (Galindez *et al.*, 2019; Homez-Jara *et al.*, 2018). Asimismo, los tratamientos con mayor contenido de humedad son más flexibles y estirables (Nur Hanani *et al.*, 2018), este hecho se puede apreciar en la Tabla 12. Igualmente, se aprecia la existencia de diferencia significativa entre los tratamientos (p-value<0.05, Anexo B3)

Tabla 8.
Porcentaje de Humedad de las biopelículas comestibles

Tratamiento	\bar{x}	\pm	s	CV (%)	Dif. Sig.*
T1-40	25.1	\pm	0.1	0.3	A
T2-40	25.3	\pm	0.4	1.6	A
T3-40	24.0	\pm	0.3	1.3	ABC
T4-50	24.6	\pm	0.5	1.8	AB
T5-50	24.4	\pm	0.1	0.4	ABC
T6-50	23.5	\pm	0.3	1.4	BC
T7-60	23.5	\pm	0.2	0.8	BC
T8-60	23.1	\pm	0.2	0.7	BC
T9-60	22.3	\pm	0.2	1.0	C

*Evaluados a través del Test de Tukey al 5% de significancia, CV: coeficiente de variabilidad, \bar{x} : promedio, s: desviación estándar, Dif. Sig.: diferencia significativa, Letras diferentes indican diferencia significativa.

El diagrama de efectos principales para la humedad se muestra en la Figura 20, los tratamientos con formulaciones de 50 % almidón y 42% de pectina presentan mayor % humedad; además, Juárez-Enriquez (2017), mencionan la alta higroscopicidad que presenta la pectina. Por otra parte, aquellos tratamientos con formulaciones de 70 % almidón y 22 % de pectina presentan menores porcentajes de humedad; esto podría ser debido a que, la glicerina es una molécula pequeña que le facilita llenar los espacios eficientemente en la red intermolecular, por lo que esta condición disminuirá la

oportunidad de que el agua sea adsorbida reduciendo la tasa de transferencia de agua en la biopelícula (Farhan y Hani, 2017). Asimismo, se observa que formulaciones secadas a 60 °C, presentan menor contenido de humedad que las formulaciones secadas a temperaturas de 40 °C que presentan mayor contenido de humedad.

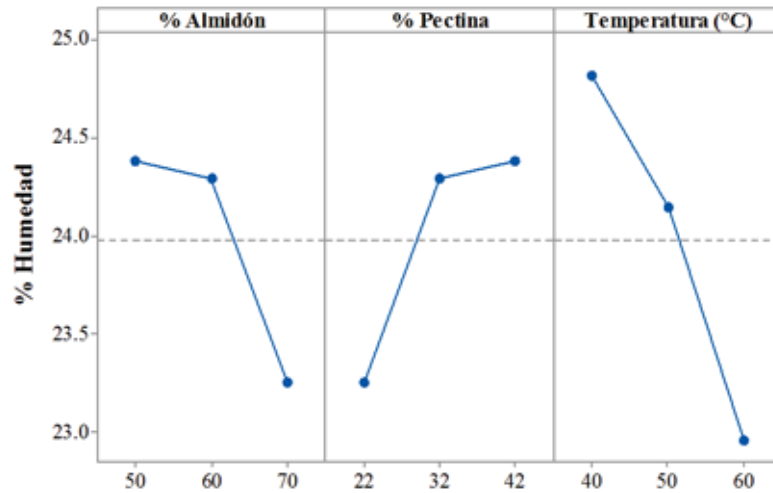


Figura 20: Diagrama de efectos para el porcentaje de humedad

El diagrama de intervalo puede ser apreciada en la Figura 21, en el que se muestra que los intervalos de los tratamientos T1-40 y T2-40 son los que presentan mayor humedad, en cambio los tratamientos T8-60 y T9-60 son los que presentan menor humedad, este hecho se debe a que la temperatura influye significativamente sobre las biopelículas comestibles como se puede apreciar en la Figura 20.

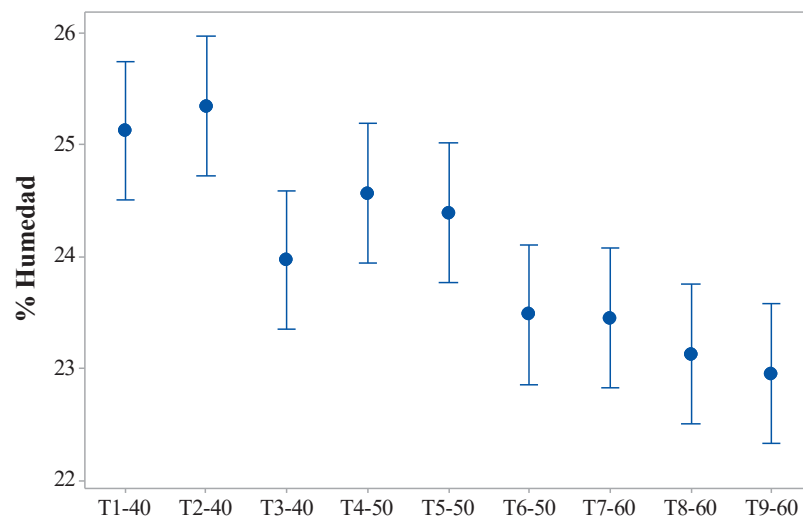


Figura 21: Diagrama de intervalos para el porcentaje de humedad

5.1.3. Determinación de la solubilidad

La Tabla 9, muestra que la solubilidad de las biopelículas se encontró en un rango de 91.7 a 99.2 % de solubilidad en agua con un coeficiente de variabilidad menor a 2.5 %. González *et al.* (2019), reportó solubilidades de 91,04 % en biopelículas de mucílago de nopal; sin embargo, Choque-Quispe *et al.* (2019), obtuvo valores de hasta 54.8 % en biopelículas comestibles a base de almidón de papa nativa y mucílago de nopal. Asimismo, se observa que hay diferencia significativa entre tratamientos (p -value<0.05, Anexo B2).

El tratamiento T4-50, es el que presentó la mayor solubilidad, este fenómeno es atribuido al contenido de amilosa en el almidón debido a que no se retrograda (Vargas, Martínez, y Velezmoro, 2016; Sandhu y Singh, 2007). Además, se puede atribuir a un mayor contenido de grupos hidrofílicos (Fakhoury *et al.*, 2012) que se formaron en las biopelículas comestibles. Por otra parte, el tratamiento T5-50, es el de menor solubilidad. Además, todos los tratamientos presentaron alta solubilidad (mayor a 91 %), esto se puede atribuir al mucílago que tiene una estructura muy ramificada y contiene grupos carboxilo, que le dan una mayor facilidad para enlazarse e interactuar con los grupos carboxilo e hidroxilo del almidón (Espino-Díaz *et al.*, 2010 y Martínez *et al.*, 2019).

Tabla 9.
Porcentaje de solubilidad de las biopelículas comestibles

Tratamiento	\bar{x}	\pm	s	CV (%)	Dif. Sig.*
T1-40	97.2	\pm	1.6	1.7	AB
T2-40	93.9	\pm	1.9	2.1	BC
T3-40	94.7	\pm	2.3	2.5	BC
T4-50	99.2	\pm	1.1	1.1	A
T5-50	91.7	\pm	1.4	1.5	C
T6-50	93.4	\pm	1.2	1.3	BC
T7-60	96.4	\pm	1.1	1.1	AB
T8-60	94.2	\pm	0.7	0.7	BC
T9-60	94.6	\pm	0.3	0.3	BC

*Evaluados a través del Test de Tukey al 5% de significancia, CV: coeficiente de variabilidad, \bar{x} : promedio, s: desviación estándar, Dif. Sig.: diferencia significativa, Letras diferentes indican diferencia significativa.

En la Figura 22, se observa que los tratamientos formulados con 50 % de almidón y 42% de pectina son los que presentaron solubilidades en el agua por encima del 97 % independientemente de la temperatura de secado, Ezzati *et al.* (2020), encontró valores de 81.36 % de solubilidad en la pectina extraída de girasoles; asimismo, la glicerina afecta positivamente en la solubilidad (Sandhu *et al.*, 2020).

En tanto, los tratamientos formulados con 60 y 70 % de almidón, 22 y 32 % de pectina presentan solubilidades por debajo de 95 %, una baja solubilidad indica que existe una mayor cohesión, debido a la formación de enlaces de hidrógeno entre las cadenas de los polímeros involucrados (Nazan y Şahbaz, 2004). Con respecto a la temperatura, este no tiene efecto significativo en la solubilidad, ya que se encuentra oscilando una solubilidad de 95 %.

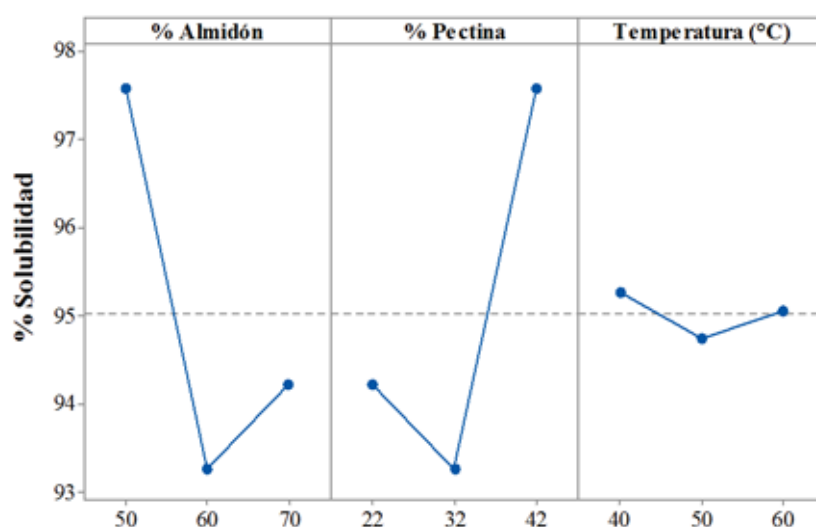


Figura 22: Diagrama de efectos para el porcentaje solubilidad

El diagrama de intervalos se muestra en la Figura 23, en el que se aprecia que los tratamientos T4-50, T1-40 y T7-60 son los que presentaron mayor solubilidad y el tratamiento T5-50 presentó menor solubilidad en el agua. Igualmente, se observa que los tratamientos T2-40, T3-40, T6-50, T8-60 y T9-60 no muestran diferencia significativa debido a que se evidencia el traslape.

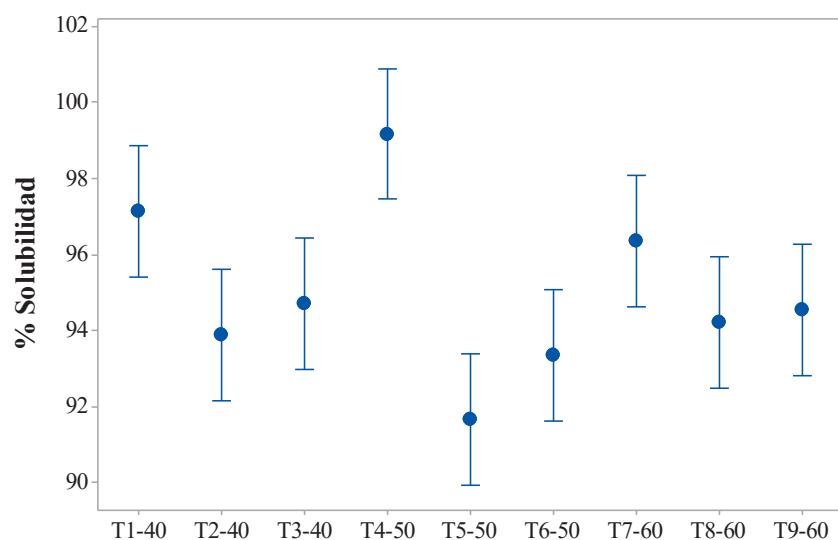


Figura 23: Diagrama de intervalos para el porcentaje de solubilidad

5.1.4. Determinación de la transparencia (T)

La transparencia de las biopelículas comestibles se muestra en la Tabla 10, en que se puede apreciar que la transparencia de las biopelículas presentó valores en un rango de 0.71 a 2.08 Abs.mm⁻¹ con un coeficiente de variabilidad menor a 8.8 %; similares resultados reportaron Silva *et al.*, (2019) con valores de 1.06 a 1.55 en biopelículas comestibles a base de almidón de yuca nativo; asimismo Galíndez *et al.*, (2019), reportaron similares resultados en biopelículas comestibles sintetizadas con almidón de ulluco y Susmitha *et al.*, (2021) en biopelículas comestibles hechas de almidón de maíz-gelatina. Además, la Tabla 11, muestra que hay diferencia significativa entre los tratamientos (p-value<0.05, Anexo B4).

El tratamiento T1-40 es el que presentó mayor transparencia con un valor de 0.71 Abs.mm⁻¹. Por otra parte, el tratamiento T9-60 es el que mostró un menor valor de transparencia que fue de 2.08 Abs.mm⁻¹, esto se puede atribuir a que el almidón en mayores cantidades es responsable del aumento de la opacidad debido a su proceso de gelatinización (Fakhoury *et al.*, 2012), influyendo negativamente en la transparencia de las biopelículas comestibles.

Tabla 10.

Transparencia de las biopelículas comestibles

Tratamiento	\bar{x}	\pm	s	CV (%)	Dif. Sig.*
T1-40	0.71	\pm	0.03	4.2	F
T2-40	0.76	\pm	0.06	8.2	EF
T3-40	1.05	\pm	0.09	8.5	D
T4-50	1.96	\pm	0.12	6.1	AB
T5-50	1.44	\pm	0.11	7.6	C
T6-50	1.90	\pm	0.05	2.7	AB
T7-60	0.98	\pm	0.01	1.2	DE
T8-60	1.73	\pm	0.15	8.8	B
T9-60	2.08	\pm	0.08	3.6	A

*Evaluados a través del Test de Tukey al 5% de significancia, CV: coeficiente de variabilidad, \bar{x} : promedio, s: desviación estándar, Dif. Sig.: diferencia significativa, Letras diferentes indican diferencia significativa.

La Figura 24 muestra el diagrama de efectos para la transparencia, en cual se observa que los tratamientos formulados con 70 % de almidón y 22% de pectina mostraron menor transparencia con valores promedio mayores a 1.6. Galindez *et al.*, (2019), menciona que el aumento de la concentración de almidón resulta en una mayor opacidad, por lo que la transparencia disminuye.

Por otro lado, los tratamientos formulados con 50 % de almidón y 42 % pectina son los que presentaron mayores valores de transparencia que se encuentran cercanos a 1.2. El efecto de la temperatura sobre las biopelículas comestibles influye significativamente; ya que, los tratamientos secados a temperatura de 40 °C presentaron mayor transparencia con valores menores a 0.9, este hecho se debe a que, la transparencia de los bioplásticos son consecuencias de su morfología y ordenamiento molecular (Chen, 1995). Además, se puede apreciar que a temperaturas superiores a 50 °C la transparencia de las biopelículas comestibles disminuye; esto se debe a la separación de fases debido a que la amilosa y la amilopectina pueden interactuar con los hidrocoloides (pectina) que forman diferentes estructuras de red (Saberri *et al.*, 2016), evitando así el paso de la luz a través de la estructura molecular de la biopelícula comestible.

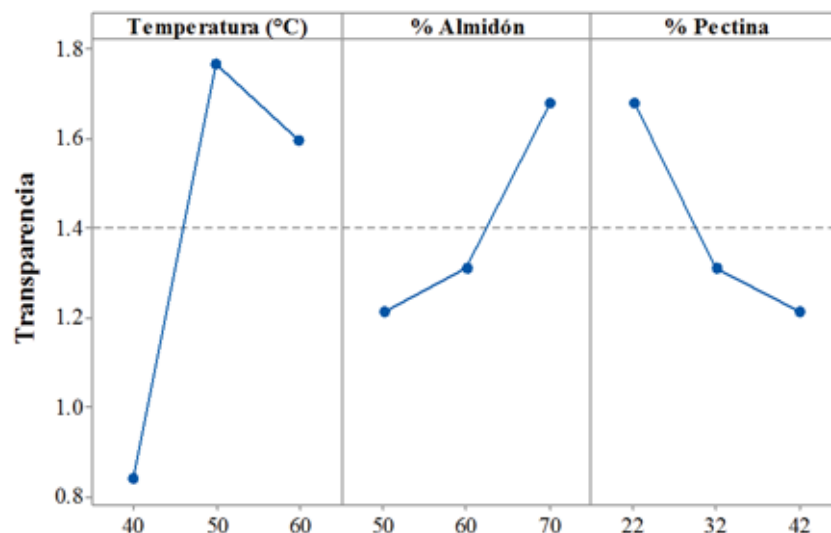


Figura 24: Diagrama de efectos para la Transparencia (T)

El diagrama de intervalos se aprecia en la Figura 25 y se observa que, los intervalos de los tratamientos T1-40 y T2-40, son lo que presentan mayor transparencia, asimismo se muestra que no presentan diferencia significativa. Por otro lado, los tratamientos T4-50, T6-60 y T9-60 tampoco presentan diferencia significativa y también son aquellos tratamientos que presentan menor transparencia.

Los intervalos de los tratamientos que presentan diferencia significativa para la transparencia son T1-40, T3-40, T5-50, T8-60 y T9-60.

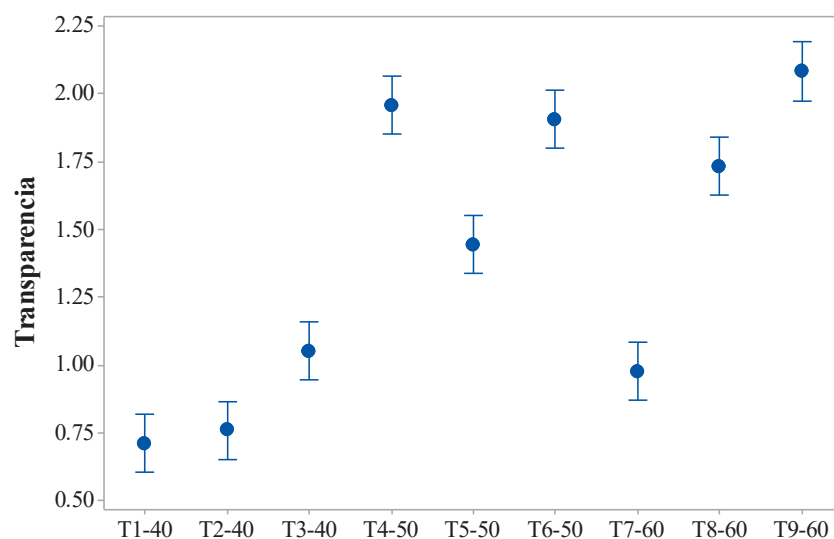


Figura 25: Diagrama de intervalos para la Transparencia (T)

5.1.5. Determinación de la actividad de agua (a_w)

La actividad de agua (a_w) de las biopelículas comestibles se muestra en la Tabla 11, en el cual se puede apreciar a_w se encuentra en un rango de 0.402 a 0.573 con un coeficiente de variabilidad menor a 1.8 %; similares resultados fueron reportados por Choque-Quispe *et al.*, (2021) con valores de 0.562 a 0.680 en biopelículas comestibles a base de almidón de papa y mucílago de nopal. El tratamiento T1-40 es el que presenta mayor a_w con un valor de 0.573; este hecho se atribuye a la disponibilidad de grupos carbonilo e hidroxilo, así como también a los residuos de azúcar del almidón y mucílago que aumentan los sitios higroscópicos activos disponibles y por consiguiente actividad de agua (Navia, Ayala y Villada, 2011; Choque-Quispe *et al.*, 2019).

Igualmente, se observa que los tratamientos a medida que la temperatura de secado acrecienta, la actividad de agua se reduce, se debe a la acción de la temperatura en la difusión del agua hacia el ambiente durante el secado. Choque-Quispe *et al.*, (2021), reporta un fenómeno contrario. El tratamiento T9-60 es el que presenta menor a_w con un valor de 0.402. Asimismo, se muestra que hay diferencia significativa (p -value<0.05, Anexo B5) entre tratamientos.

Tabla 11.
Actividad de agua (a_w) de las biopelículas comestibles

Tratamiento	\bar{x}	\pm	s	CV (%)	Dif. Sig.*
T1-40	0.573	\pm	0.005	0.9	A
T2-40	0.478	\pm	0.003	0.7	C
T3-40	0.443	\pm	0.006	1.3	D
T4-50	0.531	\pm	0.007	1.2	B
T5-50	0.420	\pm	0.007	1.5	E
T6-50	0.418	\pm	0.006	1.4	E
T7-60	0.449	\pm	0.008	1.8	D
T8-60	0.408	\pm	0.004	0.9	EF
T9-60	0.402	\pm	0.003	0.6	F

*Evaluados a través del Test de Tukey al 5% de significancia, CV: coeficiente de variabilidad, \bar{x} : promedio, s: desviación estándar, Dif. Sig.: diferencia significativa, Letras diferentes indican diferencia significativa.

El diagrama de los efectos principales puede ser apreciada en la Figura 26, en el que se observa que los tratamientos formulados con 70 % de almidón y 22% de pectina

son los que presentaron menor a_w con valores promedio menores a 0.435. Por el contrario, los tratamientos formulados con 50 % de almidón y 42 % pectina son los que presentaron mayores valores de a_w que se encontraron por encima de 0.515. Kumari *et al.*, (2021), menciona que, la alta resistencia al agua de la biopelícula comestible es una de las propiedades más importantes para la actividad de agua; además se debe a la alta higroscopicidad de la pectina (Juarez-Enriquez, 2017).

Con respecto a la temperatura; este influye directamente; ya que, los tratamientos secados a temperatura de 40 °C mostraron mayor a_w con valores cercanos a 0.5. Por el contrario, aquellos tratamientos secados a 60 °C presentaron menor a_w reportaron valores menores a 0.42, como es el caso del tratamiento T9-60 (0.402). Asimismo, una elevada actividad de agua influye directamente en el contenido de la humedad de la biopelícula comestible (Bourtoom, 2008), como se aprecia en la Tabla 9.

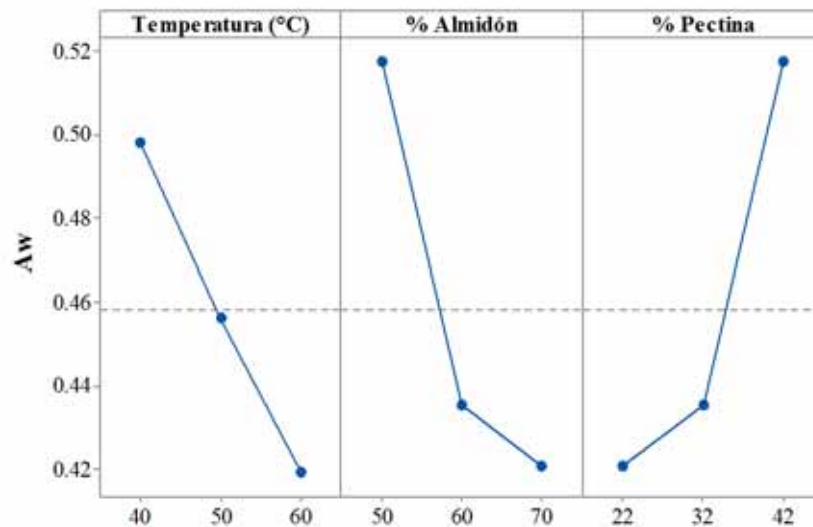


Figura 26: Diagrama de efectos para la actividad de agua (a_w)

El diagrama de intervalos se muestra en la Figura 27, se aprecia que los intervalos de los tratamientos de T1-40 y T4-50 son los que presentan mayor a_w , además que presentan diferencia significativa. En cambio, los tratamientos T8-60 y T9-60 son los que presentan menor a_w , y no presentan diferencia significativa. Por otro lado, los

tratamientos que estadísticamente presentan diferencia significativa son: T1-40, T2-40, T3-40, T4-50, T5-50 y T9-60, debido a que los intervalos no se superponen entre sí.

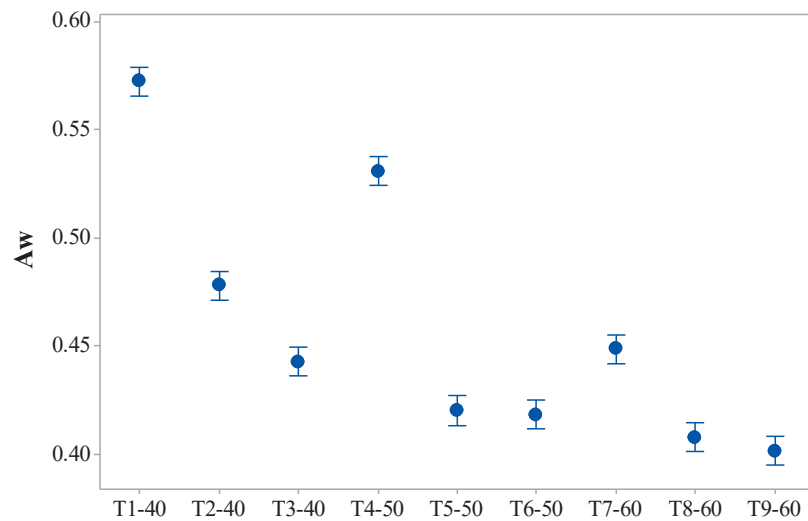


Figura 27: Diagrama de intervalos para la actividad de agua (a_w)

5.2. Características mecánicas

5.2.1. Esfuerzo máximo de las biopelículas

La variación del esfuerzo de las biopelículas comestibles se muestra en la Figura 28, en el cual se puede observar que la variación del esfuerzo de tensión a la que se han sometido las biopelículas con una carga máxima que oscila entre 0.016 a 0.022 kgf hasta llegar a la ruptura (Tabla 12); asimismo, se aprecia que los tratamientos tienen diferente comportamiento al ser sometidos a diversas cargas. Los tratamientos T2-40, T8-60 y T5-50 presentaron mayor resistencia a la ruptura, dicho de otra manera, estos tratamientos poseen mejores características elásticas durante más tiempo.

Asimismo, el tratamiento T8-60 presentó la mejor característica elástica, ya que se puede observar que durante más de 1 s sobrellevo una mayor tensión en comparación con los demás tratamientos. Por otra parte, el tratamiento T3-40 es el de menor resistencia o menor elasticidad en menor tiempo; Sorbal *et al.*, (2001) menciona que, los plastificantes se caracterizan por debilitar las fuerzas intermoleculares entre las cadenas de macromoléculas adyacentes, que aumentan el volumen libre y provocan una reducción

de la resistencia mecánica. Además, esto se debe a la composición estructural (relación %AO y %P) ya que, los tratamientos T1-40 y T4-50 presentaron similar comportamiento; asimismo, la temperatura de secado podría ser un factor que influyente debido a que los tratamientos T7-60 y T9-60 muestran similar comportamiento.

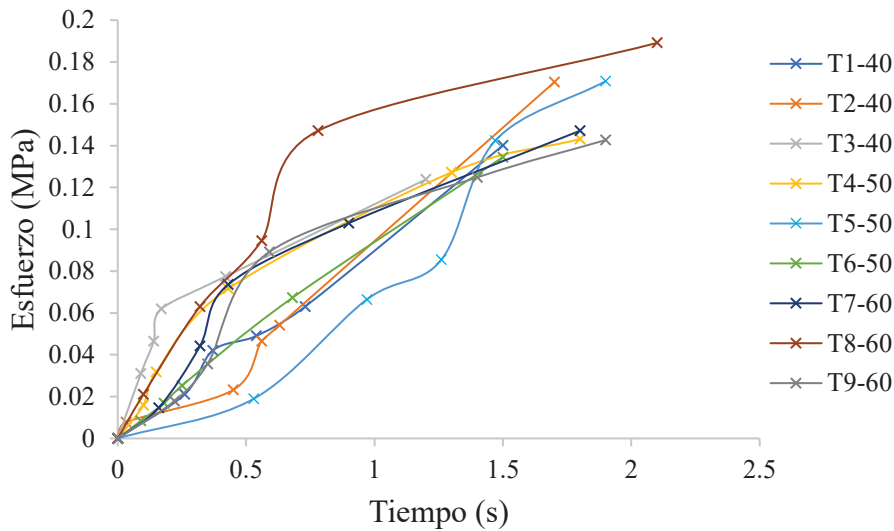


Figura 28: Variación del esfuerzo (MPa) de las biopelículas comestibles

Las características mecánicas de las biopelículas comestibles se aprecian en la Tabla 12, y muestra que el tratamiento T8-60 es el de mayor resistencia a la ruptura con un valor de 0.189 MPa; similar resultado reportó Salinas, Trejo y Lira (2015), para biopelículas formuladas a base de mucílago de nopal. Los tratamientos T5-50 y T2-40 con esfuerzos de 0.171 y 0.170 MPa respectivamente son los que seguidamente presentan mejor resistencia al esfuerzo de tensión.

Sin embargo, Pardo y Velasco (2012), que trabajaron con almidón de arracacha; así como también, Pająk, Przetaczek-Rożnowska y Juszcak (2019) y Escamilla-García *et al.*, (2017), encontraron valores muy superiores de esfuerzo de tensión en biopelículas a base de diferentes tipos de almidón, estos resultados difieren con los encontrados.

El tratamiento T3-40 es el que presentó menor resistencia a la ruptura con un valor de 0.124 MPa. En cuanto al porcentaje de elongación los tratamientos T1-40, T4-50, T7-

60 presentaron valores de 87.0 a 88.0 %. Asimismo, los tratamientos T7-60, T8-60 y T9-60, presentaron valores cercanos entre sí, que oscilan entre 85.0 y 91.0 % de elongación.

Pardo y Velasco (2012), reportaron valores desde 15 a 35 % de elongación, estos resultados difieren significativamente a los encontrados durante la investigación. Además, menciona que debido a que el almidón sufrió una modificación estructural a causa del tratamiento térmico y el agua, la nueva estructura favoreció la impregnación del glicerol y la formación de puentes de hidrógeno entre grupos hidroxilo de las macromoléculas de glicerol y almidón, causando el incremento de la flexibilidad de las biopelículas de almidón y la elongación mientras que la resistencia a la tensión disminuye.

Tabla 12.

Características mecánicas de las biopelículas comestibles

Tratamiento	Carga Max. (kgf)	Esfuerzo Max. (MPa)	Deformación unitaria (mm/mm)	% Elongación (mm/mm)
T1-40	0.020	0.140	0.88	88.0
T2-40	0.022	0.170	0.73	73.0
T3-40	0.016	0.124	0.66	66.0
T4-50	0.018	0.143	0.87	87.0
T5-50	0.018	0.171	0.72	72.0
T6-50	0.016	0.134	0.79	79.0
T7-60	0.020	0.147	0.88	88.0
T8-60	0.018	0.189	0.85	85.0
T9-60	0.016	0.143	0.91	91.0

Fuente: elaboración propia

El porcentaje de elongación de las biopelículas comestibles se logra apreciar en la Figura 29, se observa que los tratamientos secados a 60 °C presentan mayor porcentaje de elongación. Además, la adición de plastificante (glicerina) otorga propiedades elásticas a las biopelículas comestibles. Ratna *et al.*, (2018) reporta que, el aumento en la concentración de plastificantes resulta en el aumento del valor de elongación de las biopelículas comestibles; asimismo, se observa que los tratamientos formulados con relación %AO-P 50-42, también presentan similar comportamiento elástico que los tratamientos secados a 60 °C.

Además, al realizar un ANOVA entre las temperaturas de secado, se observó que ($p\text{-value}>0.05$, Anexo B6); mostró que no muestra diferencia significativa entre el porcentaje de elongación; así como también no presenta diferencia significativa entre las formulaciones propuestas con relación al porcentaje de elongación de las biopelículas comestibles ($p\text{-value}>0.05$, Anexo B6).

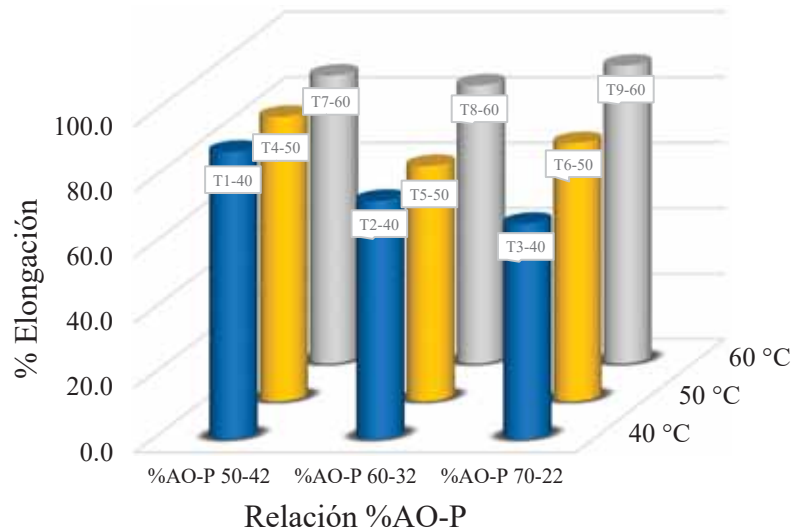


Figura 29: Porcentaje de elongación de las biopelículas

La Figura 30 muestra el diagrama de efectos del esfuerzo máximo de las biopelículas comestibles, en el cual se logra evidenciar que la temperatura influye sobre el esfuerzo máximo de la biopelícula, ya que a mayor temperatura hay mayor resistencia a la tensión. Asimismo, se aprecia que a un 60 % de almidón, las biopelículas poseen mejor resistencia al esfuerzo de tensión, el mismo hecho ocurre cuando los tratamientos tienen en su composición 32 % de pectina; según Ratna *et al.*, (2018) la glicerina puede reducir la fuerza intermolecular en la cadena del polímero mejorando la flexibilidad de la biopelícula comestible ya que extiende la distancia entre las moléculas y reducir su resistencia a la tensión. Este hecho se aprecia en las figuras descritas anteriormente, ya que el tratamiento T8-60 presentó mejor característica mecánica; Basiak, Lenart y Debeaufort (2018), reportaron valores de 2.10 ± 0.76 y 3.29 ± 0.79 MPa para biopelículas

elaboradas a base de almidón de trigo y porcentajes de glicerina de 33 y 55 respectivamente, asimismo mencionan que, las propiedades estructurales de una biopelícula con una mayor concentración de glicerol no son significativamente diferentes.

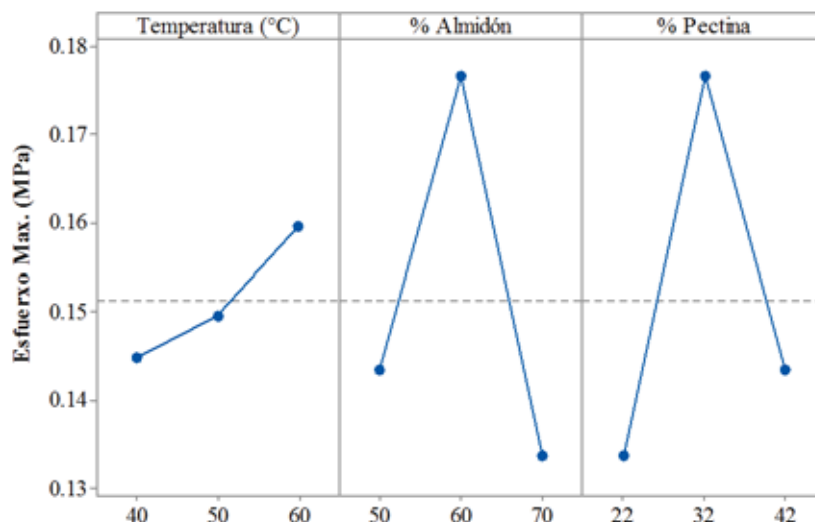


Figura 30, Diagrama de efectos del esfuerzo máximo de las biopelículas comestibles

El diagrama de efectos del porcentaje de elongación de las biopelículas comestibles se muestra en la Figura 31, del mismo modo que en la descripción del esfuerzo máximo, la temperatura influye en la elongación de las biopelículas, ya que a mayor temperatura hay mayor elongación. Asimismo se aprecia que, cuando los tratamientos contienen un 50 % de almidón, las biopelículas poseen mejor comportamiento elástico, el mismo hecho ocurre cuando los tratamientos tienen en su composición 42 % de pectina, esto se debe a la adicción del plastificante en la matriz de almidón, que redujo la afinidad intramolecular entre las cadenas de almidón al formar enlaces de hidrógeno entre el plastificante y las moléculas de almidón volviéndola menos densa y otorgándoles una mayor flexibilidad y maleabilidad (Heydari, Alemzadeh y Vossoughi 2013; Alves *et al.*, 2007).

Por otra parte, los tratamientos que presentaron menor porcentaje de elongación fueron aquellos que en su composición presentaron concentraciones de más del 60 % de almidón; este hecho se debe a que las biopelículas de almidón tienen una flexibilidad

limitada, ya que el almidón gelatinizado tiene fuertes enlaces polares que los hacen quebradizos (Mali *et al.*, 2006).

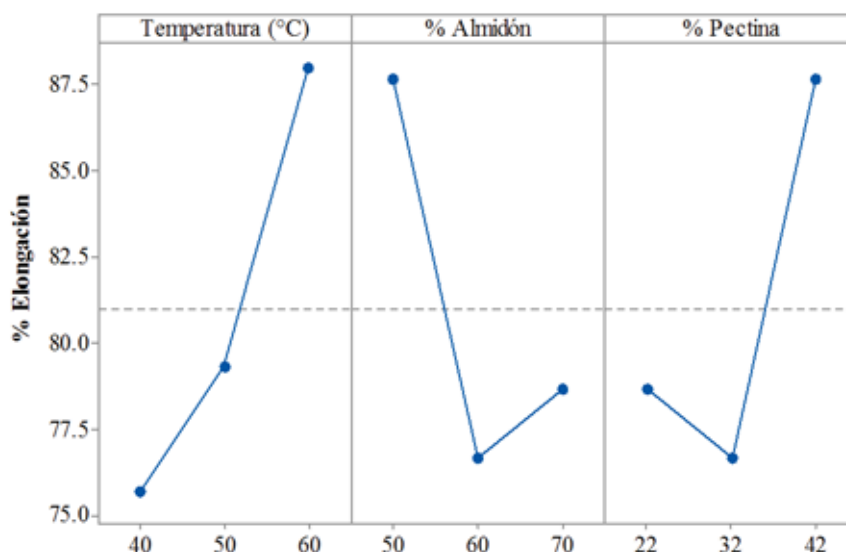


Figura 31, Diagrama de efectos del % elongación de las biopelículas comestibles

5.3. Características térmicas

5.3.1. Análisis termogravimétrico

Los termogramas de las biopelículas comestibles se muestra en la Figura 32, en el cual se observa que las formulaciones presentaron un similar comportamiento térmico, debido a que a partir de los 50 °C empieza una degradación de la masa, esto se debe principalmente a la evaporación del agua libre y ligada o la deshidratación (Badui, 2006) de las biopelículas, en la Tabla 13, se puede observar que en esta primera fase la pérdida de masa de las biopelículas oscila entre 15.6 a 25.1 %. Asimismo, se observa que a partir de los 110 °C la masa permanece ligeramente constante hasta los 165 °C, lo que implica que las estructuras poliméricas de enlaces intermoleculares -C=O-, -OH, -COO-; de estructuras de alto peso molecular como son los polisacáridos presentes en las biopelículas aún no se han degradado.

A partir de los 165 °C, se observa una mayor degradación de la masa hasta aproximadamente hasta los 300 °C; en dicha fase, los compuestos orgánicos (Shafizadeh, 2007; Shafizadeh y Susott,1973) como los azúcares simples entre ellas está la arabinosa

y galactosa (Sáenz, Sepúlveda, y Matsuhira, 2004) que están presentes en la composición química del nopal; dichos azúcares presentan puntos de fusión entre 160 a 170 °C, y posteriormente comienza su degradación. Asimismo, los carbohidratos presentan una descomposición de la masa en un rango de temperatura de 200 a 400 °C (Roos y Drusch, 2016), de la misma forma la presencia de otros compuestos orgánicos simples como el 1, 2, 3- propanotriol o glicerina (Díaz y Cadierno, 2013), debido a su bajo peso molecular, es posible su degradación ya que su punto de ebullición es de 290 °C; y como se muestra en la Figura 32 a partir de dicha temperatura hay presencia de una ligera degradación de la masa.

Shafizadeh, (2007) reportó similar comportamiento de la descomposición térmica para los carbohidratos y proteínas en los rangos de temperatura descritas en el anterior párrafo. En esta segunda fase de degradación, la pérdida de masa oscila entre 60.8 a 68.4 % de las biopelículas comestibles como se muestra en la Tabla 13; asimismo, debido al aumento de la temperatura la redistribución de enlaces y la formación de productos químicamente diferentes de los reactivos se denominan descomposición térmica (Galway y Brown, 1999).

En la tercera fase se aprecia que, a partir de los 300 °C las biopelículas sufren una ligera y paulatina pérdida de masa hasta los 500 °C; igualmente, dicha degradación de sus componentes oscila entre 2.9 a 10.5 %. La pérdida de masa es atribuida a la descomposición de componentes de alto peso molecular como el 1,4- α -D-ácido galacturónico (GalpA) (Chasquibol, Arroyo, y Morales, 2008) de la pectina, y como se puede mostrar en la Figura 32, los espectrogramas IR mostraron la presencia de grupos funcionales -COOH. Asimismo, el almidón debido a su alto peso molecular y composición química de amilosa y amilopectina (Cowieson, 2005); la pérdida de masa a causa de la temperatura se produce a partir de los 300 °C (Shafizadeh, 2007). A partir de

los 500 °C, la masa permanece constante, evidencia de la presencia de cenizas en las biopelículas, así como la presencia de calcio o algún otro producto a causa de la temperatura; similar comportamiento observo Choque-Quispe *et al.*, (2021) en biopelículas sintetizadas con almidón de papa. Además, la formulación T4-50 presentó menor contenido de cenizas, ya que el residuo de la masa fue de 1.8% (Tabla 13).

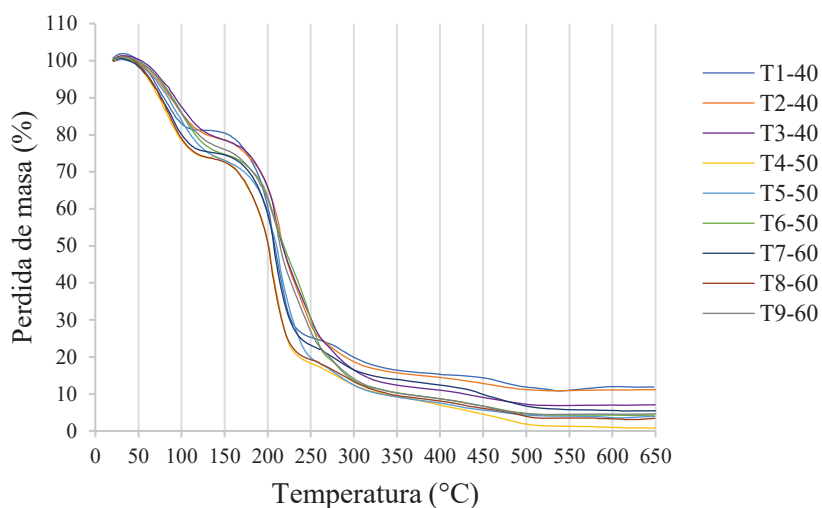


Figura 32, Termograma TGA de las biopelículas comestibles

Tabla 13.

Pérdida de masa por la temperatura por TGA en las biopelículas

	Primera Etapa		Segunda Etapa		Tercera Etapa		RESIDUO (%)	Max. Pérdida de masa (%)
	Pérdida de masa (%)	T (°C)	Pérdida de masa (%)	T (°C)	Pérdida de masa (%)	T (°C)		
T1-40	18.4	110.1	61.8	300.3	8.0	500.3	11.8	88.2
T2-40	17.0	110.3	64.4	300.2	7.5	500.2	11.2	88.8
T3-40	15.6	110.2	68.0	300.4	9.2	500.4	7.1	92.9
T4-50	24.1	110.2	63.6	300.5	10.5	500.3	1.8	98.2
T5-50	25.1	110.0	67.7	300.3	2.9	500.5	4.3	95.7
T6-50	18.0	110.1	68.4	300.3	8.9	500.3	4.7	95.3
T7-60	22.7	110.3	60.8	300.4	9.8	500.2	6.7	93.3
T8-60	23.8	110.2	62.9	300.2	9.4	500.3	3.9	96.1
T9-60	17.5	110.3	68.4	300.3	9.4	500.3	4.6	95.4

Fuente: elaboración propia

La Figura 33 muestra el diagrama de efectos para pérdida de masa, en el cual se aprecia que, durante la primera fase asociada a la pérdida de agua o deshidratación de las biopelículas, se observó que los tratamientos formulados a mayor temperatura pierden más agua; asimismo, a mayor uso de almidón hay una menor pérdida de masa, este hecho

se debe a que, durante la gelatinización, la amilosa y amilopectina responsables de este fenómeno, tienen facilidad de perder agua de sus estructuras (Lv *et al.*, 2011); sin embargo, ocurre lo contrario con la pectina cuanto mayor es la cantidad, mayor es la pérdida de masa en los tratamientos, es decir que tienen mayor facilidad de perder agua; así como tienen la facilidad de ganar humedad debido a su higroscopicidad.

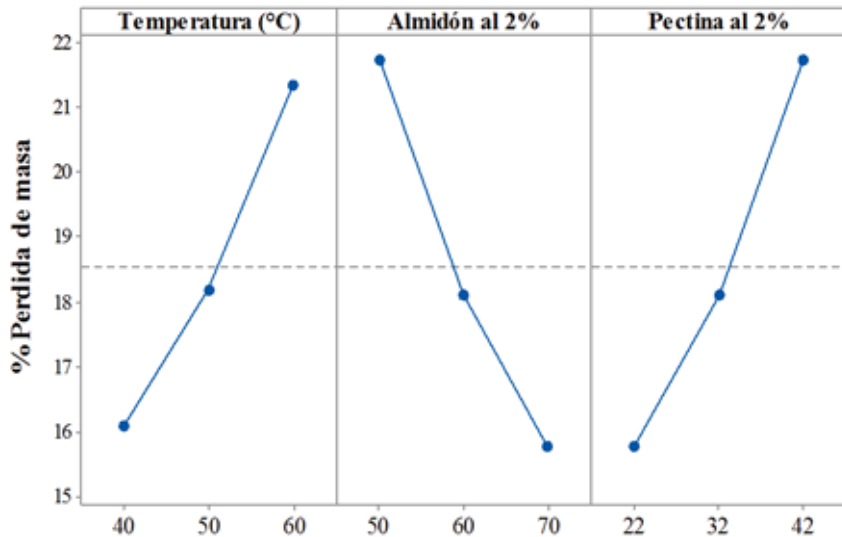


Figura 33, Diagrama de efectos para pérdida de masa en la primera fase

En la Figura 34, se muestra el diagrama de efectos para máxima pérdida de masa en las biopelículas que, en el que se aprecia que los tratamientos secados a 50 °C presentaron una mayor pérdida de masa (T4-50, T5-50 y T6-50); asimismo, se observa que a mayor cantidad de almidón en la formulación, hay una mayor pérdida de masa, sin embargo, sucede lo contrario con la pectina, ya que cuanto menor es la cantidad de pectina presente en la biopelícula, mayor es la pérdida de masa, este fenómeno está asociado a que hay una mayor presencia de moléculas de mayor sensibilidad térmica como 1,4- α -D-ácido galacturónico (GalpA) (Chasquibol, Arroyo, y Morales, 2008), debido a su bajo peso molecular; así como también moléculas simples como los azúcares.

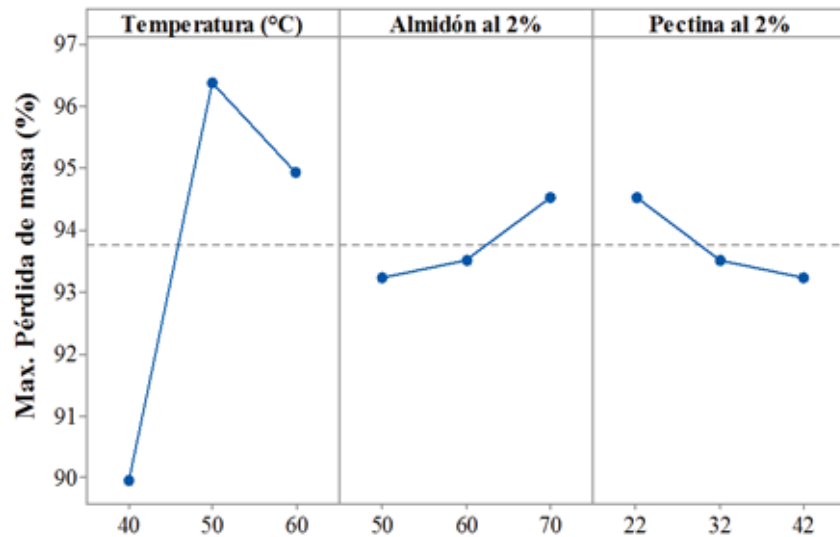


Figura 34, Diagrama de efectos para máxima pérdida de masa en las biopelículas

5.4. Características estructurales

5.4.1. Identificación de grupos funcionales por IR

La Figura 35 muestra los espectros IR del mucílago y el almidón, en el que se puede observar que la estructura química del mucílago presentó una banda intensa a 3390 cm^{-1} con un tipo de vibración de estiramiento, correspondiente al grupo funcional -OH . Este mismo grupo funcional se observó también en el espectro del almidón. Igualmente, se puede apreciar el grupo funcional metileno $\text{-CH}_2\text{-}$ a 2930 cm^{-1} con tipo de vibración de estiramiento asimétrica tanto para el almidón como para el mucílago. En cuanto a la banda ubicada en 1650 cm^{-1} , se puede observar que, el almidón y el mucílago presentaron un pico agudo, correspondiente al grupo funcional del tipo -C=O- (carbonilo) con un tipo de vibración de estiramiento, además en la misma banda hay presencia de grupos funcionales del tipo -COOH (carboxílico) con un tipo de vibración de flexión como lo reporta (Deore y Mahajan, 2021) para el espectro del mucílago.

Para la banda en 1410 cm^{-1} el mucílago presentó un pico de mayor intensidad, lo cual no ocurre con el espectro del almidón, en dicha banda se encuentran los grupos funcionales -OH con un tipo de vibración de estiramiento, asimismo, se puede observar grupos -CH_3 y -CH_2 con un tipo de vibración de deformación asimétrico; similar resultado

para el almidón de oca reportó (Fonseca-Santanilla y Betancourt-López, 2021). En cuanto a la banda en 1150 cm^{-1} , tanto el mucílago como el almidón mostraron un ligero pico, que es característico del grupo funcional C-O-C (éter) con un tipo de vibración de estiramiento del tipo de compuesto éter. Para la banda 1030 cm^{-1} , se observó que el mucílago, presentó un pico de mayor intensidad que corresponde a una vibración estructural conectado a una estructura anomérica de D-glucosa, lo cual no ocurre en el almidón; similar resultado fue reportado por Madera-Santana (2018) para el mucílago.

La banda 925 cm^{-1} , no mostró un pico con una intensidad considerable, sin embargo, se observó la presencia mínima en esta banda del grupo funcional -COOH, con un tipo de vibración de deformación. En la banda 855 cm^{-1} , se evidenció la presencia del grupo funcional -CH₂- de grupos metileno con un tipo de vibración de deformación para ambos espectros. Finalmente, en la banda 756 cm^{-1} el espectro de almidón muestra una tenue presencia del grupo funcional C-O-C con un tipo de vibración de estiramiento, debido al pico que se observa (Gieroba *et al.*, 2020 y Wang *et al.*, 2021).

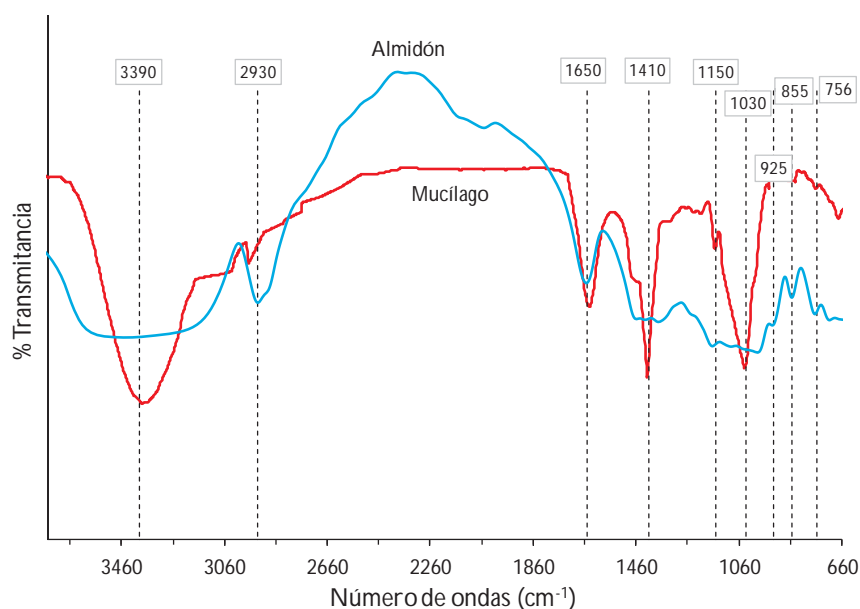


Figura 35, Espectros IR del almidón y el mucílago

Los espectros IR de las biopelículas comestibles se aprecian en la Figura 36, en el cual se muestra que los espectrogramas de los tratamientos, en todas las formulaciones

de biopelículas presentaron bandas intensas de tipo de vibración de estiramiento a 3390 cm^{-1} , correspondiente al grupo funcional -OH (Medrano de Jara, *et al.*, 2019). Asimismo, se puede observar el grupo funcional metileno -CH₂- a 2930 cm^{-1} con tipo de vibración de estiramiento asimétrica para todas las formulaciones. Sin embargo, la formulación T3-40, presentó menor intensidad en dicha banda, su pico es menos pronunciado en comparación al resto de formulaciones.

En cuanto a la banda ubicada en 1650 cm^{-1} , se puede observar que las formulaciones T9-60, T7-60 y T4-50 presentaron un pico más agudo, lo cual indicaría mayor concentración de grupos del tipo -C=O- con un tipo de vibración de estiramiento, además hay presencia de agua H-OH con un tipo de vibración de flexión. Para la banda en 1410 cm^{-1} que mostró un pico de intensidad baja, se encuentran los grupos funcionales -OH con un tipo de vibración de estiramiento, asimismo, se puede observar grupos -CH₃ y -CH₂ con un tipo de vibración de deformación asimétrico, todos los tratamientos presentaron dicha característica, sin embargo, el pico se muestra con mayor pronunciamiento en dicha banda para T9-60 y T7-60 similar resultado encontró (Farajpour *et al.*, 2020).

En la banda 1150 cm^{-1} , todos los tratamientos mostraron un ligero pico, que es característico del grupo funcional C-O-C con un tipo de vibración de estiramiento del tipo de compuesto éter. Para la banda 1030 cm^{-1} , se observa que el tratamiento T7-60, presentó un pico de mayor intensidad que corresponde a una vibración estructural conectado a una estructura anomérica de D-glucosa.

En la banda 925 cm^{-1} , se observa que todos los tratamientos presentaron un pico de poca intensidad, que corresponde al grupo funcional -COOH, con un tipo de vibración de deformación (Pérez-Vergara *et al.*, 2020).

Por otra parte, la banda 855 cm^{-1} , se observó la presencia del grupo funcional $-\text{CH}_2-$ de grupos metilo con un tipo de vibración de deformación. Finalmente, en la banda 756 cm^{-1} todos los tratamientos presentan el grupo funcional C-O-C con un tipo de vibración de estiramiento como lo reportado por (Choque-Quispe *et al.*, 2021 y Wang *et al.*, 2020)

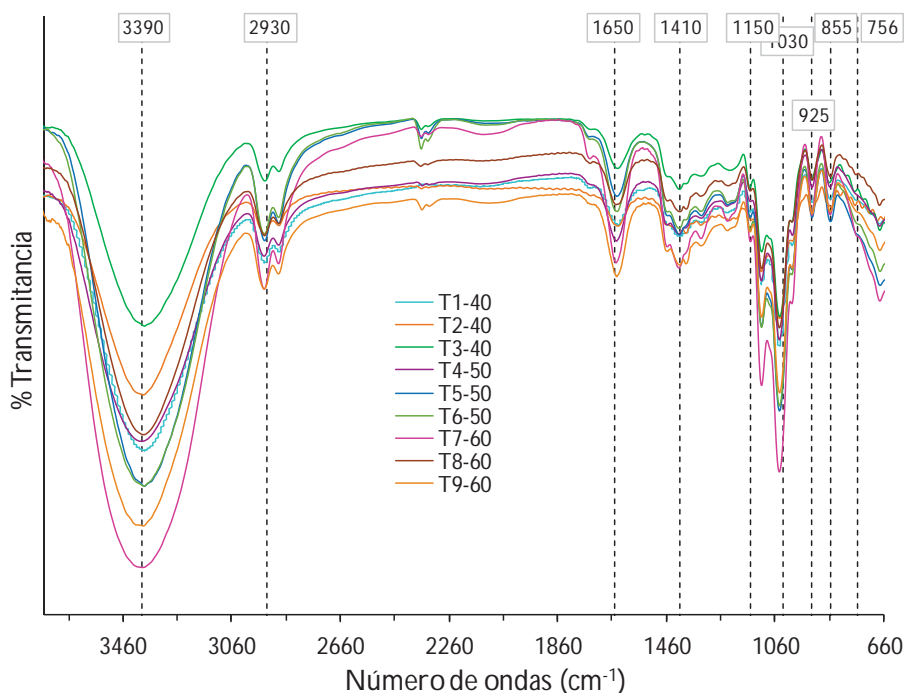


Figura 36. Espectros IR de las biopelículas comestibles

Según Piermaría *et al.*, (2011) los espectros de las biopelículas sugieren una idea de las interacciones entre la matriz de mucílago y los diferentes polioles que son componentes de la glicerina, afectan las propiedades mecánicas, de barrera y térmicas. Asimismo, la banda de absorción 3390 cm^{-1} en el que se observa un pico de alta intensidad y la presencia del grupo funcional $-\text{OH}$, están asociados al agua y los carbohidratos; Nataraj *et al.*, (2008), sugiere que la capacidad de solubilidad en el agua e higroscopicidad es a través de puentes de hidrogeno. Este hecho se logra apreciar en la Tabla 9, donde las formulaciones mostraron solubilidades mayores a 91 %. Además, la glicerina que se encuentra en la misma banda de absorción, tiene mayor efecto plastificante en biopelículas a base de carbohidratos (Gheribi *et al.*, 2018), que proporciona mayor flexibilidad y que tienen efecto sobre sus propiedades mecánicas.

VI. CONCLUSIONES

- ✓ Se logró elaborar y caracterizar las biopelículas comestibles, las formulaciones propuestas presentan buenas características posibilitando su potencial aplicación como recubrimiento de frutos, hortalizas y alimentos frescos, asimismo pueden ser utilizados en productos mínimamente procesados o para ser consumidos directamente.
- ✓ Con respecto a las propiedades fisicoquímicas de las biopelículas comestibles, la solubilidad es una de las características de mayor relevancia ya que alcanzan una solubilidad mayor a 91 %. Así mismo, presentaron una actividad de agua menor a 0.573, así como también un contenido de humedad relativamente bajo. En cuanto a la transparencia este se ve influenciada significativamente por la temperatura de secado y la cantidad de almidón y pectina. En cuanto a la densidad, estos se ven afectados por la concentración almidón-pectina.
- ✓ Con respecto a las características mecánicas de biopelículas comestibles, las formulaciones AO-P (60-32 %) presentaron mayor esfuerzo de tensión, pero menor porcentaje de elongación y las formulaciones de menor proporción de almidón y pectina presentaron mayor porcentaje de elongación.
- ✓ En cuanto a las características térmicas, los tratamientos presentaron similar comportamiento frente a la temperatura; las formulaciones con contenido de 70 % de almidón y 22 % de pectina, son las que presentaron la mayor pérdida de masa y la temperatura influye significativamente sobre la pérdida de masa cuando se emplean temperaturas de secado mayores a 50 °C.
- ✓ Respecto a las características estructurales de las biopelículas comestibles, los espectros mostraron una composición estructural similar con diferencia significativa

en la intensidad de picos en las diferentes bandas, que mostró la relación entre los componentes y el nuevo ordenamiento molecular de las biopelículas que se ven influenciadas por las concentraciones de almidón de oca y pectina, igualmente se pudo observar la alta solubilidad que presentaron las biopelículas comestibles identificables en las bandas de absorción de 3390 cm^{-1} ; así como también la flexibilidad gracias a la glicerina.

VII. RECOMENDACIONES

- ✓ Emplear las formulaciones propuestas como recubrimiento de alimentos y evaluar la vida útil del alimento.
- ✓ Emplear almidones de otras variedades de oca para la elaboración de películas comestibles.
- ✓ Modificar la estructura del almidón de oca y elaborar películas comestibles.
- ✓ Emplear materiales vegetales nativos con contenido de almidón para la elaboración de películas comestibles.
- ✓ Producir envases biodegradables con sustitución parcial de almidón de oca.

BIBLIOGRAFÍA

- Abdul-Aziz, A. R., Tan, H. W., & Aroua, M. K. (2013). Glycerol production and its applications as a raw material: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 27, 118-127. doi:10.1016/j.rser.2013.06.035.
- Alimi, B. A., Workneh, T. S., & Femi, F. A. (2021). Fabrication and characterization of edible films from acha (*Digitalia exilis*) and iburu (*Digitalia iburua*) starches. *CyTA - Journal of Food*, 19(1), 493–500. doi:10.1080/19476337.2021.1917667
- Almendárez, N. (2004). Comprobación de la efectividad del coagulante (Conchifloc) en aguas del lago de Managua "Piedras Azules". *Revista Iberoamericana de Polimeros*, 5 (1), 46-54.
- Alves, V.D., Mali, S., Beléia, A., Grossmann, M.V.E. (2007). Effect if glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties. *J. Food Eng.*, 78, 941–946.
- AOAC International. (2005). Official methods of analysis of AOAC international. AOAC International.
- Aprianita, A., Purwandari, U., Watson, B., & Vasiljevic, T. (2009). Physico-chemical properties of flours and starches from selected commercial tubers available in Australia. *International Food Research Journal*, 16, 507-520.
- Arbizu, C., & Tapia, M. (1992). Cultivos: Tubérculos andinos marginados. Otra perspectiva de 1492. *FAO*, 147-161.
- Arellanes, A., Jaraba, M., Mármol, Z., Páez, G., Aiello-Mazarri, C., & Rincón, M. (2011). Obtención y caracterización de pectina de la cascara de cambur manzano (*Musa AAB*). *Rev. Fac. Agron. (Luz)*, 523-539.
- Askeland, D. R. (1998). *The science and engineering of materials* (Tercera ed.). Missouri, U.S.A.: PWS Publishing company.

- ASTM. (2014). Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry. ASTM E1131-08.
- ASTM. (2018). Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting. ASTM international, 1-12.
- Badui S. D. (2006). Química de los alimentos. Edit. Pearson Educación, Cuarta Edición. México. ISBN: 970-26-0670-5.
- Baena, M., & Cardona-García, N. A. (2012). Obtención y caracterización de fibra dietaria a partir de cascarilla de las semillas tostadas de theobroma cacao l. de una industria chocolatera colombiana. Tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira.
- Barbera, G. (1999). Historia e importancia económica y agroecológica. Estudio FAO producción y protección vegetal, 1-12.
- Basiak, E., Lenart, A., y Debeaufort, F. (2018). How Glycerol and Water Contents Affect the Structural and Functional Properties of Starch-Based Edible Films. *Polymers*, 10(4), 412. doi:10.3390/polym10040412
- Berthomieu, C., & Hienerwadel, R. (2009). Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy. *Photosynthesis research*, 101, 157-70. doi:10.1007/s11120-009-9439-x.
- Bertuzzi, M. A., Armada, M., & Gottifredi, J. C. (2007). Physicochemical characterization of starch based films. *Journal of Food Engineering*, 82(1), 17-25.
- Bourtoom, T. (2008). Plasticizer effect on the properties of biodegradable blend films from rice starch-chitosan. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30 (1), 149-155.
- Brown, M. E. (2004). Introduction to Thermal Analysis Techniques and Applications. Grahamstown, South Africa: Kluwer Academic Publishers.

- Cabarcas, H. E., Guerra, A. F., & Henao, A. (2012). Extracción y caracterización de pectina a partir de cascaras de platano para el desarrollar un diseño general del proceso de producción. Tesis de pregrado, Universidad de Cartagena.
- Callister, W. D. (1995). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de Material. USA: Reverté, S.A.
- Cardenas, A., Higuera-Ciapara, I., & Goycoolea, F. M. (1997). Rheology and Aggregation of Cactus (*Opuntia ficus-indica*) Mucilage in Solution. *Journal of the Professional Association for Cactus Development*, 2, 152-159.
- Carrasco, E., Villarroel, M., & Cevallos, L. (2002). Efecto de recubrimientos comestibles sobre la calidad sensorial de pimentones verdes (*capsicum annun L.*) durante el almacenamiento. *Archivos latinoamericanos de nutrición*, 52 (1), 84-90.
- Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J. M., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., & Monier, C. A. (2011). Thermogravimetric analysis as a new method to determine the lignocellulosic composition of biomass. *Biomass and Bioenergy*, 35, 298-307.
- Charley, H. (2008). Tecnología de alimentos: procesos químicos y físicos en la preparación de alimentos. México: Limusa.
- Charsley, E. L., & Warrington, S. B. (1992). Thermal analysis: techniques and applications. Cambridge, U.K.: Royal Society of Chemistry.
- Chase, M., & Reveal, J. (2009). A phylogenetic classification of the land plants to accompany APG III. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 161, 122-127.
- Chasquibol, N., Arroyo, E., & Morales, J. C. (2008). Extracción y caracterización de pectinas obtenidas a partir de frutos de la biodiversidad peruana. *Facultad de Ingeniería Industrial*, 26, 175-199.
- Cheftel, J., & Cheftel, H. (1979). Introducción a la bioquímica y tecnología de alimentos (Vol. Tomo I). Zaragoza, España: Acribia.

- Chen, H. (1995). Functional properties and applications of edible films made of milk proteins. *Journal of dairy science*, 78(11), 2563-2583.
- Choque-Quispe D., Froehner D., Ligarda-Samanez C. A., Ramos-Pacheco B. S., Palomino-Rincón H., Choque-Quispe Y., Solano-Reynoso A. M., Taipe-Pardo F., Zamalloa-Puma L. M., Calla-Florez M., Obregón-Yupanqui M., Zamalloa-Puma M., y Mojo-Quisani A. (2021). Preparation and Chemical and Physical Characteristics of an Edible Film Based on Native Potato Starch and Nopal Mucilage, *Polymers* 13, no. 21: 3719. <https://doi.org/10.3390/polym13213719>
- Cowieson, A. J. (2005). Factors that affect the nutritional value of maize for broilers. *Animal feed Sci Technol.*, 119, 293-305.
- Damodaran, S., Parkin, K. L., & Fennema, O. R. (Eds.). (2007). *Fennema's food chemistry*. CRC press.
- Daraba, A. (2008). Future trends in packing: edible, biodegradable coats and films. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 9 (32), 654-664.
- Deore, U. V., & Mahajan, H. S. (2021). Isolation and structural characterization of mucilaginous polysaccharides obtained from the seeds of *Cassia uniflora* for industrial application. *Food Chemistry*, 351, 129262. doi: 10.1016/j.foodchem.2021.12926
- Díaz, Á. A., & Cadierno, V. (2013). Glycerol: A promising Green Solvent and Reducing Agent for Metal-Catalyzed Transfer Hydrogenation Reactions and Nanoparticles Formation. *Applied Sciences*, 55-69. doi:10.3390/app3010055
- Dussán-Sarria, S., Torres-León, C., & Hleap-Zapata, J. I. (2014). Efecto de un recubrimiento comestible y de diferentes empaques durante el almacenamiento refrigerado de mango tomy atkins mínimamente procesado. *Información Tecnológica*, 123-130. doi:doi: 10.4067/S0718-07642014000400014

- Escamilla-García, M., Reyes-Basurto, A., García-Almendárez, B., Hernández-Hernández, E., Calderón-Domínguez, G., Rossi-Márquez, G., & Regalado-González, C. (2017). Modified Starch-Chitosan Edible Films: Physicochemical and Mechanical Characterization. *Coatings*, 7(12), 224. doi:10.3390/coatings7120224
- Espino-Díaz, M., De Jesús Ornelas-Paz, J., Martínez-Telles, M., Santillan, C., Barbosa-Cánovas, G., Zamudio-Flores, P., & Olivas-Guadalupe, I. (2010). Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). *Journal of Food Science*, 75(6), 347-352. doi:10.1111/j.1750-3841.2010.01661.x
- Espino-Díaz, M.; Ornelas-Paz, J.D.J.; Martínez-Téllez, M.A.; Santillán, C.; Barbosa-Cánovas, G.V.; Zamudio-Flores, P.B.; Olivas, G.I., (2010). Development and Characterization of Edible Films Based on Mucilage of *Opuntia ficus-indica* (L.). *J. Food Sci.*, 75, E347–E352.
- Ezzati, S., Ayaseh, A., Ghanbarzadeh, B., & Heshmati, M. K. (2020). Pectin from sunflower by-product: Optimization of ultrasound-assisted extraction, characterization, and functional analysis. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.205
- Fakhoury F.M., Maria Martelli S., Canhadas Bertan L., Yamashita F., Innocentini Mei L.H., Collares Queiroz F.P. (2012), Edible films made from blends of manioc starch and gelatin - influence of different types of plasticizer and different levels of macromolecules on their properties, *LWT- Food Sci. Technol.* 49 149–154, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2012.04.017>.
- Farajpour, R., Emam Djomeh, Z., Moeini, S., Tavakolipour, H., & Safayan, S. (2020). Structural and physico-mechanical properties of potato starch-olive oil edible films reinforced with zein nanoparticles. *International Journal of Biological Macromolecules*, 149, 941–950. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.17

- Farhan, A.; and Hani, N.M. (2017). Characterization of edible packaging films based on semi-refined kappa-carrageenan plasticized with glycerol and sorbitol. *Food Hydrocolloids*, 64, 48-58.
- Fernandez, A., & Rodríguez, E. (2007). *Etnobotánica del Perú Pre-Hispano*. Ediciones Herbarium Truxillense (HUT), Universidad Nacional de Trujillo.
- Fonseca-Santanilla, E. B., & Betancourt-López, L. L. (2021). Physicochemical and structural characterization of starches from Andean roots and tubers grown in Colombia. *Food Science and Technology International*.
<https://doi.org/10.1177/1082013221997313>
- Font, M. (2012). *Técnicas Espectroscópicas/XVII Master IDI*. Departamento de Química Orgánica y Farmacéutica, Clases de Master universitario en I+D+I.
- Galindez, A., Daza, L. D., Homez-Jara, A., Eim, V. S., & Váquiro, H. A. (2019). Characterization of ulluco starch and its potential for use in edible films prepared at low drying temperature. *Carbohydrate Polymers*, 215, 143–150. doi: 10.1016/j.carbpol.2019.03.074
- Galwey A.K. and Brown M.E. (1999), "Thermal Decomposition of Ionic Solids", Elsevier, 1st Edition, Amsterdam, ISBN 9780444824370 eBook ISBN 9780080542799.
- Gheribi, R., Puchot, L., Verge, P., Jaoued-Grayaa, N., Mezni, M., Habibi, Y., & Khwaldia, K. (2018). Development of plasticized edible films from *Opuntia ficus-indica* mucilage: A comparative study of various polyol plasticizers. *Carbohydrate Polymers*, 190, 204–211. doi:10.1016/j.carbpol.2018.02.085
- Gibson, C. A., & Nobel, S. P. (1990). *The cactus primer*. First Harvard University Press paperback edition, 1969-199.
- Gieroba, B.; Krysa, M.; Wojtowicz, K.; Wiater, A.; Pleszczyńska, M.; Tomczyk, M.; Sroka-Bartnicka, A. (2020). The FT-IR and Raman Spectroscopies as Tools for Biofilm

- Characterization Created by Cariogenic Streptococci. *Int. J. Mol. Sci.*, 21, 3811.
<https://doi.org/10.3390/ijms21113811>
- González, L. R. (2011). Desarrollo y evaluación de una película comestible obtenida del mucílago de nopal (*Opuntia ficus-indica*) utilizada para reducir la tasa de respiración de nopal verdura. *Investigacion Universitaria Multidisciplinaria*, 131-138.
- González Sandoval, D. C., Luna Sosa, B., Martínez-Ávila, G. C. G., Rodríguez Fuentes, H., Avendaño Abarca, V. H., y Rojas, R. (2019). Formulation and Characterization of Edible Films Based on Organic Mucilage from Mexican *Opuntia ficus-indica*. *Coatings*, 9(8), 506. doi: 10.3390/coatings9080506
- Guzmán, L., Villabona, Á., Tejada, C., & García, R. (2013). Reducción de la turbidez del agua usando coagulantes naturales: una revisión. *U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 16, 253-262. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v16n1/v16n1a29.pdf>
- Herrera, A. M. (2004). Efecto de la glicerina como demulcente en la reducción de manifestaciones bucales en pescadores artesanales de cerro azul despues de faenas marítimas. USMP facultad odontología, Tesis de titulación.
- Heydari, A., Alemzadeh, I., Vossoughi, M. (2013). Functional properties of biodegradable corn starch nanocomposites for food packaging applications. *Mater. Des.*, 50, 954–961.
- Homez-Jara, A., Daza, L. D., Aguirre, D. M., Muñoz, J. A., Solanilla, J. F., & Váquiro, H. A. (2018). Characterization of chitosan edible films obtained with various polymer concentrations and drying temperatures. *International Journal of Biological Macromolecules*, 113, 1233–1240. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2018.03.057
- Hong, T., & Ibrahim, H. (2012). Extraction and Characterization of mucilage from leaves of *Pereskia bleo* (Rose cactus). *J. Teknol dan Industri Pangan*, 23 (2), 210-215.

- Iwata, K., Ishisaki, S., & Hand, A. (2000). Preparation and characterization of edible films from fish water-soluble proteins. *Fisheries science*, 372-378.
- Jauhiainen, J., Conesa, J. A., Font, R., & Martín-Gullón, I. (2004). Kinetics of the pyrolysis and combustion of olive oil solid waste. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 72, 9–15.
- Juarez-Enriquez, E., Olivas, G. I., Zamudio-Flores, P. B., Ortega-Rivas, E., Perez-Vega, S., & Sepulveda, D. R. (2017). Effect of water content on the flowability of hygroscopic powders. *Journal of Food Engineering*, 205, 12–17. doi:10.1016/j.jfoodeng.2017.02.024
- Kissinger, H. E. (1957). Reaction kinetics in differential thermal analysis. *Analytical Chemistry*, 29(11), 1702-1706. doi:10.1021/ac60131a045
- Klančnik, G. (2010). Differential thermal analysis (DTA) and differential scanning calorimetry (DSC) as a method of material investigation. *Materials and Geoenvironment*, 57(1), 127-142.
- Knothe, G., Gerpen, J., & Krahl, J. (2005). *The biodiesel handbook*. USA: AOCS Press.
- Kumari, N.; Bangar, S.P.; Petru, M.; Ilyas, R.A.; Singh, A.; Kumar, P. (2021). "Development and Characterization of Fenugreek Protein-Based Edible Film" *Foods* 10, no. 9: 1976. <https://doi.org/10.3390/foods10091976>
- Labuza, T.P., Acott, K., Tatini, S.R., Lee, R.Y., Flink, J., and McCall, W. (1976). Water activity determination: A collaborative study of different methods. *Journal of Food Science*, 41: 910–917.
- León Marroú, M., Villacorta, M. Y., & Pagador, S. E. (2011). Composición química de “oca” (*Oxalis tuberosa*), "arracacha" (*Arracaccia xanthorriza*) y "tarwi" (*Lupinus mutabilis*). Formulación de una mezcla base para productos alimenticios. *Ciencia y Tecnología de Alimentos*, 239-252.

- Levine, I. N. (2004). *Fisicoquímica* (Vol. 1). (Á. G. Ureña, Trad.) Madrid, España: Mc. Graw Hill companies.
- Lv, X., Wu, L., Wang, J., Li, J., & Qin, Y. (2011). Characterization of Water Binding and Dehydration in Gelatinized Starch. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 59(1), 256–262. doi:10.1021/jf103523u
- Madera-Santana T. J., Vargas-Rodríguez L., Núñez-Colín C. A., González-García G., Peña-Caballero V., Núñez-Gastélum J. A., Gallegos-Vázquez C. & Rodríguez-Núñez J. R. (2018). Mucilage from cladodes of *Opuntia spinulifera* Salm-Dyck: chemical, morphological, structural and thermal characterization, *CyTA - Journal of Food*, 16:1, 650-657, DOI: 10.1080/19476337.2018.1454988
- Mali, S., Grossman, M.V.E., Garcia, M.A., Martino, M.N., Zaritzky, N.E., (2006). Effects of controlled storage on thermal, mechanical and barrier properties of plasticized films from different starch sources. *Journal of Food Engineering* 75, 453e460.
- Martínez, P.; Peña, F.; Bello-Pérez, L.A.; Núñez-Santiago, C.; Yee-Madeira, H.; Velezmoro, C., (2019). Physicochemical, functional and morphological characterization of starches isolated from three native potatoes of the Andean region. *Food Chem.* X, 2, 100030.
- Mathot, V. B. (1994). *Calorimetry and thermal analysis of polymers*. Munich: Hanser. doi:10.1002/pi.1995.210370112
- McHugh, T. H., & Krochta, J. M. (1994). Milk-protein-based edible films and coatings. *Food Technology*, 48, 97-103.
- Medrano de Jara, E., García-Hernández, E., Quequezana-Bedregal, M., Arrieta-González, C., Salgado-Delgado, R., Lastarria-Tapia, H., & Castañón-Vilca, J. (2019). Potato starch-based films: Effects of glycerol and montmorillonite nanoclay concentration.

Revista Mexicana De Ingeniería Química, 19(2), 627-637.

<https://doi.org/10.24275/rmiq/Poli779>

Melian, D. E. (2010). Extracción de almidón de papa usando muestras de diez variedades nativas de Chiloé y dos variedades comerciales. Tesis de pregrado, Universidad Austral de Chile.

Mésáros, E., Jakab, E., Várhegyi, G., Szepesváry, P., & Marosolgyi. (2004). Comparative study of the thermal behavior of wood and bark of young shoots obtained from an energy plantation. *J. Anal. Appl. Pyrolysis*, 72, 317–328.

MINAGRI. (2013). Series históricas de Producción Agrícola – compendio estadístico. Lima, Perú. Obtenido de <http://frenteweb.minagri.gob.pe/sisca/>

MINAM. (2015). Información reportada por los gobiernos locales mediante la plataforma SIGERSOL y Estudios de Caracterización de Residuos Sólidos. Lima, Perú.

Miyazaki, S., Karino, T., Endo, H., & Haraguchi, K. (2007). Gelation Mechanism of Poly(N-isopropylacrylamide) –Clay Nanocomposite Gels. *ACS Publications*, 40(12), 4287-4295. doi:10.1021/ma070104v

Moncayo, D. (2013). Desarrollo de un recubrimiento comestible a partir de un biopolímero para prolongar la vida útil de frutas frescas. Bogotá, Colombia.

Mondragón-Jacobo, C., & Pérez-Gonzalez, S. (2001). Cactus (*Opuntia* spp) as forage. *FAO Plant Production and Protection*, 169.

Muñoz, F. (2011). Extracción y caracterización de la pectina obtenida a partir del fruto de dos ecotipos de cocona (*Solanum Sessiliflorum*), en diferentes grados de madurez; a nivel de planta piloto. Tesis de Maestría. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/4006/1/822093.2011.pdf>

- Nataraj, S., Schomäcker, R., Kraume, M., Mishra, I. M., & Drews, A. (2008). Analyses of polysaccharide fouling mechanisms during crossflow membrane filtration. *Journal of Membrane Science*, 308, 152-161.
- National Research Council. (1989). *The lost crops of the incas: Little known plants of the Andes with promise for worldwide cultivation*. Washington D.C., USA: National Academy Press.
- Naumann, D., Helm, D. & Labischinski, H. (1991). Microbiological characterizations by FT-IR spectroscopy. *Nature* 351, 81–82. <https://doi.org/10.1038/351081a0>
- Navia, D.; Ayala, A.; Villada, H.S. (2011), Adsorption isotherms of cassava flour bioplastics compression molded. *Biotechnol. Sect. Agropecu. Agroind.*, 9, 77–87.
- Nazan Turhan, K.; Şahbaz, F. (2004). Water vapor permeability, tensile properties and solubility of methylcellulose-based edible films. *J. Food Eng.* 61, 459–466.
- Newell, J. (2009). *Essentials of modern materials science*. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, Inc.
- Nur Hanani, Z. A., Aelma Husna, A. B., Nurul Syahida, S., Nor Khaizura, M. A. B., & Jamilah, B. (2018). Effect of different fruit peels on the functional properties of gelatin/polyethylene bilayer films for active packaging. *Food Packaging and Shelf Life*, 18, 201–211. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2018.11.004>
- Oregel-Zamudio, E., Aguilar, C. N., Oyoque-Salcedo, G., Angoa-Pérez, V., & Mena-Violante, H. G. (2016). Caracterización fisicoquímica de películas comestibles a base de cera de candelilla. *Rev. Iber. Tecnología Postcosecha*, 17(1), 1-7.
- Orozco, E. (2017). *Elaboración y caracterización de películas de mucílago de nopal-pectina: efecto de la concentración del mucílago de nopal en las propiedades fisicoquímicas y mecánicas*. Tesis de pregrado, Universidad Autonoma del estado de México.

- Pagan, G. (1999). Degradación enzimática y características físicas y químicas de la pectina del bagazo de melocotón. Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes. Obtenido de <http://www.cervantesvirtual.com/nd/ark:/59851/bmcz8965>
- Pająk, P., Przetaczek-Rożnowska, I., y Juszczak, L. (2019). Development and physicochemical, thermal and mechanical properties of edible films based on pumpkin, lentil and quinoa starches. *International Journal of Biological Macromolecules*. doi:10.1016/j.ijbiomac.2019.07.074
- Pardo Cuervo, O. H., y Velasco Mosquera, R. (2012). Propiedades fisicoquímicas y mecánicas de películas obtenidas a partir de almidón nativo y oxidado de arracacha. *Rev. ION*, 23-29. ISSN: 0120-100X. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=342030285004>
- Park, S.-I., & Zhao, Y. (2006). Development and Characterization of Edible Films from Cranberry Pomace Extracts. *Journal of food science*, ISSN 0022-1147 Vol. 71, N° 2,.
- Pérez-Vergara, L. D., Cifuentes, M. T., Franco, A. P., Pérez-Cervera, C. E., & Andrade-Pizarro, R. D. (2020). Development and characterization of edible films based on native cassava starch, beeswax, and propolis. *NFS Journal*, 21, 39–49. doi:10.1016/j.nfs.2020.09.002
- Piermaria, J., Bosch, A., Pinotti, A., Yantorno, O., Garcia, M. A., & Abraham, A. G. (2011). Kefiran films plasticized with sugars and polyols: water vapor barrier and mechanical properties in relation to their microstructure analyzed by ATR/FT-IR spectroscopy. *Food Hydrocolloids*, 25(5), 1261–1269. doi:10.1016/j.foodhyd.2010.11.024
- Piqué, T. M., & Vázquez, A. (2012). Uso de espectroscopía infrarroja con transformada de fourier (FTIR) en el estudio de la hidratación del cemento. *Concreto y Cemento. Investigación y Desarrollo*, 3(2), 62-71. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=3612/361233550004>

- Pretsch, E., Bühlmann, P., & Badertscher, M. (2009). *Structure* (Cuarta ed.). Zürich and Minneapolis: Springer. doi:10.1007/978-3-540-93810-1
- Choque-Quispe, D., Ligarda-Samanez, C. A., Ramos-Pacheco, B. S., Taipe-Pardo, F., Peralta-Guevara, D. E., & Solano Reynoso, A. M. (2019). Evaluación de las isotermas de sorción de granos y harina de kiwicha (*Amaranthus caudatus*). *Revista ION*, 31(2). <https://doi.org/10.18273/revion.v31n2-2018005>
- Rahman, M.S. and McCarthy, O.J. (1999), Classification of food properties. *International Journal of Food Properties*, 2(2): 1–6.
- Ratna D. K., Radenrara D. A. P., Nurul B., Febriana E. N. F. (2018). Preparation and characterization of edible film from sorghum starch with glycerol and sorbitol as plasticizers. *Journal of Engineering Science and Technology. Special Issue*. 47 – 55.
- Ratna D. K., Radenrara D. A. P., Nurul B., Febriana E. N. F. (2018). Preparation and characterization of edible film from sorghum starch with glycerol and sorbitol as plasticizers. *Journal of Engineering Science and Technology. Special Issue*. 47 – 55.
- Rios, J., & Quintana, V. (2004). Manejo general del cultivo del nopal. Material de enseñanza.
- Roos, Y. H., and Drusch, S. (2016). Food components and polymers. *Phase Transitions in Foods*, 115–172. doi:10.1016/b978-0-12-408086-7.00005-x
- RPP. (5 de septiembre de 2018). Perú produce 23 mil toneladas diarias de basura: la alarmante gestión de residuos sólidos. Obtenido de <https://rpp.pe/politica/elecciones/peru-produce-23-mil-toneladas-diarias-de-basura-la-alarmanente-gestion-de-residuos-solidos-noticia-1147951>
- Saberri, B., Thakur, R., Vuong, Q. V., Chockchaisawasdee, S., Golding, J. B., Scarlett, C. J., & Stathopoulos, C. E. (2016). Optimization of physical and optical properties of biodegradable edible films based on pea starch and guar gum. *Industrial Crops and Products*, 86, 342–352. doi:10.1016/j.indcrop.2016.04.015

- Sáenz, C., Berger, H., Corrales, J., Galletti, L., García, V., Higuera, I., . . . Varnero, M. T. (2006). Utilización agroindustrial. Boletín de servicios agrícolas de la FAO, Boletín 162.
- Sáenz, C., Sepúlveda, E., & Matsuhira, B. (2004). Opuntia spp mucilage's: a functional component with industrial perspective. *Journal Arid Environments*, 57, 275-290.
- Salinas Salazar, V. M., & Trejo Márquez, M. A., y Lira Vargas, A. (2015). Propiedades físicas, mecánicas y de barrera de películas comestibles a base de mucílago de Nopal como alternativa para la aplicación en frutos. *Rev. Iberoamericana de Tecnología Postcosecha*, 16(2),193-198. ISSN: 1665-0204. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81343176007>
- Salinas, V., Trejo, A., & Lira, A. (2015). Propiedades físicas, mecánicas y de barrera de películas comestibles a base de mucílago de nopal como alternativa para la aplicación en frutos. *Revista Iberoamericana de Tecnología postcosecha*, 16(2), 193-198.
- Salgado, P. R., Molina, S. E., Petruccelli, S., & Mauri, A. N. (2010). Biodegradable sunflower protein films naturally activated with antioxidant compounds. *Food Hydrocolloids*, 24(5), 525-533.
- Salwa, A., Hanan, A., & Nesserien, N. (2010). Physicochemical Properties of Starch Extracted from Different Sources and Their Application in Pudding and White Sauce. *World Journal of Dairy & Food Sciences*, 5(2), 173- 182.
- Sánchez-González, L., González-Martínez, C., Vargas, M., Chiralt, A., & Cháfer, M. (2009). Characterization of edible films based on hydroxypropylmethylcellulose and tea tree essential oil. *Food Hydrocolloids*, Volume 23, pags 2102-2109.
- Sandhu, K. S., Sharma, L., Kaur, M., y Kaur, R. (2020). Physical, structural and thermal properties of composite edible films prepared from pearl millet starch and carrageenan

- gum: Process optimization using response surface methodology. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143, 704–713. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.09.111
- Sandhu, K.; Singh, N., (2007). Some properties of corn starches II: Physicochemical, gelatinization, retrogradation, pasting and gel textural properties. *Food Chem*, 101, 1499–1507.
- Santacruz, S. (2004). Characterisation of starches isolated from *Arracacha xanthorrhiza*, *Cannaedulis* and *Oxalis tuberosa* and extracted from potato leaf. Tesis doctoral. Uppsala, Switzerland.
- Scheinvar, L. (1999). Taxonomía de las *Opuntias* utilizadas. In: *Agroecología, cultivo y usos del nopal*. Estudio FAO Producción y Protección Vegetal, 132, 21-28.
- Sepúlveda, E., Sáenz, C., Aliaga, E., & Aceituno, C. (2007). Extraction and characterization of mucilage in *Opuntia* spp. *Journal of arid environments*, 68, 534-547.
- Shafizadeh, F. (2007). Thermal behavior of carbohydrates. *Journal of Polymer Science Part C: Polymer Symposia*, 36(1), 21–51. doi:10.1002/polc.5070360105
- Shafizadeh, F., and Susott, R. A. (1973). Crystalline transitions of carbohydrates. *The Journal of Organic Chemistry*, 38(21), 3710–3715. doi:10.1021/jo00961a011
- Sharma, R., & Ahuja, M. (2011). Thiolated pectin: Synthesis, characterization and evaluation as a mucoadhesive polymer. *Carbohydrate Polymers*, 85 (3), 658-663.
- Silva, O. A., Pellá, M. G., Pellá, M. G., Caetano, J., Simões, M. R., Bittencourt, P. R. S., & Dragunski, D. C. (2019). Synthesis and characterization of a low solubility edible film based on native cassava starch. *International Journal of Biological Macromolecules*, 128, 290–296. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.01.132
- Smith, W. F., & Hashemi, J. (2004). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (Cuarta ed.). (G. N. Cázares, & P. A. González, Trads.) USA: Mc. Graw Hill.

- Sobral, P. J. A., Menegalli, F. C., Hubinger, M. D., & Roques, M. A. (2001). Mechanical, water vapor barrier and thermal properties of gelatin based edible films. *Food Hydrocolloids*, 15(4-6), 423–432. doi:10.1016/s0268-005x(01)00061-3
- Sothornvit, R., Olsen, C. W., Mchugh, T., & Krochta, J. M. (2007). Tensile properties of compression-molded whey protein sheets: Determination of molding condition and glycerol-content effects and comparison with solution-cast films. *Journal of Food Engineering*, 78, 855-860. doi:10.1016/j.jfoodeng.2005.12.002.
- Surco, F. A. (2004). Caracterización de almidones aislados de tuberculos andinos: mashua (*Tropaeolum tuberosum*), oca (*Oxalis Tuberosa*), olluco (*Ullucus tuberosus*) para la aplicacion tecnológica. Lima, Perú.
- Suriñach, S., Baro, M. D., Bordas, S., Clavaguera, N., & Clavaguera-Mora, M. T. (1992). La calorimetría diferencial de barrido y su aplicación a la ciencia de los materiales. *Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, 31(1), 11-17.
- Susmitha, A., Sasikumar, K., Rajan, D., Padmakumar M, A., & Nampoothiri, K. M. (2021). Development and characterization of corn starch-gelatin based edible films incorporated with mango and pineapple for active packaging. *Food Bioscience*, 41, 100977. doi: 10.1016/j.fbio.2021.100977
- TA Instruments. (2018). Discover The World’S Finest Dynamic Mechanical Analyzer. TA Instruments Application Briefs, 1-38. Obtenido de <https://www.tainstruments.com/wp-content/uploads/BROCH-DMA850-2018-EN.pdf>
- Talledo, D., & Escobar, C. (1995). Citogenetica de *Oxalis tuberosa*: Ciclo celular y número cromosómico. *BIOTEMPO (Perú)*, 2, 33-46.
- Tanada-Palmu, P. S., & Grosso, C. (2003). Development and characterization of edible films based on gluten from semi-hard and soft Brazilian wheat flours (development of films based on gluten from wheat flours). *Food Science and Technology*, 23(2), 264-269.

- Thermo Fisher Scientific. (2013). Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Academy. FTIR Applications. USA. Obtenido de <https://www.thermofisher.com/pe/en/home/industrial/spectroscopy-elemental-isotope-analysis/spectroscopy-elemental-isotope-analysis-learning-center/molecular-spectroscopy-information/ftir-information/ftir-applications.html>
- Thermo Nicolet Corporation. (2 de enero de 2001). Infrared Spectrometry. Introduction to Fourier Transform Infrared Spectrometry. Madison, Wisconsin, USA: A Thermo Electron business. Obtenido de <https://www.chem.uci.edu/~dmitryf/manuals/Fundamentals/FTIR%20principles.pdf>
- Toledo, R. (1991). Fundamentals of food process engineering (second ed.). New York, U.S.A.: Chapman & Hall.
- Trejo-Márquez, M. A., Ramos-López, K., & Pérez, C. (2007). Efecto de la aplicación de un recubrimiento comestible a base de gelatina sobre la calidad de fresa (*Fragaria vesca* L.) almacenada en refrigeración. V Congreso iberoamericano de tecnología postcosecha y agroexportaciones, 230-239.
- Tupac, Y. A. (1999). Reducción de pérdidas por almacenamiento para el consumo de oca (*Oxalis Tuberosa*), Olluco (*Ullucus Tuberosa*) y mashua (*Tropaelum Tuberosum*) en raíces y tubérculos andinos. Avances de investigación Centro Internacion de la Papa (CIP), 213-222.
- Ugent, D., & Ochoa, C. (2006). La Etnobotánica del Perú. Desde la Prehistoria al Presente. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONCYTEC), Cuarta Edición.
- Uzun, I. (1996). Fruit and cladodes isosymes in cactus pear. *Acta Hort*, 438, 53-55.
- Vargas, G.; Martínez, P.; Velezmoro, C., (2016). Functional properties of potato (*Solanum tuberosum*) starch and its chemical modification by acetylation. *Sci. Agropecu*, 7, 223–230.

- Varnam, A. (1994). *Leche y productos lácteos*. Zaragoza, España: Acribia.
- Wang, J., Liu, T., Bian, X., Hua, Z., Chen, G., & Wu, X. (2021). Structural characterization and physicochemical properties of starch from four aquatic vegetable varieties in China. *International Journal of Biological Macromolecules*, 172, 542–549. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.01.078
- Wang, R., Li, X., Liu, L., Chen, W., Bai, J., Ma, F., ... Kang, W. (2020). Preparation and characterization of edible films composed of *Dioscorea opposita* Thunb. mucilage and starch. *Polymer Testing*, 106708. doi: 10.1016/j.polymertesting.2020.106708
- Weber-Anneler, H., & Arndt, R. W. (1985). Thermal methods of analysis/differential scanning calorimetry in theory and application. *Thermochimica Acta*, 85, 271-274.
- Whitten, K. W., Davis, R. E., & Peck, M. L. (2014). *Chemistry*. Edit. Cengage learning, 10^a. Ed. USA.
- Yaman, S. (2004). Pyrolysis of biomass to produce fuels and chemical feedstocks. *Energy Conversion and Management*, 45, 651–671.
- Zegada, V. Y. (2015). Extracción de pectina de residuos de cascara de naranja por hidrólisis ácida asistida por microondas (HMO). *UPB - investigación y desarrollo*, 1(15), 65-77.
- Zhao, J., & Wistler, R. L. (1994). Spherical aggregates of starch granules as flavor carriers. *Food Technology*, 48(7), 104-105.

ANEXOS

Anexo A. Matriz de consistencia

Problema General:	Objetivo General:	Hipótesis General:	Variables de la Investigación	Indicador	Unidad	La Población y Muestra
<p>¿En qué medida es posible sintetizar y caracterizar biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal (Opuntia ficus indica), almidón de oca (Oxalis tuberosa)?</p> <p>Problemas específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - ¿Cómo serán las propiedades fisicoquímicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, sintetizados a partir de almidón de oca y mucílago de nopal? - ¿Cómo serán las características mecánicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y almidón de oca? - ¿Cómo serán las características térmicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y almidón de oca? - ¿Cómo serán las características estructurales de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y almidón de oca? 	<p>Sintetizar y caracterizar biopelículas comestibles para recubrir alimentos a partir de mucílago de nopal (Opuntia ficus indica) y almidón de oca (Oxalis tuberosa).</p> <p>Objetivos Específicos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluar las propiedades fisicoquímicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborados a partir de almidón de oca y mucílago de nopal. - Evaluar las características mecánicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y, almidón de oca. - Evaluar las características térmicas de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y almidón de oca. - Evaluar las características estructurales de biopelículas comestibles para recubrir alimentos, elaborado a partir de mucílago de nopal y, almidón de oca. 	<p>Las biopelículas comestibles elaborados a partir de mucílago de nopal (Opuntia ficus indica) y almidón de oca (Oxalis tuberosa) presentarán buenas características para el empleo como recubrimiento de alimentos.</p> <p>Hipótesis específicas:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Las biopelículas sintetizadas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, presentaran adecuadas características físicas y químicas. - Las biopelículas sintetizadas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, mostraran mejores características mecánicas. - La incorporación de mucílago de nopal en las biopelículas elaboradas con almidón de oca, presentaran superiores características a la degradación térmica. - Las biopelículas sintetizadas a partir de mucílago de nopal, y almidón de oca, demostraran sobresalientes características estructurales. 	<p>Independiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Almidón de oca b) Mucílago de nopal c) Pectina d) Glicerina 	<ul style="list-style-type: none"> % adición % adición % adición % adición 	<ul style="list-style-type: none"> % % % % 	<p>Población: biopelículas comestibles elaborados a partir de almidón de oca, mucílago de nopal, pectina y glicerina</p> <p>Muestra: 100 gramos de la biopelícula comestible por cada tratamiento o formulación.</p>
			<p>Dependiente:</p> <ul style="list-style-type: none"> a) Físicas y Químicas 	<ul style="list-style-type: none"> - Densidad - Humedad - Transparencia - Solubilidad - Actividad de agua 	<ul style="list-style-type: none"> g/mL % Transmitancia % - % MPa 	
			<p>Descriptiva</p> <ul style="list-style-type: none"> - Características térmicas 	Estabilidad térmica	%	
			<ul style="list-style-type: none"> - Características estructurales 	Grupos funcionales	Transmitancia	

Anexo B. Instrumentos de recolección de información

Anexo B1: Datos densidad

	Área	1.470				
	Espesor (cm)			Masa		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
T1-40	0.014	0.015	0.013	0.040	0.041	0.0412
T2-40	0.012	0.013	0.013	0.040	0.040	0.0375
T3-40	0.012	0.012	0.014	0.030	0.034	0.0404
T4-50	0.012	0.012	0.013	0.036	0.035	0.035
T5-50	0.009	0.010	0.012	0.030	0.034	0.0384
T6-50	0.010	0.012	0.013	0.031	0.032	0.0339
T7-60	0.013	0.013	0.014	0.041	0.036	0.045
T8-60	0.010	0.009	0.009	0.026	0.027	0.0281
T9-60	0.011	0.011	0.010	0.030	0.026	0.0283

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.42958	8	0.053697	2.433067 7	0.049995	2.51079
Dentro de los grupos	0.39721	18	0.022077			
Total	0.82689	26				

Anexo B2: Datos solubilidad

	W inicial			W final		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
T1-40	0.220	0.152	0.187	0.009	0.005	0.002
T2-40	0.190	0.238	0.186	0.011	0.020	0.008
T3-40	0.108	0.139	0.147	0.003	0.008	0.011
T4-50	0.146	0.135	0.134	0.000	0.003	0.000
T5-50	0.142	0.134	0.161	0.013	0.009	0.015
T6-50	0.143	0.124	0.131	0.011	0.008	0.008
T7-60	0.136	0.127	0.124	0.005	0.006	0.003
T8-60	0.145	0.136	0.140	0.008	0.007	0.009
T9-60	0.118	0.166	0.124	0.006	0.009	0.007

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	119.976	8	14.9970303	7.3892	0.000223	2.510157
Dentro de los grupos	36.5321	18	2.02956527			
Total	156.508	26				

Anexo B3: Datos humedad

	Wmh			Wms		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
T1-40	0.274	0.228	0.171	0.205	0.171	0.128
T2-40	0.161	0.239	0.202	0.121	0.177	0.151
T3-40	0.173	0.101	0.097	0.132	0.076	0.074
T4-50	0.146	0.160	0.236	0.110	0.122	0.178
T5-50	0.174	0.169	0.168	0.131	0.128	0.127
T6-50	0.268	0.164	0.150	0.206	0.125	0.115
T7-60	0.236	0.119	0.271	0.181	0.091	0.208
T8-60	0.318	0.209	0.150	0.244	0.160	0.115
T9-60	0.116	0.119	0.174	0.090	0.093	0.135

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	17.9114	8	2.23892	8.4775	9.2408E-05	2.510157
Dentro de los grupos	4.75379	18	0.26404			
Total	22.6652	26				

Anexo B4: Datos transparencia

	Absorbancia (600 nm)			Espesor (mm)		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3
T1-40	0.082	0.103	0.092	0.11	0.15	0.13
T2-40	0.108	0.058	0.058	0.13	0.08	0.08
T3-40	0.076	0.178	0.153	0.08	0.16	0.14
T4-50	0.241	0.163	0.182	0.12	0.08	0.10
T5-50	0.180	0.083	0.267	0.13	0.06	0.17
T6-50	0.157	0.150	0.150	0.08	0.08	0.08
T7-60	0.096	0.118	0.118	0.10	0.12	0.12
T8-60	0.109	0.182	0.182	0.07	0.10	0.10
T9-60	0.267	0.142	0.238	0.13	0.07	0.11

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	6.96015	8	0.87001	111.478	9.6795E-14	2.51015
Dentro de los grupos	0.14047	18	0.00780			
Total	7.10063	26				

Anexo B5: Datos actividad de agua

	R1	R2	R3
T1-40	0.578	0.568	0.572
T2-40	0.476	0.482	0.477
T3-40	0.442	0.438	0.449
T4-50	0.538	0.525	0.530
T5-50	0.414	0.420	0.427
T6-50	0.412	0.424	0.419
T7-60	0.458	0.445	0.443
T8-60	0.405	0.412	0.407
T9-60	0.402	0.404	0.399

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	0.083606	8	0.01045	343.271	4.5511E-18	2.51015
Dentro de los grupos	0.000548	18	3.0444E-05			
Total	0.084154	26				

Anexo B6: Datos propiedades mecánicas

Tratamiento T1-40

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.26	3	0.003	0.029	0.021
0.37	6	0.006	0.059	0.042
0.54	7	0.007	0.069	0.049
0.73	9	0.009	0.088	0.063
1.5	20	0.02	0.196	0.140

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.14	1.4		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	18.8	8.8	0.88	88

Tratamiento T2-40

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0.000
0.032	1	0.001	0.010	0.008
0.45	3	0.003	0.029	0.023
0.56	6	0.006	0.059	0.046
0.63	7	0.007	0.069	0.054
1.7	22	0.022	0.216	0.170

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.13	1.266666667		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	17.3	7.3	0.73	73

Tratamiento T3-40

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.09	4	0.004	0.039	0.031
0.14	6	0.006	0.059	0.046
0.17	8	0.008	0.078	0.062
0.42	10	0.01	0.098	0.077
1.2	16	0.016	0.157	0.124

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.13	1.266666667		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	16.6	6.6	0.66	66

Tratamiento T4-50

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.1	2	0.002	0.020	0.016
0.15	4	0.004	0.039	0.032
0.43	9	0.009	0.088	0.072
1.3	16	0.016	0.157	0.127
1.8	18	0.018	0.177	0.143

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.12	1.233333333		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	18.7	8.7	0.87	87

Tratamiento T5-50

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.53	2	0.002	0.020	0.019
0.97	7	0.007	0.069	0.066
1.26	9	0.009	0.088	0.085
1.47	15	0.015	0.147	0.142
1.9	18	0.018	0.177	0.171

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.10	1.033333333		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	17.2	7.2	0.72	72

Tratamiento T6-50

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.09	1	0.001	0.010	0.008
0.18	2	0.002	0.020	0.017
0.25	3	0.003	0.029	0.025
0.68	8	0.008	0.078	0.067
1.5	16	0.016	0.157	0.134

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.12	1.166666667		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	17.9	7.9	0.79	79

Tratamiento T7-60

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.16	2	0.002	0.020	0.015
0.32	6	0.006	0.059	0.044
0.43	10	0.01	0.098	0.074
0.9	14	0.014	0.137	0.103
1.8	20	0.02	0.196	0.147

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.13	1.333333333		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	18.8	8.8	0.88	88

Tratamiento T8-60

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.1	2	0.002	0.020	0.021
0.32	6	0.006	0.059	0.063
0.56	9	0.009	0.088	0.095
0.78	14	0.014	0.137	0.147
2.1	18	0.018	0.177	0.189

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.09	0.933333333		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	18.5	8.5	0.85	85

Tratamiento T9-60

t (s)	Fuerza (gf)	Fuerza (kgf)	Fuerza (N)	Esfuerzo
0	0	0	0	0
0.22	2	0.002	0.020	0.018
0.35	4	0.004	0.039	0.036
0.59	10	0.01	0.098	0.089
1.4	14	0.014	0.137	0.125
1.9	16	0.016	0.157	0.143

Largo cm	Ancho cm	Área (cm ²)		
10	1	10		
Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área trans (mm ²)		
10	0.11	1.1		
Lo (cm)	Lf (cm)	ΔL (cm)	Def. Unitaria	% Elongación
10	19.1	9.1	0.91	91

ANÁLISIS DE VARIANZA						
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Entre grupos	240.666	2	120.333	1.88347	0.2318333	5.143252
Dentro de los grupos	383.333	6	63.888			
Total	624	8				

Determination of Water (Moisture) and Dry Matter in Animal Feed, Grain, and Forage (Plant Tissue) by Karl Fischer Titration: Collaborative Study

NANCY J. THIEX and TERRI VAN EREM

South Dakota State University, Oscar E. Olson Biochemistry Laboratories, Box 2170, ASC 151, Brookings, SD 57007

Collaborators: D. Amundson; J. Boucher; A. Clark; D. Clark; P. Coco; D. Dow; P. Fahey; H. Hoffmann; D. Mertens; H. Morris; T. Rittenhouse; M. Wohl

A Karl Fischer method for determining water (dry matter) in animal feed and forages was collaboratively studied. Water was extracted from animal feed or forage material into methanol-formamide (1 + 1) directly in the Karl Fischer titration vessel by high-speed homogenization. The water was titrated at 50°C with one-component Karl Fischer reagent based on imidazole. Ten blind samples were sent to 9 collaborators in the United States, Canada, and Germany. The within-laboratory relative standard deviation (repeatability) ranged from 1.14 to 6.99% for water or from 0.09 to 0.56% for dry matter. Among-laboratory (including within-) relative standard deviation (reproducibility) ranged from 5.35 to 10.73%, or from 0.44 to 0.77% for dry matter. The authors recommend that the method be adopted as Official First Action by AOAC INTERNATIONAL. A comparable alternative extraction procedure using boiling methanol is also recommended for Official First Action.

Discrepancies in results obtained when various oven methods are used to determine moisture and dry matter in animal feeds were observed with American Association of Feed Control Officials (AAFCO) Check Sample Results and with National Forage Testing (NFTA) Proficiency Samples. In response to the need for a primary, nonempirical method for determining water in feeds and forages by the agricultural community, a Karl Fischer (KF) method was developed and validated. The method validation, including repeatability, reproducibility, and comparability studies, was previously described in detail (1). The method is

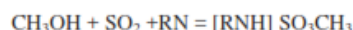
applicable for determination of water in dry, ground animal feed and forage from 1–15% water; it is not applicable for mineral mix feed. To recommend this KF method for determining water (moisture) in animal feed and forage (plant tissue) as an Official Method, a collaborative study was conducted to evaluate its repeatability and reproducibility. The agricultural analytical community urgently needs a primary moisture method for feed and forage material.

Principle

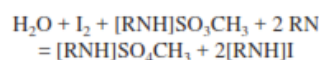
Feeds and forages are heterogeneous materials that contain substances of cellular structures that release water very slowly and incompletely. To speed the extraction and reaction, cellular structures are ruptured by high-speed homogenization, and the titration is performed at an elevated temperature (50°C) in methanol-formamide (1 + 1). The formamide dissolves sugar and helps to distribute protein. Under this combination of conditions, extractions and titrations can be completed in a short time (2).

Extraction of water from the animal feed or forage material into boiling methanol directly in the KF titration vessel without homogenization provides comparable recoveries of water, and is provided as an alternative extraction procedure for rapid extractions and titrations. Other components extracted from the samples with water, e.g., oils, and carbohydrates, do not interfere with the KF method, which is based on a specific chemical reaction that consumes water. This method provides for the dry ground test portion to be weighed and added directly to the titration cell. This is the preferred method for reliable administration of sample and minimal contamination by atmospheric moisture.

The chemistry of the KF reactions has been documented by Eugen Scholz (3):



where RN = imidazole base.



Submitted for publication November 2001.

The recommendation was approved by the Methods Committee on Feeds, Fertilizer, and Related Agricultural Topics. Method I was approved for Official First Action at their meeting in Kansas City, MO, on September 8, 2001 and Method II was approved for Official First Action on February 6, 2002. See "Official Methods Program Actions," (2001) *Inside Laboratory Management*, November/December issue.

Corresponding author's e-mail: nancy_thiex@sdstate.edu.



Designation: E 1131 – 08

Standard Test Method for Compositional Analysis by Thermogravimetry¹

This standard is issued under the fixed designation E 1131; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method provides a general technique incorporating thermogravimetry to determine the amount of highly volatile matter, medium volatile matter, combustible material, and ash content of compounds. This test method will be useful in performing a compositional analysis in cases where agreed upon by interested parties.

1.2 This test method is applicable to solids and liquids.

1.3 The temperature range of test is typically room temperature to 1000 °C. Composition between 1 and 100 weight % of individual components may be determined.

1.4 This test method utilizes an inert and reactive gas environment.

1.5 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.6 This standard is related ISO 11358 but is more detailed and specific.

1.7 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

2. Referenced Documents

2.1 *ASTM Standards:*²

D 3172 Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke

E 473 Terminology Relating to Thermal Analysis and Rheology

E 691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E 1142 Terminology Relating to Thermophysical Properties

E 1582 Practice for Calibration of Temperature Scale for Thermogravimetry

E 2040 Test Method for Mass Scale Calibration of Thermo-

gravimetric Analyzers

2.2 *ISO Standard:*

11358 Plastics-Thermogravimetry (TG) of Polymers — General Principles³

3. Terminology

3.1 *Definitions:*

3.1.1 Many of the technical terms used in this test method are defined in Terminologies **E 473** and **E 1142**.

3.2 *Definitions of Terms Specific to This Standard:*

3.2.1 *highly volatile matter*—moisture, plasticizer, residual solvent or other low boiling (200 °C or less) components.

3.2.2 *medium volatile matter*—medium volatility materials such as oil and polymer degradation products. In general, these materials degrade or volatilize in the temperature range 200 to 750 °C.

3.2.3 *combustible material*—oxidizable material not volatile (in the unoxidized form) at 750 °C, or some stipulated temperature dependent on material. Carbon is an example of such a material.

3.2.4 *ash*—nonvolatile residues in an oxidizing atmosphere which may include metal components, filler content or inert reinforcing materials.

3.2.5 *mass loss plateau*—a region of a thermogravimetric curve with a relatively constant mass.

4. Summary of Test Method

4.1 This test method is an empirical technique using thermogravimetry in which the mass of a substance, heated at a controlled rate in an appropriate environment, is recorded as a function of time or temperature. Mass loss over specific temperature ranges and in a specific atmosphere provide a compositional analysis of that substance.

5. Significance and Use

5.1 This test method is intended for use in quality control, material screening, and related problem solving where a compositional analysis is desired or a comparison can be made with a known material of the same type.

5.2 The parameters described should be considered as guidelines. They may be altered to suit a particular analysis, provided the changes are noted in the report.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee E37 on Thermal Measurements and is the direct responsibility of Subcommittee E37.01 on Thermal Test Methods and Practices.

Current edition approved Sept. 1, 2008. Published October 2008. Originally approved in 1986. Last previous edition approved in 2003 as E 1131 – 03.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For *Annual Book of ASTM Standards* volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Supporting data available from ASTM. Request RR: E37-1009.



Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting¹

This standard is issued under the fixed designation D882; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This standard has been approved for use by agencies of the U.S. Department of Defense. These test methods have been approved for use by agencies of the Department of Defense to replace Method 1013 of Federal Test Method Standard 406.

1. Scope^a

1.1 This test method covers the determination of tensile properties of plastics in the form of thin sheeting and films (less than 1.0 mm (0.04 in.) in thickness).

NOTE 1—Film is defined in Terminology D883 as an optional term for sheeting having a nominal thickness no greater than 0.25 mm (0.010 in.).

NOTE 2—Tensile properties of plastics 1.0 mm (0.04 in.) or greater in thickness shall be determined according to Test Method D638.

1.2 This test method can be used to test all plastics within the thickness range described and the capacity of the machine employed.

1.3 Specimen extension can be measured by grip separation, extension indicators, or displacement of gage marks.

1.4 The procedure for determining the tensile modulus of elasticity is included at one strain rate.

NOTE 3—The modulus determination is generally based on the use of grip separation as a measure of extension; however, the desirability of using extensometers, as described in 6.2, is recognized and provision for the use of such instrumentation is incorporated in the procedure.

1.5 Test data obtained by this test method is relevant and appropriate for use in engineering design.

1.6 The values stated in SI units are to be regarded as the standard. The values in parentheses are provided for information only.

1.7 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

NOTE 4—This test method is similar to ISO 527-3, but is not considered technically equivalent. ISO 527-3 allows for additional specimen configurations, specifies different test speeds, and requires an extensometer or gage marks on the specimen.

1.8 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

D618 Practice for Conditioning Plastics for Testing

D638 Test Method for Tensile Properties of Plastics

D883 Terminology Relating to Plastics

D4000 Classification System for Specifying Plastic Materials

D5947 Test Methods for Physical Dimensions of Solid Plastics Specimens

D6287 Practice for Cutting Film and Sheeting Test Specimens

D6988 Guide for Determination of Thickness of Plastic Film Test Specimens

E4 Practices for Force Verification of Testing Machines

E691 Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method

E2935 Practice for Conducting Equivalence Testing in Laboratory Applications

2.2 ISO Standard:

ISO 527-3 Plastics—Determination of Tensile Properties—Part 3: Test Conditions for Films and Sheets³

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of terms that appear in this test method relating to plastics, refer to Terminology D883.

3.2 Definitions of Terms Specific to This Standard:

¹ These test methods are under the jurisdiction of ASTM Committee D20 on Plastics and are the direct responsibility of Subcommittee D20.19 on Film, Sheeting, and Molded Products.

Current edition approved Aug. 1, 2018. Published August 2018. Originally approved in 1946. Last previous edition approved in 2012 as D882 - 12. DOI: 10.1520/D0882-18.

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ Available from American National Standards Institute (ANSI), 25 W. 43rd St., 4th Floor, New York, NY 10036, <http://www.ansi.org>.

Anexo D. Panel Fotográfico

Material fotográfico de la investigación realizada



Lavado de materia prima



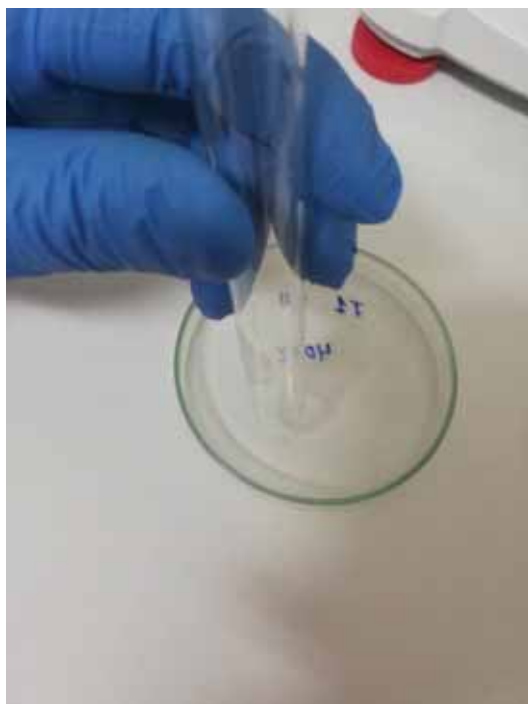
Precipitación del almidón



Extracción de mucílago



Molienda de almidón



Determinación de densidad



Pesado de biopelículas comestibles



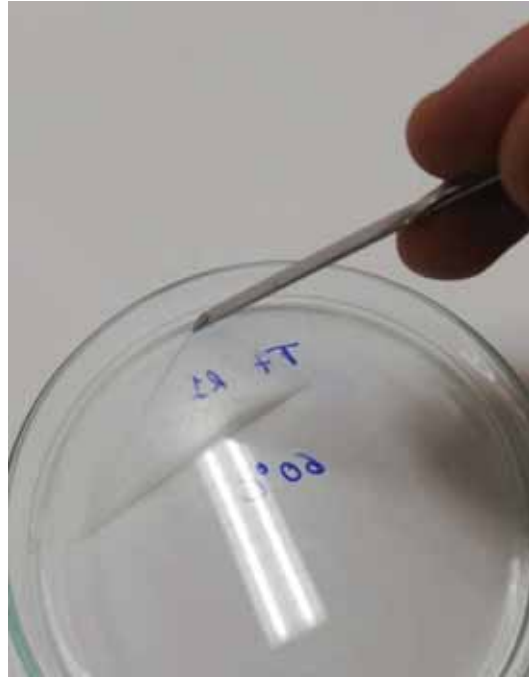
Pesado de contenedor de aluminio



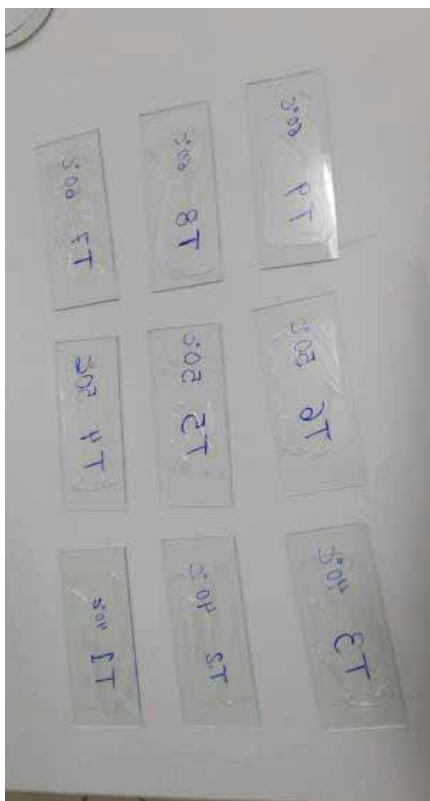
Determinación de humedad



Pesado de muestra



Extracción de biopelícula comestible



Preparación de muestras



Corte de muestras para análisis