



**“DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS ACTIVOS DE ALMIDÓN CON COMPLEJOS
DE INCLUSIÓN PRODUCIDOS POR DIFERENTES METODOS”**

**BAJO LA OPCIÓN:
TITULACIÓN INTEGRAL
(TESIS PROFESIONAL)**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

**PRESENTA:
ERNESTO ALFONSO GARCÍA GONZÁLEZ**

**ASESOR INTERNO:
MTRO. FILEMON MONZALVO LICONA**

**SINODALES:
MTRA. FABIOLA VELAZQUEZ ALONSO
MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ**

**ASESORES EXTERNOS:
DRA. PAMELA CELESTE FLORES SILVA
DR. ISRAEL SIFUENTES NIEVES**

**Pachuca de Soto, Hgo. ENERO 2026
69 páginas**





Pachuca de Soto, Hidalgo, 13/Marzo/2025
Oficio No. DIQ/026/2025

Asunto: ACEPTACIÓN DE TEMA Y OPCIÓN

C. ERNESTO ALFONSO GARCÍA GONZÁLEZ
PRESENTE

Con el presente me permito informarle que el tema "DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS ACTIVOS DE ALMIDÓN CON COMPLEJOS DE INCLUSIÓN PRODUCIDOS POR DIFERENTES METODOS" ha sido ACEPTADO para ser presentado por la opción TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL) contemplada en la normatividad vigente para tal efecto.

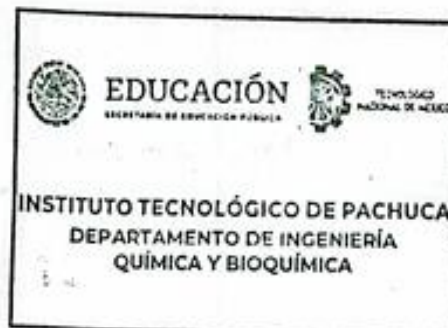
Lo anterior se le ha designado como ASESOR al MTR0. FILEMON MONZALVO LICONA y como comisión revisora a la MTRA. FABIOLA VELAZQUEZ ALONSO y MTRA. MA. JUANA ARRIAGA GÓMEZ. Una vez hecha la revisión final se liberará por dicho comité para su impresión y proceder a sustentar al ACTO DE RECEPCIÓN PROFESIONAL

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"


DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p. archivo
AFG/bfa



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta
C.P. 42083 Pachuca de Soto, Hidalgo.
Tels. 771 7113073, 771 7113596, 771 7113140, 771 7115119 y 771 7113399
e-mail: ciquimica@pachuca.tecnm.mx | www.pachuca.tecnm.mx





Instituto Tecnológico de Pachuca
Subdirección Académica
Depto. De Ing. Química y Bioquímica

Pachuca de Soto, Hgo., 30/Enero/2026
Oficio No. DIQyB/100/2026

ASUNTO: Liberación para el Acto de Recepción Profesional

C. ERNESTO ALFONSO GARCÍA GONZÁLEZ, No. de Control: 19200297
Egresado del Programa Educativo de Ingeniería Química y Bioquímica
PRESENTE

Por este medio informo que ha sido liberado el siguiente proyecto para la titulación integral:

Nombre del proyecto:	"DESARROLLO DE RECUBRIMIENTOS ACTIVOS DE ALMIDÓN CON COMPLEJOS DE INCLUSIÓN PRODUCIDOS POR DIFERENTES METODOS"
Producto:	TITULACIÓN INTEGRAL (TESIS PROFESIONAL)

Sin otro particular, quedo de usted.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica
"El Hombre Alimenta el Ingenio en Contacto con la Ciencia"

DRA. ALEJANDRA FLETES GÓMEZ
JEFA DEL DEPTO. DE ING. QUÍMICA Y BIOQUÍMICA



c.c.p.- Expediente.
AFG/bfa

ITPAC-AC-PO-008-06



2026
año de
Margarita Maza



Agradecimientos técnicos

Dr. Ernesto Hernández Hernández: por permitirme realizar las prácticas profesionales en CIQA y adquirir diferente conocimiento intelectual como personal del equipo LANI-AUTO.

Dr. Israel Sifuentes Nieves: expreso mi más sincero agradecimiento por haberme permitido desarrollar este proyecto de tesis en CIQA, esta oportunidad me ha sido esencial para fortalecer mi crecimiento intelectual y profesional.

Dra. Pamela Celeste Flores Silva: agradezco su apoyo, paciencia, conocimientos y tiempo que me brindo para poder realizar mi investigación y experimentación, gracias a usted obtuve lecciones con mucho valor, usted me ha ayudado a crecer a través del esfuerzo y la dedicación.

Dra. Zureima García Hernández: por proporcionarme el equipo necesario para poder almacenar mis muestras, así como el conocimiento de la redacción de bitácora y la realización de buenas prácticas.

Dr. Pablo González Morones: por la capacitación proporcionada de búsqueda de información y la realización del estado del arte.

Dra. Julieta Sánchez Salazar: por la capacitación brindada para trabajar con el equipo FTIR.

Ing. Jesús Gilberto Rodríguez Velázquez: por el apoyo y proporción de material necesario para poder realizar mi experimentación en el laboratorio

Lic. Daniel Alejandro Alvarado Medrano: por la instalación de los programas OriginPro y Mendelev para llevar un mejor control de mis gráficas y fuentes de información.

M. en C. Filemón Monzalvo Licona: por el tiempo y la dedicación que me brindó para corregir y mejorar el formato de mi tesis. Su orientación y apoyo fueron fundamentales para que el trabajo cumpliera con los requisitos necesarios, y valoro mucho su disposición para ayudarme en este proceso.

Agradecimientos personales

A LA VIDA: Gracias por brindarme la oportunidad de afrontar nuevos retos y experiencias, por permitirme salir de mi zona de confort. Aunque el miedo ha sido un compañero constante, ha sido precisamente ese miedo el que me ha llevado tan lejos.

A MI MADRE: Pilar, una gran mujer que siempre me ha dado su cariño, apoyo y comprensión incondicional. Tu fortaleza y amor han sido mi guía y mi refugio, estar contigo es una bendición para mí.

A MI PADRE: Mario, por ser fundamental en mi vida. Gracias por enseñarme el valor del esfuerzo, la perseverancia y la integridad. Tu ejemplo ha sido una fuente constante de inspiración.

A MIS HERMANOS: Carlos y Emilio, su apoyo constante y su ejemplo de superación personal han sido una gran fuente de inspiración para mí. Gracias por estar siempre a mi lado, por sus consejos y por ser mis hermanos. Eso nunca cambiara, no importa lo que pase, podremos estar separados por la distancia, pero nunca por el corazón.

A MIS AMIGOS: Emmanuel, Selene, Daniela, Mariana, Paola, Zuri, César, Leonardo e Italivi, a quienes considero no solo compañeros, sino grandes personas que han contribuido enormemente a mi crecimiento profesional, personal y espiritual. Su apoyo y amistad son de mis mayores tesoros los cuales han sido esenciales en este viaje.

Cada uno de ustedes ha dejado una huella indeleble en mi vida. **Emmanuel**, gracias por tu constante motivación y compañerismo. En las dificultades, tu perseverancia fue clave para que juntos pudiéramos perseguir nuestros ideales. **Selene**, tu inquebrantable lealtad y corazón sincero han sido un pilar fundamental para seguir adelante, incluso cuando las razones parecían desvanecerse. **Daniela**, gracias por tu alegría y optimismo, tus sonrisas son un regalo que ilumina no solo tu vida, sino también la de quienes te rodeamos. **Mariana**, tus sabios consejos, nacidos de un corazón que comprende el lenguaje universal de quienes buscan la grandeza, han sido una guía invaluable para mí. **Paola**, tu bondad y comprensión, son un recordatorio de que un corazón compasivo puede sanar hasta las heridas más profundas. **Zuri**, tu entusiasmo y energía son tan contagiosos en cada paso que das, recordándome que, incluso en los días más difíciles, hay fuerza en seguir adelante. **César**, gracias por tu vigor y determinación. Me enseñaste que el hombre que no lucha por lo que quiere no merece nada. **Leonardo**, tu amistad a lo largo de los años ha sido un tesoro, no importa que tan lejos estes siempre tendrás mi apoyo. **Italivi**, tu amor, paciencia y amabilidad son tan brillantes, que a veces brillan con tanta fuerza que tengo que apartar la mirada. Aun así, ¿Está bien si me quedo a tu lado?

(La La Land 01:49:55)

A todos ustedes, gracias por ser parte de este viaje. Su presencia ha hecho que cada paso del camino valga la pena.

Resumen

El presente trabajo describe la elaboración de complejos de inclusión (IC) de β -ciclodextrina (β -CD) con aceites esenciales (EO) de naranja (EO-Or) y clavo (EO-Cl), mediante los métodos de ultrasonido y plasma, empleando una relación 1:2 de EO: β -CD. El objetivo de este estudio fue determinar la formación de complejos de inclusión por plasma frío y ultrasonido para adicionarse en recubrimientos de almidón. Se caracterizaron las propiedades estructurales (FTIR/DRX), térmicas (TGA/DSC), y morfológicas (MEB), de los complejos de inclusión (IC-UCl, IC-UOr, IC-PCl y IC-POR). Se realizaron pruebas de funcionalidad en plátanos y champiñones, seleccionados por su susceptibilidad a la maduración y proliferación de hongos. También se realizaron pruebas de permeabilidad a las películas a base de almidón waxy (F-WS) con los complejos de inclusión adicionados (F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POR). El análisis morfológico (MEB) y FT-IR reveló la formación de los IC puesto que confirmó las interacciones moleculares entre los aceites esenciales de clavo y naranja con la β -CD. El TGA y DSC mostraron una alta estabilidad térmica de los IC. Las pruebas de funcionalidad determinaron la eficacia del recubrimiento al retrasar la maduración de los plátanos y la proliferación de hongos en los champiñones, beneficiándose de las propiedades de barrera observadas en las pruebas de permeabilidad. Los resultados respaldaron que las películas con IC de naranja (F-UOR, F-POR) demostraron valores más bajos de permeabilidad que las de clavo (F-UCl, F-PCl). Sin embargo, en la prueba de vida de anaquel el aceite esencial de clavo contribuyó a una maduración más uniforme que los de aceite esencial de naranja.

Palabras clave: Complejos de inclusión, aceites esenciales, β -Ciclodextrina, Plasma frío, ultrasonido

Abstract

The present work describes the elaboration of B-cyclodextrin (B-CD) inclusion complexes (IC) with orange (EO-CI) and clove (EO-Cl) essential oils (EO-CI), using ultrasound and plasma methods and a 1:2 ratio of EO:B-CD. The aim of this study was to determine the formation of inclusion complexes through cold plasma and ultrasound for their incorporation into starch coatings. The structural (FTIR/XRD), thermal (TGA/DSC), and morphological (MEB) properties of the inclusion complexes (IC-UCl, IC-UOr, IC-PCl and IC-POr) were characterized. Functionality tests were evaluated on bananas and mushrooms, selected for their susceptibility to ripening and proliferation of fungi; permeability tests of waxy starch-based films (F-WS) were performed with added inclusion complexes (F-UCl, F-UOr, F-PCl and F-POr). Morphological and FT-IR analysis revealed the formation of ICs as it confirmed the molecular interactions between clove and orange essential oils with the β CD. The TGA and DSC showed high thermal stability of the ICs. Functionality tests determined the effectiveness of the coating in delaying banana ripening and fungal proliferation on mushrooms, benefiting from the barrier properties **observed** in permeability tests. The results supported that films with orange CI (F-UOR, F-POR) demonstrated lower permeability values than nail films (F-UCl, F-UPl). However, in the shelf-life test, clove essential oil contributed to a more uniform ripening than orange essential oil.

Keywords: Inclusion complexes, essential oils, β -Cyclodextrin, cold plasma, ultrasound

Contenido

Agradecimientos técnicos	i
Agradecimientos personales	ii
Resumen	iv
Abstract	v
Contenido	vi
Índice de figuras	viii
Índice de tablas	x
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES.....	1
1.1 Introducción	2
1.2 Objetivo General	3
1.3 Objetivos específicos	3
1.4 Hipótesis	3
1.5 Justificación	4
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTO TEÓRICO.....	5
Fundamento teórico	6
2.1 Almidón	6
2.2 Complejos de inclusión.....	8
2.2.1 Aceites esenciales	9
2.2.2 Ciclodextrinas	9
2.2.3 Aspectos químicos y físicos de las CDs	10
2.3 Técnicas de elaboración de complejos de inclusión	11
2.3.1 Plasma frío.....	12
2.3.2 Ultrasonido	13
Antecedentes	14
2.4 Empaques activos de alimentos.....	14
2.5 Recubrimientos activos.....	15
2.6 Materiales usados en la formación de recubrimientos activos.	17
2.6.1 Plastificantes.....	19
2.6.2 Proteínas	20
2.6.3 Polisacáridos	21
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA	22
3.1 Materiales.....	23
3.2 Preparación de los complejos de inclusión por plasma.....	23

3.3	Preparación de los complejos de inclusión por ultrasonido.	23
3.4	Elaboración de películas	24
3.5	Aplicación del recubrimiento	25
3.6	Técnicas de caracterización.....	25
3.6.1	Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR).....	25
3.6.2	Análisis Termogravimétrico (TGA).....	25
3.6.3	Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC).....	26
3.6.4	Difracción de Rayos X (XRD)	26
3.6.5	Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)	26
3.6.6	Permeabilidad al vapor de agua	26
3.6.7	Prueba de funcionalidad	27
CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS		28
4.1	Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR).....	29
4.2	Análisis termogravimétrico (TGA).....	31
4.3	Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)	34
4.4	Difracción de rayos X (DRX)	36
4.5	Microscopia electrónica de barrido (MEB).....	37
4.6	Prueba de funcionalidad.....	39
4.7	Permeabilidad al vapor de agua (WVP).....	47
4.8	Mecanismo de formación de los complejos de inclusión.....	48
4.8.1	Formación de complejo de inclusión	49
4.8.2	La liberación del aceite esencial de un IC	50
CONCLUSIÓN		51
BIBLIOGRAFÍA		52
ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA.....		67
ANEXOS.....		68
7.1	Anexo A. Carta aceptación, Fuente: (CIQA, 2024).....	68
7.2	Anexo B. Carta Terminación, Fuente: (CIQA, 2024).....	69

Índice de figuras

Núm.	Título	Pág.
Figura 2.1	Estructura de los componentes del almidón: amilosa y amilopectina.	6
Figura 2.2	Mecanismo esquemático del proceso de encapsulación molecular.....	8
Figura 2.3	Aceites esenciales.....	9
Figura 2.4	Representación esquemática de la forma geométrica de las CD y su representación esquemática de la forma geométrica y sus estructuras químicas para (A) α -CD, (B) β -CD y (C) γ -CD.	10
Figura 2.5	Métodos de obtención de IC.	11
Figura 2.6	Representación esquemática de especies de vida corta y larga generadas por plasma en la fase gaseosa.	12
Figura 2.7	Las principales aplicaciones del plasma frío.....	12
Figura 2.8	Ilustración esquemática de la formación de IC procesada por ultrasonidos de EOC con M β CD.....	13
Figura 2.9	Componentes de películas y recubrimientos comestibles.....	18
Figura 3.1	Formación de complejo de inclusión por plasma: a) agitación magnética, b) equipo de plasma y c) filtración a vacío de IC.....	23
Figura 3.2	Formación de IC por ultrasonido a) Equipo de ultrasonido, b) Polvos de los complejos de inclusion formados IC-PCl, IC-POr.....	24
Figura 3.3	Método de esparcimiento.....	25
Figura 3.4	Escala en la evaluación de la calidad de fruta del plátano.....	27
Figura 4.1	Espectros de FTIR a) IC de EO-Cl; b) Películas con IC de EO-Cl; c) IC de EO- Or; d) Películas con IC de EO-Or.	30
Figura 4.2	Curvas de pérdida de peso y derivadas de los IC por ultrasonido y plasma de EOs de clavo y naranja:(a) Curvas de pérdida de peso del IC de clavo, (c) de naranja, (b) Derivadas de la pérdida de peso del IC de clavo y (d) de naranja. Perdida de peso de los EOs (Gráficos internos a y c) y sus derivadas (Gráficos internos a y c).	32
Figura 4.3	Curvas de pérdida de peso y derivadas de la pérdida de peso, películas de almidón waxy (WS) con complejos de inclusión de aceite esencial de clavo (a, b) y películas de complejos de inclusión de aceite esencial de naranja (c, d).....	33
Figura 4.4	Termogramas de calorimetría diferencial de barrido a) IC de EO-Cl; b) Películas con IC de EO-Cl; c) IC de EO-Or; d) Películas con IC de EO-Or.....	34

Figura 4.5 Curvas XRD de las películas control y con complejos de inclusión F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr.....	36
Figura 4.6 Caracterización y análisis de los complejos de inclusión y características de la morfología de las nanopartículas en aumentos de 500x, 1000x y 2000x.	37
Figura 4.7 Imágenes SEM de la superficie de las películas de almidón waxy y las películas con complejos de inclusión con aumento de 2500x.	38
Figura 4.8 Plátanos almacenados a condiciones de temperatura ambiente.	41
Figura 4.9 Plátanos almacenados en refrigeración.....	41
Figura 4.10 Champiñones almacenados a temperatura ambiente.	44
Figura 4.11 Champiñones almacenados en refrigeración.....	45
Figura 4.12 Pérdida de peso en champiñones en los días 1,3,5 y 7 a) Champiñones almacenados en temperatura ambiente, b) Champiñones almacenados en refrigeración.....	46
Figura 4.13 Permeabilidad al vapor de agua en películas con IC.	47
Figura 4.14 Métodos para la formación de IC, a) Ultrasonido y b) Plasma frío.....	48
Figura 4.15 Representación esquemática de la formación del complejo de inclusión de ciclodextrina (IC).	49
Figura 4.16 Representación esquemática de las estructuras de IC del tipo a) jaula para aceite esencial de naranja y b) tipo capa para aceite esencial de clavo.	49
Figura 4.17 Difusión del proceso de liberación controlada del aceite esencial de la cavidad de la β -Ciclodextrina a) IC de aceite esencial de naranja y b) IC aceite esencial de clavo.	50

Índice de tablas

Núm.	Título	Pág.
Tabla 2.1	Las características del almidón.	7
Tabla 2.2	Principales propiedades físicas y químicas de α -, β - y γ -CDs.	10
Tabla 2.3	Ventajas y desventajas del uso de biopolímeros habituales.	14
Tabla 2.4	Empresas comerciales en la fabricación de recubrimientos.	15
Tabla 4.1	Propiedades térmicas de las películas activas.	35

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

Este capítulo se presentan las generalidades que fundamentan la realización de este proyecto de tesis de licenciatura tales como la: introducción, justificación, hipótesis, objetivo general y objetivos específicos; con el fin de facilitar una mejor comprensión del documento.

1.1 Introducción

La producción de envases alimentarios fabricados con plásticos producidos a partir de petroquímicos, como el polietilentreftalato (PET), el policloruro de vinilo (PVC), el polietileno (PE), el polipropileno (PP), el poliestireno (PS) y la poliamida (PA), es cada vez más frecuente (Siracusa et al., 2008) debido a su bajo costo, resistencia mecánica y versatilidad. Sin embargo, la creciente preocupación por los impactos negativos de los plásticos en el medio ambiente ha fomentado el desarrollo de alternativas de empaques que utilizan fuentes renovables como materia prima (Vianna et al., 2021)

El cambio a empaques de fuentes más sostenibles es beneficioso por su potencial para combatir otro desafío, el desperdicio de alimentos. Cada año se desperdician 1,300 millones de toneladas de alimentos en todo el mundo a lo largo de la cadena de suministro de alimentos, es decir, desde el cultivo y la producción hasta el consumo final de los hogares (Gustavsson et al., 2011), causando importantes daños económicos, ambientales y sociales. Cada año se desperdicia aproximadamente 1 billón de dólares en alimentos, que además tienen un costo ambiental asociado al desperdicio de alimentos en los hogares de 700 mil millones de dólares debido a los recursos naturales necesarios para producir los alimentos que se desechan o no se consumen, mientras que los costos sociales ascienden a aproximadamente 900 mil millones de dólares estadounidenses (Food and Agriculture Organization, 2014). De hecho, el desperdicio de alimentos plantea un desafío importante para la seguridad alimentaria mundial (Principato et al., 2021).

Una alternativa que es sostenible con el medio ambiente son los polímeros naturales, que además destacan como materias primas renovables excepcionales para satisfacer la demanda de empaques sostenibles. En este contexto, los polisacáridos, las proteínas y los lípidos son bien conocidos en la producción de películas y recubrimientos para empaques de alimentos. Sin embargo, el desafío asociado con la aplicación de dicho material polimérico es cumplir con los requisitos necesarios para un rendimiento mecánico y de barrera superior, además de ser competitivo en el mercado (Kraśniewska et al., 2019).

El almidón está presente en cereales, raíces, tubérculos, frutas y verduras. Debido a su biocompatibilidad, biodegradabilidad y disponibilidad, el almidón se ha utilizado ampliamente en la producción de películas comestibles y recubrimientos para el envasado de alimentos (Cazón et al., 2017). El empaque activo de alimentos es una opción novedosa desempeñando un papel fundamental en la conservación de los alimentos, prolongando su vida útil y mejorando su seguridad y propiedades sensoriales, manteniendo al mismo tiempo la calidad de los alimentos (Ribeiro-Santos et al., 2017).

Del mismo modo, las investigaciones de empaques activos se centran en la incorporación de agentes activos antimicrobianos volátiles y no volátiles, naturales o sintéticos, en una matriz polimérica (Bangar et al., 2021). Por lo tanto, la protección del agente activo es fundamental.

La protección de la molécula activa durante el procesamiento puede superarse fácilmente por diferentes vías, una de ellas se basa en la encapsulación. Como consecuencia, las ciclodextrinas se han incorporado a los empaques de alimentos, formando complejos de inclusión (IC) (Velázquez-Contreras et al., 2022), los cuales se pueden formar por modificaciones físicas con alteraciones químicas como lo son el plasma y ultrasonido, dichos tratamientos son tecnologías amigables o “verdes” que interactúan con las ciclodextrinas y la molécula activa para la formación de los complejos de inclusión.

1.2 Objetivo General

Analizar el efecto del método de obtención de complejos de inclusión en las propiedades estructurales y funcionales de recubrimientos comestibles de almidón.

1.3 Objetivos específicos

- Elaborar complejos de inclusión a base de β -ciclodextrinas (β -CD) y aceite esencial mediante el proceso de ultrasonido y plasma frío.
- Caracterizar estructuralmente los complejos de inclusión.
- Elaborar un recubrimiento utilizando una solución filmogénica con los complejos de inclusión obtenidos por los diferentes métodos.
- Caracterizar las propiedades fisicoquímicas y funcionales del recubrimiento.

1.4 Hipótesis

El método de plasma frío será efectivo para formar complejos de inclusión de β -CD y aceites esenciales. Estos complejos de inclusión podrán ser utilizados, en recubrimientos activos para proteger e incrementar la vida de anaquel de champiñones y plátanos.

1.5 Justificación

En la actualidad, la búsqueda de la sustentabilidad enfoca las investigaciones hacia encontrar alternativas para mitigar el impacto ambiental de los plásticos derivados del petróleo. Los cuales han sido indispensables para usos como la conservación de alimentos, generando contaminación por su lenta degradación y acumulación en ecosistemas, a su vez que liberan micro plásticos que afectan a la salud y al medio ambiente. Como resultado a esta problemática, surge como respuesta la elaboración de plásticos biodegradables o mejor conocidos como biopolímeros.

Entre los biopolímeros se destaca el almidón siendo uno de los más utilizados, el cual es un polisacárido que se destaca por ser biodegradable, renovable y abundante. Es un material versátil que se puede utilizar en una variedad de procesos de termo-plastificación, presentando propiedades de barrera contra el oxígeno y el vapor de agua, lo que lo convierte en una opción a implementar en recubrimientos activos.

Puesto que los recubrimientos activos son capas de películas que se aplican a los alimentos perecederos, conteniendo agentes que protegen la superficie, y liberan sustancias activas que se encuentran en los aceites esenciales. La investigación de los recubrimientos activos nos ha llevado a determinar la eficacia de la adición de los aceites esenciales de forma directa en las capas de películas de los biopolímeros, determinando que se requiere de la protección de los agentes activos ante factores como la luz, el oxígeno y el calor.

En este trabajo, se propone la adición de complejos de inclusión formados por β -ciclodextrina para la encapsulación de aceites esenciales en la elaboración de recubrimientos activos a base de almidón waxy. Estos complejos protegen los aceites de la degradación y permiten una liberación controlada de sus componentes. Los aceites esenciales, conocidos por sus propiedades antimicrobianas y antioxidantes, pueden prolongar la vida útil de los alimentos, buscando así la contribución de la sustentabilidad ambiental y el mejoramiento en la calidad en la frescura de los alimentos para el beneficio de los consumidores.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES Y FUNDAMENTO TEÓRICO.

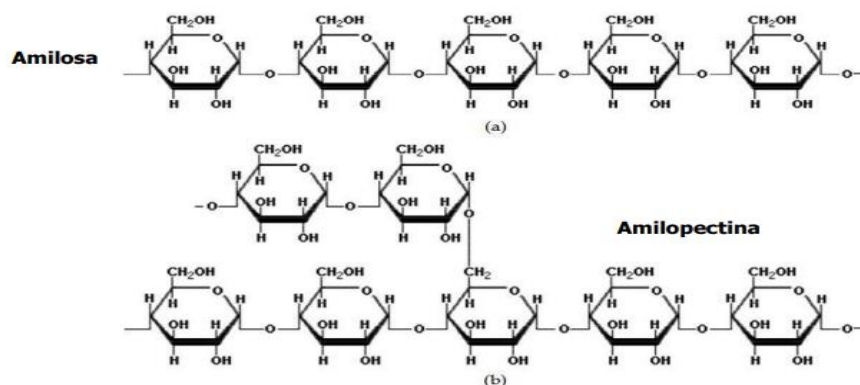
En el presente capítulo se expondrán los antecedentes y fundamento teórico que respaldan el presente trabajo de tesis de licenciatura. Aquí se observarán conceptos, definiciones, datos, imágenes; esto para dar un mejor entendimiento del objetivo de este documento.

Fundamento teórico

2.1 Almidón

Es el principal carbohidrato polimérico almacenado en cereales, tubérculos y raíces. Se encuentra en forma de partículas semicristalinas; está compuesto de amilosa y amilopectina. La amilosa tiene enlaces glicosídicos α -1,4 con una estructura lineal, mientras que la amilopectina, tiene enlaces glicosídicos α -1,6 y α -1,4 en forma ramificada como se muestra en la Figura 2.1 (Cui et al., 2021). Éstas comprenden entre el 98% y el 99% de la masa seca del almidón (Copeland et al., 2009). La proporción amilosa amilopectina varía de acuerdo con el tipo de almidón el cual puede ser regular (nativo), con alto contenido de amilosa y ceroso (WAXY)

Figura 2.1 Estructura de los componentes del almidón: amilosa y amilopectina.



Fuente: (Abhilash & Thomas, 2017).

La amilosa representa alrededor del 20~25% de la mayoría de los almidones granulares y es responsable de las propiedades filmógenas del almidón, mientras que la amilopectina comprende el ~75% (Hassan et al., 2018). Las diferencias de estructura y peso molecular entre la amilosa y la amilopectina conducen a diferencias en sus propiedades de formación de películas. La mayoría de los almidones son materiales semicristalinos que oscilan entre el 15 y el 45% de cristalinidad, dependiendo de la proporción de amilosa/amilopectina generalmente las regiones cristalinas están formadas por las cadenas ramificadas de la amilopectina, mientras que la amilosa y los puntos de ramificación de la amilopectina forman las regiones amorfas (Sinhmar et al., 2023).

Los niveles de amilosa y amilopectina son los principales componentes que afectan la calidad de los alimentos que contienen almidón. Esto se debe a que la amilosa y la amilopectina desempeñan un papel en la retrogradación, gelatinización y características funcionales del almidón. Las películas a base de almidón con mayores compuestos de amilosa generalmente tienen mejores características de película, como elongación, resistencia mecánica y propiedades de barrera a los gases. Esto se debe a que la amilopectina retrograda más lentamente que la amilosa (Chang et al., 2021), lo que se debe a

la naturaleza ramificada de la molécula de amilopectina. La retrogradación ocurre cuando las cadenas de amilosa y amilopectina disociadas en una dispersión de almidón gelatinizado se vuelven a asociar para formar una estructura más ordenada (C. Chen & Zhu, 2024). Este proceso afecta la solubilidad, permeabilidad y propiedades mecánicas de las películas de almidón. La retrogradación más rápida del almidón se produce con el aumento de la concentración de almidón en la solución, el aumento del contenido de amilosa, el aumento de la longitud de la cadena de amilopectina y el almacenamiento congelado de la solución de almidón (Rahmadi Putri et al., 2023).

La Tabla 2.1 muestra el contenido en amilosa y amilopectina para diferentes tipos de almidón, así como otras propiedades.

Tabla 2.1 Las características del almidón.

Almidón	Tipo	Forma	Tamaño (μm)	Contenido de Amilosa (%)	Contenido de Amilopectina (%)	Viscosidad Máxima (cP)	Temperatura de retrogradación (°C)
Cebada	Cereal	Lenticular (tipo a) esférica (tipo b)	15-25 2-5	~28	~72	2200-2700	45-65
Maíz (ceroso)	Cereal	Esférica	2-30	~0	~100	3000-3500	60-70
Maíz (normal)	Cereal	Poliédrico	2-30	~27	~73	2500-3000	55-70
Maíz (alto en Amilosa)	Cereal	Irregular	2-30	50-75	25-50	1500-2000	70-90
Guisante	Legumbre	Ovalado	5-50	~25	~75	1800-2300	45-55
Papa	Tubérculo	Lenticular	5-100	~21	~79	4000-5000	50-60
Arroz	Cereal	Poliédrico	3-8	0-30	70-100	1500-2000	50-70
Tapioca	Raíz	Esférica	5-45	~17	~83	3000-3500	40-55
Sagú	Cereal	Oval	15-35	~25	~75	2800-3200	50-60
Trigo	Cereal	Lenticular (tipo a) esférica (tipo b)	>10 2-10	~28	~72	2000-2500	45-65
Centeno	Cereal	Lenticular	>62.5	~23	~77	2300-2800	45-55
Mandioca	Raíz	Redondo	5-35	8~28	72-92	2800-3200	40-55

Fuentes: (Hoover, 2021; Junejo et al., 2022; Singh et al., 2010; Tester & Morrison, 1988).

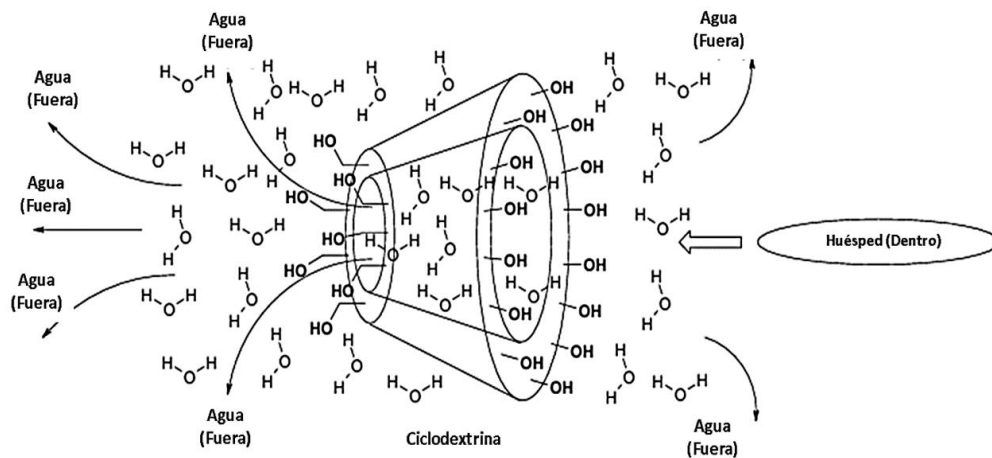
2.2 Complejos de inclusión

Las ciclodextrinas (CD) tienen la capacidad de formar complejos de inclusión actuando como una molécula anfitrión y encapsulando una variedad de moléculas huéspedes, compuestas por sólidos, líquidos y gases, como: alifáticos de cadena lineal o ramificada, aldehídos, cetonas, alcoholes, ácidos orgánicos, ácidos grasos, compuestos aromáticos como aceites esenciales y compuestos polares como halógenos y aminas (Paiva-Santos et al., 2022).

Las CD tienen una forma troncocónica debido a las unidades de glucopiranosas como se observa en la Figura 2.2 por lo cual, los grupos hidroxilo secundarios quedan alineados a la abertura más ancha, mientras que los hidroxilos primarios hacia la abertura más estrecha, haciendo que la parte externa de las ciclodextrinas sea hidrofílica. En el interior de las cavidades los hidrógenos y oxígenos que participan en el enlace glucosídico se alinean, dando un ambiente hidrofóbico (Velázquez-Contreras et al., 2022).

Tanto en solución como en estado sólido, dentro de la cavidad de las ciclodextrinas se encuentra moléculas de agua: las cuales, pueden ser fácilmente remplazadas por moléculas huéspedes que presenten interacciones favorables entre la ciclodextrina y el huésped. Las interacciones CD-huésped suelen ser no covalentes como: interacciones hidrofóbicas, disminución de la tensión conformacional, enlaces hidrógeno, interacciones electrostáticas o fuerzas de Van der Waals (Cid-Samamed et al., 2022). Es importante considerar que la principal fuerza que hace que se lleve a cabo la formación del complejo es el reemplazo de las moléculas de agua (interacción poco favorable, alta entalpía) por unas moléculas de menor polaridad (interacción apolar-apolar).

Figura 2.2 Mecanismo esquemático del proceso de encapsulación molecular.



Fuente: (Hădărugă et al., 2019).

2.2.1 Aceites esenciales

Los aceites esenciales pueden definirse como mezclas de compuestos orgánicos volátiles aromáticos, son conocidas por sus beneficios potenciales para la salud humana debido a sus propiedades biológicas como anticancerígenas, antiinflamatorias, antidiabéticas, antiulcerogénicas, antidepresivas, ansiolíticas, incluidas las antioxidantes, antimicrobianas y por sus propiedades organolépticas. Así, los aceites esenciales por sus siglas en inglés EO (Essential Oil) son productos naturales obtenidos a partir de materiales vegetales (Ribeiro-Santos et al., 2017).

Figura 2.3 Aceites esenciales.



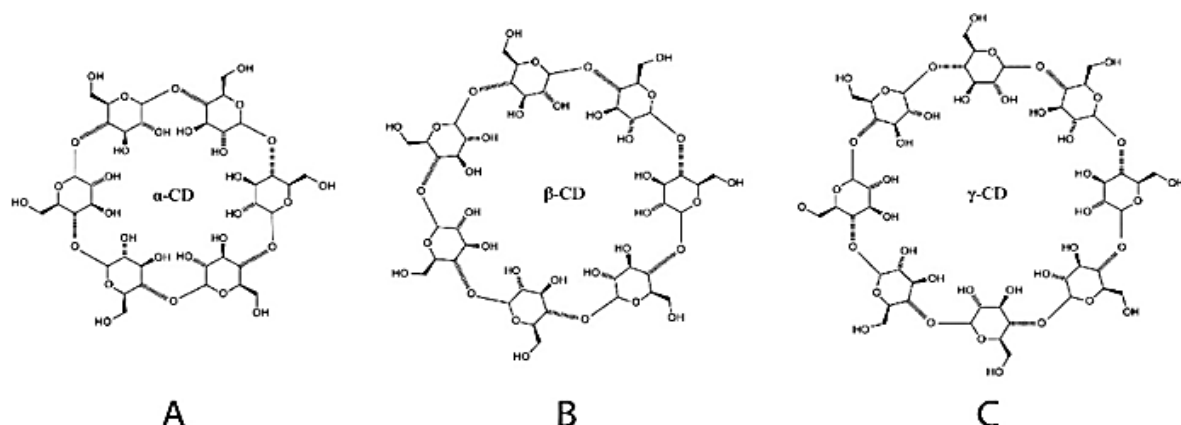
Fuente: (Cari Nierenberg, 2015).

La composición de los EO depende de la parte de la planta que se utilice para la extracción: flores, frutos enteros, corteza, partes verdes (hojas y tallos), pericarpio, semillas o raíces, como se observa en la Figura 2.3. En general, los EO están compuestos por diversos componentes, como fenoles, aldehídos, cetonas, terpenos, carbohidratos, éteres y alcoholes, que son responsables de sus destacadas actividades biológicas. Entre todos estos componentes, los terpenos son los más predominantes. Otros ejemplos de abundantes componentes de aceites esenciales son el eugenol, la vainillina, el cinamaldehído, el eucaliptol, el geraniol, el carvacrol y la capsaicina (Vianna et al., 2021).

2.2.2 Ciclodextrinas

Las ciclodextrinas (CD) son oligosacáridos cíclicos ligados a α -1,4 obtenidos de la reacción intermolecular en ausencia de agua (H_2O) a partir de la degradación enzimática del almidón con forma troncocónica. Las variedades de CD naturales incluyen al menos seis unidades de glucosa. La Figura 2.4 muestra las que presentan seis unidades de glucosa (α -CD), siete (β -CD) y ocho unidades (γ -CD). Estos compuestos, ciclodextrinas α -, β - y γ -CDs son "generalmente reconocidos como seguros" por la Administración de Alimentos y Medicamentos (FDA, EE.UU.) (Cid-Samamed et al., 2022)

Figura 2.4 Representación esquemática de la forma geométrica de las CD y su representación esquemática de la forma geométrica y sus estructuras químicas para (A) α -CD, (B) β -CD y (C) γ -CD.



Fuente: (Velázquez-Contreras et al., 2022).

2.2.3 Aspectos químicos y físicos de las CDs

Las ciclodextrinas α -ciclodextrinas, β -ciclodextrinas y γ -ciclodextrinas, exhiben propiedades de complejación y catalíticas, actuando como imitadores enzimáticos. Las CDs son de naturaleza cristalina, no higroscópicas, con una cavidad hidrófoba en el interior y una hidrofílica en el exterior. La cavidad hidrofóbica permite interactuar a las ciclodextrinas con moléculas huésped no polares o menos polares (que el agua). La selectividad de las moléculas huésped varía según el tamaño de la cavidad en la que se alojan las ciclodextrinas (Sharma & Baldi, 2016). Al encapsular las moléculas huésped dentro de su estructura troncocónica, la ciclodextrina puede cambiar sus características químicas y físicas, algunas de sus propiedades se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Principales propiedades físicas y químicas de α -, β - y γ -CDs.

Propiedades	α – CDs	β – CDs	γ – CDs
Número de unidades de glucosa	6	7	8
Peso molecular (g/mol)	972	1135	1297
Punto de fusión (°C)	275	280	275
Solubilidad en agua a 25 °C (p/v)	14.5	1.9	23.2
Entalpía; H (KJ/mol)	32.1	34.7	32.3
Entropía; S (J/Kmol)	57.7	48.9	61.4
Diámetro de la cavidad (Å)	4.7~5.3	6~6.5	7.5~8.3
Diámetro externo (Å)	14.6	15.4	17.5
Volumen aproximado de la cavidad (Å ³)	174	262	427
Formas cristalinas (desde agua)	Placas hexagonales	Paralelogramos monoclinicos	Prismas cuadrados

Fuente: (Velázquez-Contreras et al., 2022).

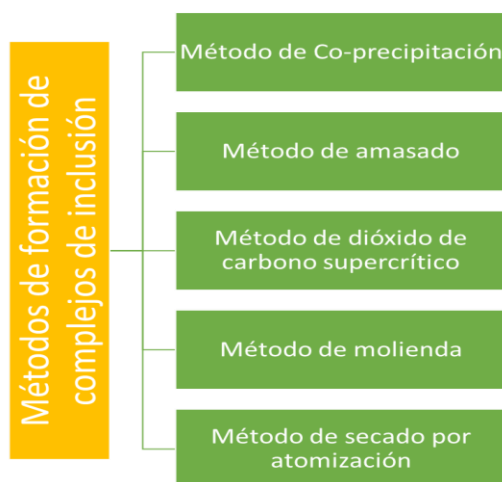
Las ciclodextrinas son escasamente solubles en soluciones acuosas debido a la fuerte unión relativa entre las moléculas en el estado cristalino, aunque su solubilidad aumenta con la temperatura. La deformación de los anillos, la orientación y los grupos hidroxilo de las unidades de glucosa adyacentes también son otros factores que afectan la solubilidad de las ciclodextrinas. Por lo tanto, las γ -CD son más solubles que los α -y β -CD, mientras que las β -CD son poco solubles entre éstos (Szejtli, 1998).

Los grupos hidroxilo en la ciclodextrina pueden sustituirse por fracciones hidrofóbicas para aumentar su solubilidad acuosa. En la actualidad, los derivados de la ciclodextrina modificados, química o enzimáticamente, como el hidroxipropilb-CD (HP b-CD), el hidroxietil-b-CD (HE-b-CD), el 2,6-dimetilb-CD (DIM-b-CD), el 2,3,6 trimetilb-CD (TRIM-b-CD), la ciclodextrina reticulada con epiclorhidrina (EPC-b-CD), etc., han demostrado su funcionalidad en diversas aplicaciones (H. M. C. Marques, 2010). Sin embargo, los CD modificados conservan las mismas características funcionales que las ciclodextrinas originales.

2.3 Técnicas de elaboración de complejos de inclusión

El método de preparación para la obtención de complejos de inclusión tiene un papel importante porque afecta el rendimiento y las características. Existe una gran variedad de métodos para preparar ciclodextrinas-complejos inclusión, tales como se muestra en la Figura 2.5

Figura 2.5 Métodos de obtención de IC.



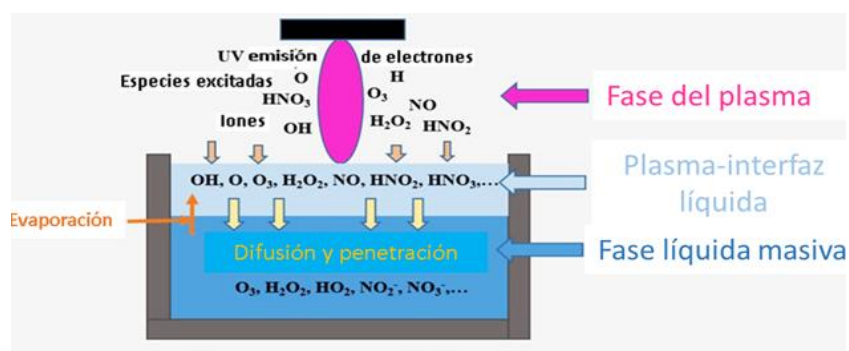
Fuente: (Cid-Samamed et al., 2022).

Las tecnologías de procesamiento convencionales y emergentes que pueden implicar diferentes niveles de enfriamiento y calentamiento, fuerzas físicas como el cizallamiento y la presión y la exposición a corrientes eléctricas de bajo a alto voltaje, radiación u ondas. Entre las tecnologías emergentes, el procesamiento por ultrasonidos y plasma es una tecnología muy prometedora con una alta tasa de penetración para aplicaciones alimentarias y no alimentarias.

2.3.1 Plasma frío.

Chizoba Ekezie et al., (2017) describe al plasma como un flujo de gases que entra en contacto con un campo eléctrico, generando especies iónicas reactivas como electrones, iones positivos y negativos, radicales libres, moléculas de gas y fotones; estas especies de iones reactivos se conocen colectivamente como plasma y también se conocen como el cuarto estado de la materia. La tecnología de plasma es el uso de gas ionizado en la esterilización no térmica. El principio se basa en la ionización parcial de iones positivos y negativos, radicales libres, partículas cargadas en forma de electrones y fotones, y moléculas que contienen gas como se observa en la Figura 2.6 La energía aplicada puede ser de cualquier forma: térmica, radical, mecánica o nuclear (Pipliya et al., 2023).

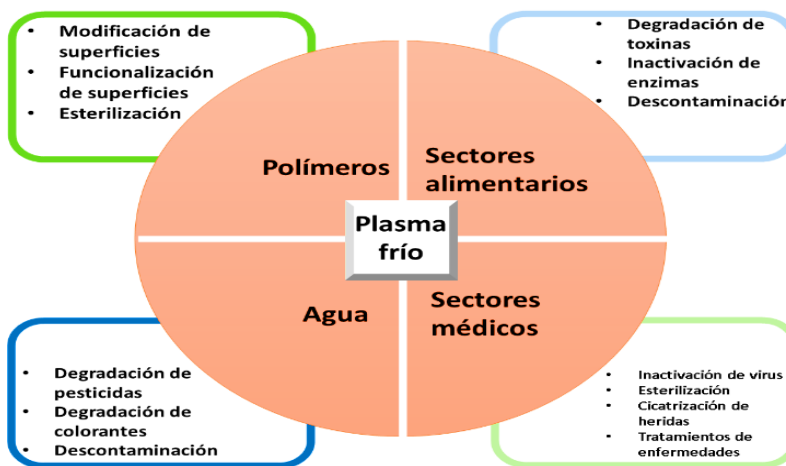
Figura 2.6 Representación esquemática de especies de vida corta y larga generadas por plasma en la fase gaseosa.



Fuente: (Kumar et al., 2021).

Hage et al., (2022) describen las aplicaciones que ofrece el uso del plasma frío. Gracias a la baja capacidad calorífica del plasma frío, su eficiencia en costos de producción y la diversidad de sus aplicaciones, prevalece un interés muy alto por la tecnología del plasma. La Figura 2.7 ilustra las principales aplicaciones del plasma frío.

Figura 2.7 Las principales aplicaciones del plasma frío.



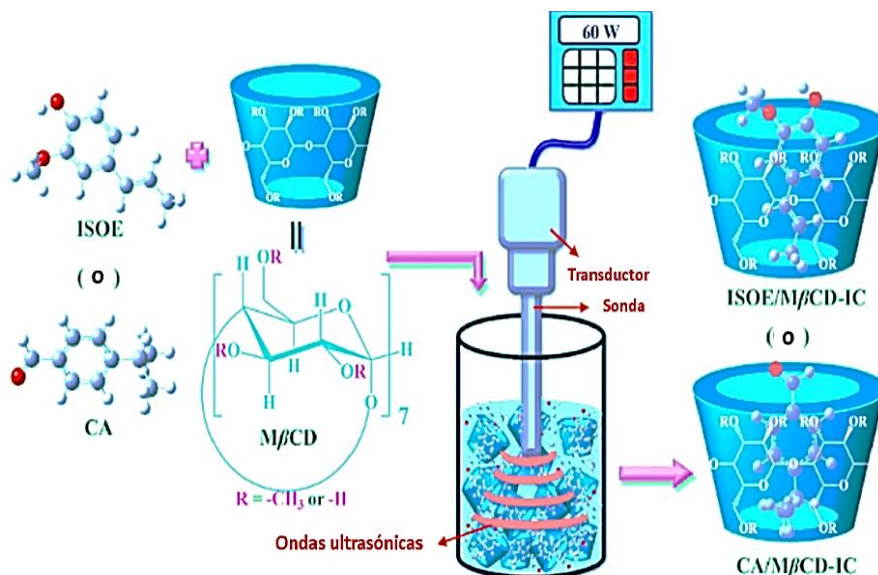
Fuente: (Hage et al., 2022)

2.3.2 Ultrasonido

El ultrasonido induce una serie de compresiones y expansiones en las moléculas a través del medio empleado, como se observa en la Figura 2.8. Estos cambios de presión alternos provocan la formación y, en última instancia, el colapso de burbujas en un medio líquido. Este fenómeno de creación, expansión y colapso implosivo de microburbujas en líquidos irradiados con ultrasonidos se conoce como "cavitación acústica". Las burbujas de cavitación formadas se dividen aproximadamente en dos tipos, a saber, cavitación transitoria (inercial) y cavitación estable (no inercial). Las cavidades estables son burbujas de gas de vida relativamente larga y existen durante muchos ciclos de compresión y expansión (Piyasena et al., 2003). Las burbujas de cavitación transitoria o cavitación inercial existen durante un período muy corto, a veces menos de un ciclo, y colapsan violentamente.

Los cambios de temperatura y presión que se producen a partir de estas implosiones provocan disrupción por cizallamiento, adelgazamiento de las membranas y disrupción celulares, la implosión de las burbujas habitantes también genera turbulencias a nivel microscópico, colisiones entre partículas a alta velocidad y agitación, lo que acelera su difusión (Tiwari, 2015).

Figura 2.8 Ilustración esquemática de la formación de IC procesada por ultrasonidos de EOC con M β CD.



Fuente: (Siva et al., 2020).

Antecedentes

2.4 Empaques activos de alimentos

El empaque activo además de servir de protección a los alimentos está diseñado para interactuar activamente, prolongando la vida útil, manteniendo o mejorando las propiedades de los alimentos empaquetados. Dependiendo de los materiales que se utilicen, los empaques activos están diseñados para liberar o absorber las sustancias de los alimentos envasados responsables de su deterioro. Las sustancias responsables de la función activa del envase pueden estar en un recipiente separado o integrarse directamente en el empaque (Ribeiro-Santos et al., 2017). La Tabla 2.3 muestra las ventajas y desventajas del uso de biomateriales como el quitosano, pululan y almidón en la elaboración de películas.

Tabla 2.3 Ventajas y desventajas del uso de biopolímeros habituales.

Tipo de biopolímero	Ventajas	Desventajas
Películas a base de celulosa	Insípido, inodoro, resistente al aceite y a la grasa, de naturaleza hidrófila; estabilidad térmica y química	Apenas se disuelve o se funde debido a la alta cristalinidad
Películas a base de almidón	Inodoro, insípido, buenas propiedades de barrera contra el O ₂ y el CO ₂	Barrera de vapor de agua deficiente
Películas a base de pululan	Altamente impermeable tanto al aceite como al oxígeno	Baja solubilidad Naturaleza hidrofílica
Películas a base de quitina y quitosano	Buenas propiedades de barrera al CO ₂ , actividad antimicrobiana	Actividad no antioxidante y antifúngica; Impedimento limitado de oxígeno y agua
Películas a base de gelatina	Propiedades de blindaje	Baja permeabilidad al vapor de agua
Películas a base de pectina	Excelente capacidad de bloqueo de oxígeno	Alta permeabilidad al vapor de agua
Películas a base de alginato	Buena solubilidad en agua, capacidad de gel y propiedades formadoras de película	Poca resistencia al agua

Fuente: (Vrinceanu et al., 2022).

Diversos estudios respaldan la efectividad de estos empaques activos, do Evangelho et al., (2019) evaluaron las propiedades ópticas, mecánicas y de barrera en películas de almidón de maíz que contenía aceite esencial de naranja, demostrando que el aceite esencial de naranja (EO) mejoró significativamente la actividad antibacteriana contra *Staphylococcus aureus* y *Listeria monocytogenes*. Por otro lado Y. Shen et al., (2021) prepararon y caracterizaron nano emulsiones y emulsiones pickering cargadas con aceite esencial de clavo, las cuales fueron incorporadas en una película comestible a base de pullulan-gelatina, demostrando la compatibilidad entre el pullulan-gelatina y las nano emulsiones cargadas con aceite esencial de clavo, Kadam et al., (2021) estudiaron el efecto de la adición de extracto de agujas de pino (*CEDRUS deodora*) en películas antioxidantes a base de quitosano para aplicaciones de envasados activos de alimentos, demostrando que la adición

de extracto de agujas de pino (EAP) en concentraciones del 5%, 10% y 20% (v/p) mejoró significativamente las propiedades antioxidantes de las películas, redujo la permeabilidad al oxígeno y al vapor de agua con el aumento de la concentración de EAP.

El uso de aceites esenciales es relevante en el desarrollo de empaques activos. Los aceites esenciales (EO), procedentes de plantas aromáticas, han demostrado beneficios en la alimentación y en la salud humana. Ya que tiene diferentes propiedades biológicas como antioxidantes, antimicrobianas, antitumorales, analgésicas, insecticidas, antidiabéticas y antiinflamatorias (Costa et al., 2015; Ribeiro-Santos et al., 2015).

2.5 Recubrimientos activos

Los recubrimientos se forman sobre la superficie del alimento, actuando como barrera protectora. Para constituir una matriz continua se han utilizado macromoléculas naturales con propiedades filmógenas, como proteínas, lípidos y polisacáridos (Kupervaser et al., 2023).

Para la aplicación comercial, son necesarios estudios particulares para identificar los mecanismos formadores de recubrimientos y aplicar el proceso adecuado para optimizar las propiedades funcionales de los materiales. Llevando a cabo estudios para analizar la viabilidad comercial, incluidas evaluaciones de nuevos procesos, análisis de seguridad y toxicidad, evaluaciones regulatorias y estudios de consumidores, por ello en la Tabla 2.4 presenta empresas enfocadas a los recubrimientos comestibles comerciales.

Tabla 2.4 Empresas comerciales en la fabricación de recubrimientos.

Empresa	Área de especialización
NaturalSeal	Recubrimientos para productos perecederos
Nagase America	Recubrimientos comestibles desde alimentos frescos a productos horneados
Avebe	Recubrimientos comestibles a base de almidón
Ingredion	Desarrolla recubrimientos comestibles a base de almidones y gomas para mejorar la seguridad de los alimentos
Dupont	Ofrece recubrimientos comestibles con protección a la humedad, microorganismos y la oxidación de los alimentos

Fuentes: (AgriCoat NatureSeal, n.d.; Nagase America, n.d.; Avebe, n.d.; Ingredion, n.d.; y Dupont, n.d.).

En los últimos años, muchos estudios de investigación se han centrado en la aplicación de recubrimientos activos para alimentos en una amplia variedad de sistemas alimenticios reales con el objetivo de estudiar su efecto antioxidante y antibacteriano.

La eficacia general de los recubrimientos como protectores contra la oxidación depende no solo de su capacidad antioxidante química, sino también de sus propiedades de barrera de oxígeno y humedad. Como se comentó anteriormente, la incorporación de aceites esenciales en una matriz polimérica puede tener importantes consecuencias en la estructura final de la película emulsionada, afectando sus propiedades de barrera y su afectividad antioxidante (Atarés & Chiralt, 2016).

Para evaluar la capacidad real de las películas y recubrimientos comestibles para mejorar la vida útil de productos alimenticios propensos a la oxidación, se han utilizado sistemas alimenticios modelo y reales. Estos estudios han abordado la aplicación de películas o recubrimientos potencialmente antioxidantes que incluyen aceites esenciales en una amplia variedad de sistemas alimenticios, como carne, pescado, frutas, verduras y frutos secos.

Venkatachalam & Lekjing, (2020) evaluaron la efectividad de películas comestibles a base de quitosano con aceite esencial de clavo y nisina, ya sea individualmente o en combinación, para mejorar la calidad y vida útil de hamburguesas de cerdo almacenadas en frío. Se observaron cambios graduales en las propiedades de calidad, como luminosidad (valor L^*), coloración amarilla (valor b^*), pH, contenido de meta mioglobina (MetMb), ácidos grasos libres (FFA), índice de peróxidos (PV), sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS), recuento microbiológico (TVC, psicotrofos, Enterobacteriácea, LAB) y puntuaciones sensoriales (parte roja no descolorida, decoloración, olor anormal). Las hamburguesas de cerdo tratadas con CS-CO-NI presentaron cambios mínimos, mostrando que la combinación fue efectiva para preservar la calidad y prolongar la vida útil.

Das et al., (2020) evaluaron la efectividad de un recubrimiento comestible a base de nano emulsión de aceite esencial de *Citrus Sinensis* y alginato de sodio para controlar patógenos transmebn tomates y mejorar su calidad. El estudio reveló que la formulación de nano emulsión con un tamaño de partícula de 43.23 nm. Mostro buena estabilidad y un alto índice de blancura favoreciendo en la comercialización. Los estudios antibacterianos y antibiofilm revelaron que la nano emulsión erradicó efectivamente tanto las formas sésiles como planctónicas de Salmonella y Listeria en condiciones de cultivo de una y múltiples especies, mejoro significativamente la firmeza hasta en un 33%, disminuyeron las bacterias mesofílicas totales incluyendo Salmonella y Listeria, y redujeron la pérdida de peso hasta 3 veces menos que los no recubiertos. El análisis sensorial reveló que el uso del recubrimiento comestible aumentó las puntuaciones de aceptación total de los tomates.

2.6 Materiales usados en la formación de recubrimientos activos.

Los recubrimientos activos se forman a partir de diversas matrices biopoliméricas y aditivos que mejoran sus propiedades funcionales. Los componentes principales utilizados en recubrimientos son hidrocoloides y lípidos, como se muestra en la Figura 2.9 Los hidrocoloides están compuestos por polímeros hidrofílicos y son grandes compuestos (Senturk Parreidt et al., 2018), incluyen proteínas (colágeno, gelatina, gluten, proteína de frijol mungo, zeína de maíz, proteína de soja y/o caseína), y polisacáridos (almidón, celulosa y sus derivados, pectina, quitosano, alginato, carragenano, pululan y goma) (Kupervaser et al., 2023) los recubrimientos hidrocoloides son de gran interés debido a sus deseables propiedades de barrera al gas/humedad y buenas características mecánicas (Devi et al., 2024).

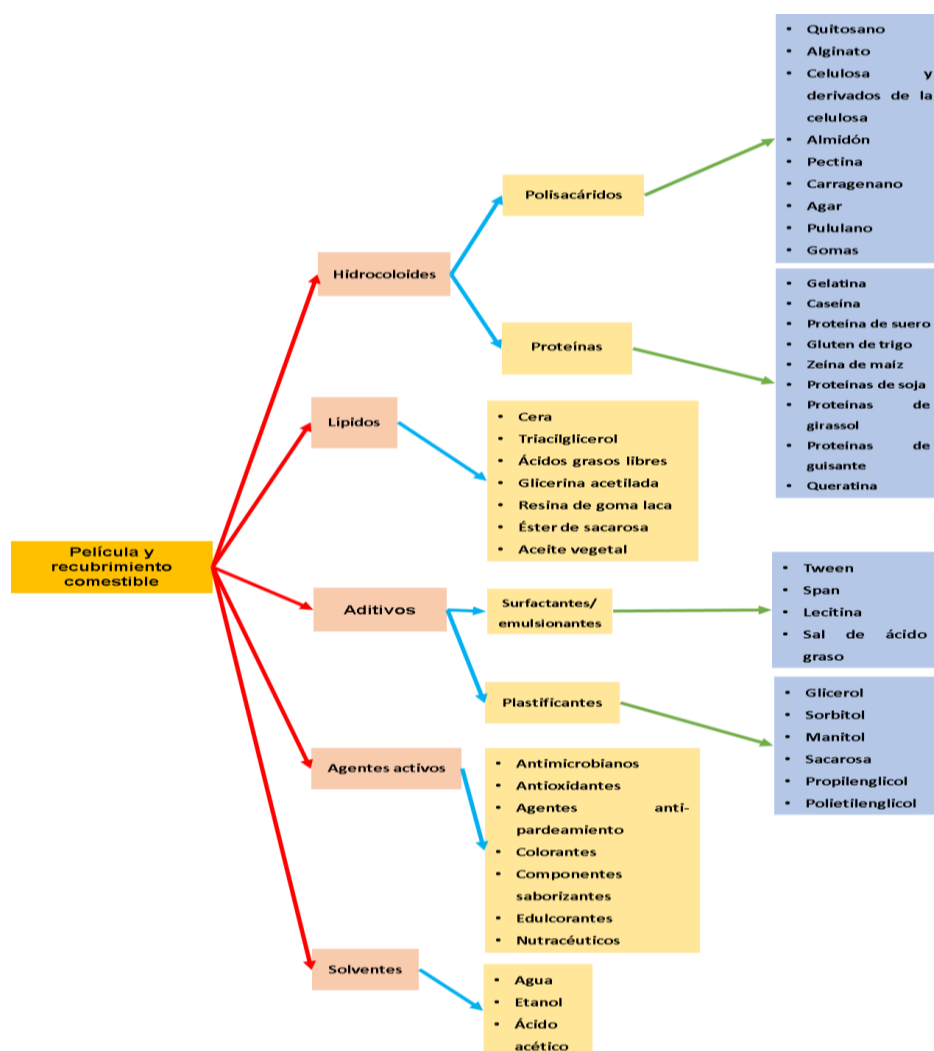
Por otro lado, los lípidos (cera triacilglicerol, ácidos grasos libres, glicerina acetilada, resina de goma laca, éster de sacarosa y aceite vegetal) son sustancias orgánicas que provienen de organismos vivos, incluyendo plantas, animales e insectos. Sin embargo, en su mayoría son insolubles o apenas solubles en agua, pero solubles en unos pocos solventes orgánicos específicos como metanol, hexano, éter etílico, benceno y cloroformo, y requieren altas temperaturas para su procesamiento (Akoh & Min, 2002).

Para el desarrollo de los recubrimientos se incorporan frecuentemente plastificantes en la solución a base de hidrocoloides para descomponer la estructura tridimensional de los polímeros, mientras que los emulsionantes se utilizan en soluciones de hidrocoloides y lípidos para mejorar las propiedades físicas. Los principales plastificantes aptos para alimentos son glicerol, sorbitol, manitol, sacarosa, propilenglicol y polietilenglicol (Shahidi & Hossain, 2022).

Además, los recubrimientos pueden contener numerosos agentes activos para mejorar la calidad y la seguridad de los alimentos. Por ejemplo, los agentes antimicrobianos se incorporan para controlar el deterioro y las bacterias patógenas. Estos antimicrobianos pueden clasificarse en varias categorías, como ácidos orgánicos, ésteres de ácidos grasos, polipéptidos, compuestos fenólicos, nitritos, sulfitos y aceites esenciales (Shahidi & Hossain, 2022).

Los agentes activos más empleados son los aceites esenciales (canela, orégano, clavo, tomillo, etc.). Son compuestos que no actúan sobre el medio, sino que actúan principalmente sobre las células bacterianas de los microorganismos, dañando la membrana y desnaturalizando las proteínas de ésta. Esto ocasiona una alteración del medio interno de las células de los microorganismos y las mata o invalida, evitando el momento de crecimiento exponencial que poseen los microorganismos (Rojas et al., 2012)

Figura 2.9 Componentes de películas y recubrimientos comestibles.



Fuente: (Shahidi & Hossain, 2022).

Para que el aceite esencial pueda lograr su objetivo, es necesario estabilizarlo, solubilizarlo y liberarlo. Una vía adecuada para lograrlo es mediante la tecnología de encapsulación, permitiendo la inclusión del aceite esencial (agente activo) dentro de otra (agente encapsulante), obteniendo pequeñas partículas, que liberan su contenido a velocidades controladas, durante periodos de tiempo prolongados bajo condiciones específicas

El encapsulado también mejora la compatibilidad del agente antimicrobiano con el biopolímero a emplear, al aumentar su solubilidad. En consecuencia, se han desarrollado diferentes sistemas de encapsulación de compuestos bioactivos, que utilizan liposomas, emulsiones, nanopartículas, microcápsulas y ciclodextrinas, siendo esta última ampliamente investigada por su capacidad para mejorar la solubilidad y estabilidad, cuyos desarrollos se han aplicado en el sector alimentario (Shishir et al., 2018).

Por ejemplo, Phan et al., (2024) prepararon y caracterizaron dos complejos de inclusión combinando aceite esencial de canela (CEO) y aceite esencial de hierba de limón (LEO) con β -ciclodextrina (β -CD), Estos ICs extendieron la vida útil de los mangos en un 40% y 25% respectivamente, y redujeron significativamente la aparición de manchas negras en la piel de la fruta. Además, el IC CEO- β -CD a una dosis de 2.5 mg por gramo de mango mejoró notablemente la calidad general de la fruta.

Por otro lado Qin et al., (2024) investigaron las propiedades de un recubrimiento de nano fibras que incorpora un complejo de inclusión aceite esencial de *Zanthoxylum bungeanum* y β -ciclodextrina (ZBEO- β -CD-IC) y su función en la preservación de mangos. El aumento del contenido de ZBEO- β -CD-IC en el recubrimiento de nano fibras disminuyó la porosidad y las permeabilidades al vapor de agua y al oxígeno, mientras que incrementó las actividades antioxidantes. Durante el almacenamiento, el aumento del contenido de ZBEO- β -CD-IC en el recubrimiento redujo la pérdida de peso y la tasa de respiración, y retrasó el ablandamiento del tejido y el amarillamiento de la cáscara.

2.6.1 Plastificantes

Las extensas interacciones entre las cadenas del biopolímero pueden conducir a una estructura rígida y fragilidad, que puede resolverse incorporando plastificantes en sus formulaciones. Los plastificantes son sustancias transparentes e inodoras, y suelen utilizarse para aumentar la flexibilidad y la elasticidad de las películas, debido a las interacciones polímero-plastificante, evitando el carácter quebradizo. Existen muchos plastificantes de calidad alimentaria con diferentes efectos sobre las propiedades de la película, como polioles (sorbitol, glicerol y manitol), glicoles (etilenglicol, propilenglicol y polietilenglicol), azúcares (manosa, glucosa y fructosa).

Los plastificantes disminuyen la resistencia a la tracción (TS) y aumentan el alargamiento a la rotura (EB) de la película, lo que, a su vez, se traduce en una mejora en la flexibilidad, extensibilidad y dispensabilidad de la película. La TS representa la resistencia de la película a las fuerzas de tensión, mientras que el EB determina su capacidad de estiramiento, indicando flexibilidad. El módulo de elasticidad también puede ser un parámetro de evaluación interesante, ya que proporciona valores cuantitativos de la rigidez de la película. Esta mejora en las propiedades físicas y mecánicas del material de recubrimiento también afecta la permeabilidad al vapor de agua, la permeabilidad al oxígeno y la permeabilidad a los solutos (Ribeiro et al., 2021).

El glicerol es más común para producir películas a base de almidón debido a su compatibilidad con la amilosa, que resulta en mejores propiedades mecánicas. Esto se debe a que el glicerol interferirá con el empaquetamiento de amilosa al reducir las fuerzas entre las moléculas de almidón (González-Torres et al., 2021).

Farahnaky et al., (2013) investigaron el efecto del glicerol en películas comestibles de almidón de trigo. Encontraron que la adición de glicerol aumentó la solubilidad, la luminosidad y la absorción de agua de las películas a 25°C. Las películas con 20% y 30% de glicerol mostraron menor permeabilidad al vapor de agua. Sin embargo, las propiedades mecánicas como la resistencia a la rotura y el módulo de Young disminuyeron, mientras que la elongación aumentó con concentraciones más altas de glicerol y niveles de humedad relativa.

Cerqueira et al., (2012) exploraron el impacto del glicerol y el aceite de maíz en las propiedades fisicoquímicas de películas de polisacáridos. prepararon soluciones formadoras de películas con diferentes concentraciones de glicerol y aceite de maíz. Los resultados indicaron que la adición de glicerol provocó cambios en la estructura de las películas de polisacáridos, afectando su afinidad por el agua y sus propiedades generales. La presencia de glicerol resultó en una estructura más hidrofílica en las películas.

Alves et al., (2007) investigaron el efecto del glicerol y el enriquecimiento con amilosa en las propiedades de las películas de almidón de yuca. Evaluaron diferentes cantidades de glicerol y amilosa en soluciones filmogénicas y produjeron películas por colado. Mostrando que el enriquecimiento con amilosa hizo las películas más fuertes y permeables, mientras que el glicerol actuó como plastificante, aumentando la permeabilidad al vapor de agua y la deformación, pero disminuyendo la resistencia y el módulo de Young. Con 25 g de amilosa/100 g de almidón y 32.5 g de glicerol/100 g de almidón, la resistencia a la rotura aumentó de 2.2 a 7.0 MPa, el módulo de Young de 0.7 a 8.6 MPa y la resistencia al punzonamiento de 7.4 a 10.1 N.

2.6.2 Proteínas

Las proteínas son polímeros lineales contruidos a partir de un máximo de 20 aminoácidos diferentes unidos entre sí por enlaces peptídicos. Los aminoácidos están formados por un carbono central unido a grupos amino carboxilo, hidrógeno y grupos **R**. Las proteínas son compuestos que pueden existir de forma natural en forma de proteínas fibrosas o globulares, y presentan una amplia gama de propiedades funcionales que puedan ser modificadas por diversos métodos. Estos materiales a base de proteínas son biodegradables y se utilizan para preparar recubrimientos.

Los recubrimientos a base de proteínas tienen buenas propiedades mecánicas y son excelentes barrera contra el transporte de oxígeno (O₂), dióxido de carbono (CO₂), compuestos aromáticos y lípidos. Sin embargo, poseen una alta permeabilidad al vapor de agua (Wu et al., 2024).

2.6.3 Polisacáridos

Los polisacáridos son compuestos naturales, que forman recubrimientos incoloros, resistentes y flexibles, con alta solubilidad, resistencia a la tracción y alargamiento. Los recubrimientos a base de polisacáridos protegen los alimentos al reducir la pérdida de humedad, el oscurecimiento de la superficie y la oxidación exhibiendo una buena propiedad de barrera contra gases, debido a su estructura ordenada por enlaces de hidrógeno. La principal desventaja de este tipo de películas es su ineficacia como barreras contra la humedad que se relaciona con su naturaleza hidrofílica (Ribeiro et al., 2021).. Una gran variedad de polisacáridos y sus derivados han sido probados por su uso potencial como recubrimientos, debido a su gran disponibilidad, bajo costo y fácil manejo. Los principales polisacáridos de interés han sido quitosano, celulosa, gomas y almidón, siendo este último el polisacárido natural más utilizado (Choudhury et al., 2022).

CAPÍTULO 3.

METODOLOGÍA

En este capítulo se describen los materiales ocupados durante la etapa experimental del proyecto; de igual forma se describen los métodos empleados para realizar la formación de los complejos de inclusión (IC) por los métodos de plasma frío y ultrasonido, la elaboración de películas de almidón adicionadas con los complejos de inclusión y su aplicación como recubrimientos en alimentos perecederos. Se describen las técnicas de caracterización por las que se analizaron las FT-IR, TGA, DSC, RAYOS-X, SEM, Pruebas de permeabilidad y pruebas de funcionalidad con el propósito de cumplir los objetivos planteados.

3.1 Materiales

La β -Ciclodextrina (lote C4767-100g, pureza 97%) se adquirió de Sigma-Aldrich Corp (Saint Louis, MO, EE. UU.) El almidón waxy (99% amilopectina) se compró de National Starch (Toluca, Mexico). Los aceites esenciales de naranja y de clavo se compraron de Hersol, S.A. de C.V. (Estado de México). Para todas las pruebas se utilizó, agua destilada y glicerol de grado analítico. Se compraron plátanos y champiñones en un supermercado local (Saltillo, México).

3.2 Preparación de los complejos de inclusión por plasma

Los complejos de inclusión (IC) por plasma frío se prepararon a una relación 2:1 de β -CD con aceite esencial de naranja (EO-Or) y clavo (EO-Cl).

Para ello se mezclaron la β -CD (20g), agua destilada (70mL) y aceite esencial de naranja (1.92 g) o clavo (1.81 g). Ambas soluciones se agitaron magnéticamente por 10 minutos en el equipo IKA®C-MAG HS 4 (Wilmington, EE.UU.). Posteriormente, en cada solución se introdujo la punta del plasma jet atmosférico y se trataron por 15 minutos con un voltaje de 35 W. Las muestras se dejaron en reposo durante 24 horas a 2 °C. Las muestras se filtraron por vacío como se muestra en la Figura 3.1 y el sedimento se secó por 24 horas a 55°C en una estufa LAB-LINE® DUO-VAC OVEN (Kochi, India). Finalmente, los IC de naranja (IC-POr) y clavo (IC-PCl) se molieron y almacenaron en bolsas ziploc.

Figura 3.1 Formación de complejo de inclusión por plasma: a) agitación magnética, b) equipo de plasma y c) filtración a vacío de IC.



Elaboración propia García. (2024).

3.3 Preparación de los complejos de inclusión por ultrasonido.

Se utilizó la misma relación estequiométrica 2:1 que en el proceso de formación de los IC por plasma frío. Para la formación de los IC por ultrasonido se prepararon dos soluciones. En la primera se mezclaron 20 g de β -CD con 100 mL de agua destilada y se agitó magnéticamente por 10 minutos en

un Thermo Scientific Cimatec (Waltham, EE.UU). Se preparó una segunda solución de EO-Or (1.92 g) o EO-Cl (1.81 g) en etanol al 20% (mL). Posteriormente, se introdujo la punta del sonicador (Ultrasonic Homogenizer Cole Parmer) en la solución de β -CD durante 30 minutos. Durante los primeros 7 min se fue agregando 1 mL de la solución de EO-Or o EO-Cl a cada minuto. Para la formación de IC-UOr, el cual se refrigeró durante 22 horas a -2°C . Se procedió a realizar una filtración por vacío de la muestra IC-UOr, hasta quitar el exceso de agua, se metió a secar en la estufa LAB-LINE® DUO-VAC OVEN (Kochi, India) con una temperatura de 55°C , durante 20 horas. Se colocó en un desecador por 20 min, y se convirtió en polvo con ayuda de un mortero y pistilo para su almacenaje en bolsitas ziploc como se observa en la Figura 3.2. La primera solución se colocó en un Ultrasonic Homogenizer Cole Parmer. Donde se agitó magnéticamente durante 10 minutos en el equipo Science MS-H280-PRO.

Figura 3.2 Formación de IC por ultrasonido a) Equipo de ultrasonido, b) Polvos de los complejos de inclusion formados IC-P-Cl, IC-P-Or.



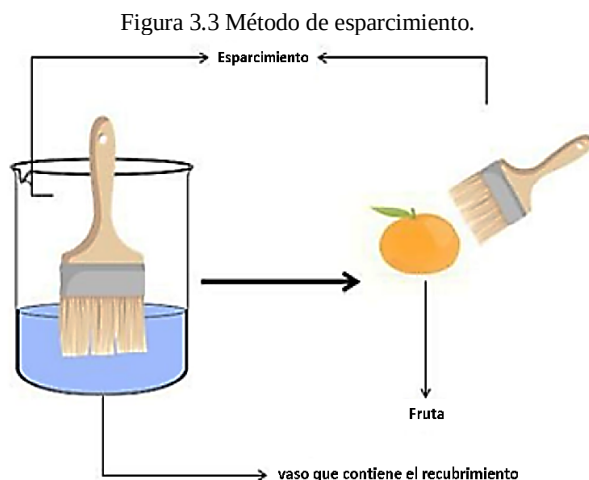
Elaboración propia García. (2024).

3.4 Elaboración de películas

Se prepararon cinco soluciones filmogénicas, un control (F-WS) y una por cada IC (F-UCl, F-UOr, F-P-Cl y F-P-Or). Para la solución control se mezclaron el almidón waxy (4 g), agua destilada (100 mL) y glicerol (1.2 g). Para las cuatro soluciones con IC se realizó a 3%, se mezclaron la misma cantidad de agua y glicerol con 3.88 g de almidón waxy. Las soluciones se agitaron magnéticamente en el equipo Thermo Scientific Cimatec (Waltham, EE.UU) simultáneamente se calentaban a una temperatura de 85°C . Durante 5 min se mantuvo constante la temperatura y se agregaron 0.12 g de IC-UCl, IC-UOr, IC-P-Cl o IC-P-Or, Las soluciones se vertieron uniformemente en una caja Petri, se colocaron en la estufa LAB-LINE® DUO-VAC OVEN (Kochi, India) a una temperatura de 55°C , durante 24 h, se retiraron de las cajas Petri y almacenaron en bolsas ziploc.

3.5 Aplicación del recubrimiento

Los recubrimientos elaborados con los complejos de inclusión se aplicaron por el método de esparcimiento, utilizando una brocha de silicona como se muestra en la Figura 3.3. Primero, se prepararon las soluciones filmogénicas F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr, La brocha se sumergió individualmente en cada solución y se esparció uniformemente sobre la superficie de 2 plátanos y 2 champiñones por cada muestra, las muestras se evaluaron en refrigeración a 2-4 °C y a temperatura ambiente (24-26°C).



Fuente: (Peerzada Gh et al., 2023).

3.6 Técnicas de caracterización

A continuación, se describe brevemente cada una de las técnicas de caracterización empleadas en el presente trabajo

3.6.1 Espectroscopia de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR)

Es una técnica que permite estudiar una muestra, mediante la identificación de grupos funcionales presentes en la muestra según su vibración molecular en las interacciones existentes entre los enlaces de la muestra y la radiación infrarroja (Nandiyanto et al., 2022). Se utilizó un espectrofotómetro de infrarrojo marca Nicolet Magna-550, en un intervalo de longitud de onda de 4000 a 400 cm^{-1} .

3.6.2 Análisis Termogravimétrico (TGA)

Mediante esta técnica se estudió la estabilidad térmica de los materiales. Evaluando la variación de la pérdida de peso de la muestra en función de la temperatura en una atmósfera controlada, permitiendo cuantificar dichas variaciones (Ng et al., 2018). Los análisis termogravimétricos (TGA) se llevaron a cabo utilizando un TGA Q500 (TA Instruments, EE. UU), donde los IC y las muestras de película se pesaron en bandejas de platino y se calentaron de 0 a 600 °C.

3.6.3 Calorimetría Diferencial de Barrido (DSC)

En el DSC la muestra experimenta una oscilación o modulación sinusoidal de temperatura superpuesta en una rampa de calentamiento o enfriamiento. La señal de flujo de calor total de la muestra puede descomponerse en su capacidad calorífica (evento térmico reversible) y componentes cinéticos (eventos térmicos irreversibles) (Schick, 2009). El análisis térmico de barrido diferencial se realizó en un DSC 2500 (TA Instruments, EE.UU) en un intervalo de temperatura de 0 a 250 °C.

3.6.4 Difracción de Rayos X (XRD)

Este tipo de análisis se basa en hacer incidir un haz de rayos X a diferentes ángulos sobre una muestra, con esta técnica es posible identificar estructuras cristalinas. El equipo utilizado fue un Difractómetro ECO avanzado (Bruker, EE. UU.)(Bunaciu et al., 2015). Las películas fueron analizadas en un intervalo de 0 a 50° en 2 θ . El patrón de difracción de interés se observó de 0-30°.

3.6.5 Microscopia Electrónica de Barrido (SEM)

Esta técnica consiste en hacer incidir un haz de electrones de alta energía sobre la muestra. La muestra se recubre con una capa fina de oro paladio, para otorgarle propiedades conductoras. La interacción de los electrones con la muestra permite obtener imágenes de alta resolución (Fischer et al., 2012). Los IC fueron analizados a 5 kV y las películas a 10 kV en un microscopio electrónico de barrido JEOL JCM6000. Las muestras se colocaron en una cinta de cobre doble cara, evaluándose en aumentos de 500x, 1000x, 2000x y 2500x.

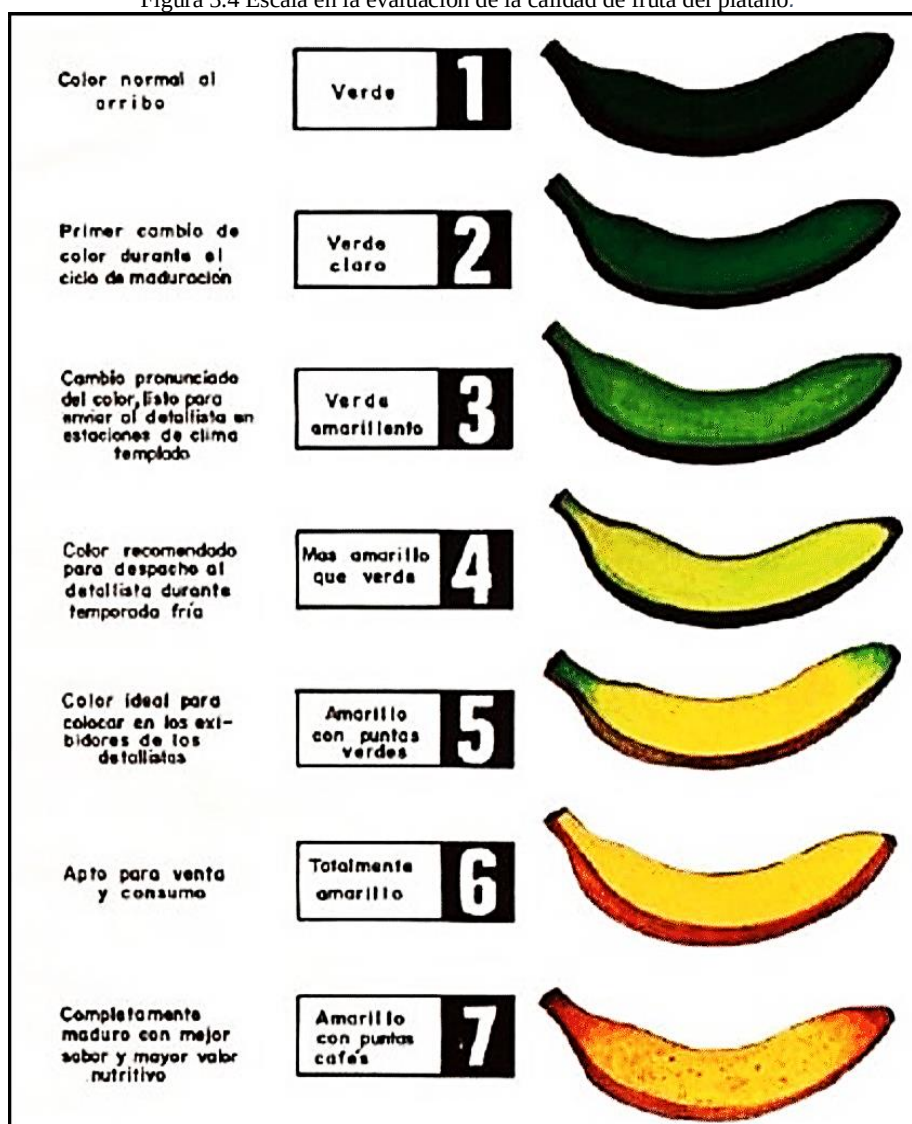
3.6.6 Permeabilidad al vapor de agua

La prueba de permeabilidad al vapor de agua (WVP) se llevó a cabo de acuerdo con el método estándar E96-66 ASTM (ASTM, 2000). El dispositivo de permeación consistió en un vaso de vidrio de 50 mm de altura y 35 mm de diámetro que contenía agua (100 % HR). Cada muestra se colocó y selló sobre la abertura circular del dispositivo de permeación que se depositó dentro de la cámara de permeabilidad que contenía gel de sílice (0 % HR), manteniendo el gradiente de presión de vapor de agua a través de la muestra a 30 °C. La permeabilidad al vapor de agua se midió a partir de la pérdida de peso del dispositivo de permeación contra el tiempo, que se registró cada min durante 6 h utilizando una balanza analítica conectada a una computadora. La tasa de transmisión de vapor de agua se calculó utilizando la pendiente de la línea recta obtenida por regresión lineal y el WVP se determinó considerando el gradiente de presión de vapor de agua, el espesor y el área de transferencia de la muestra. Previo a la prueba, todas las muestras fueron condicionados al 57 % HR durante 72 h, y los resultados reportados son los promedios de al menos tres mediciones.

3.6.7 Prueba de funcionalidad

Se utilizaron plátanos y champiñones sin daños físicos ni descomposición aparentes y con madurez mínima, pesos similares (45 g a 55 g para los plátanos y 19 g a 27 g para los Champiñones). Los plátanos y los champiñones se recubrieron de películas compuestas con IC. Los plátanos y champiñones sin recubrimiento (S/R) se utilizaron como grupos de control. Los productos se dividieron en dos grupos, un grupo se almacenó en una estufa LAB-LINE® DUO-VAC OVEN (Kochi, India) manteniendo una temperatura de 23 a 25 °C y el otro grupo de almacenó en refrigeración con una temperatura de 2 a 4 °C durante 7 días. Cada día se registraron los cambios de apariencia, tamaño y pérdida de peso. Se llevó a cabo un análisis visual utilizando la escala de maduración del plátano (Figura 3.4) para evaluar la eficacia del recubrimiento.

Figura 3.4 Escala en la evaluación de la calidad de fruta del plátano.



Fuente: (Rica et al., 2010).

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presenta la discusión de resultados obtenidos mediante las técnicas de caracterización descritas en el capítulo anterior. Se realizó la caracterización los complejos de inclusión y las películas de almidón adicionadas con los complejos de inclusión, esto para determinar su composición química, características térmicas y morfológicas con el objetivo de determinar los cambios presentes entre sí, y comprobar la eficacia y diferencia de los diferentes recubrimientos.

4.1 Espectroscopia de infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR)

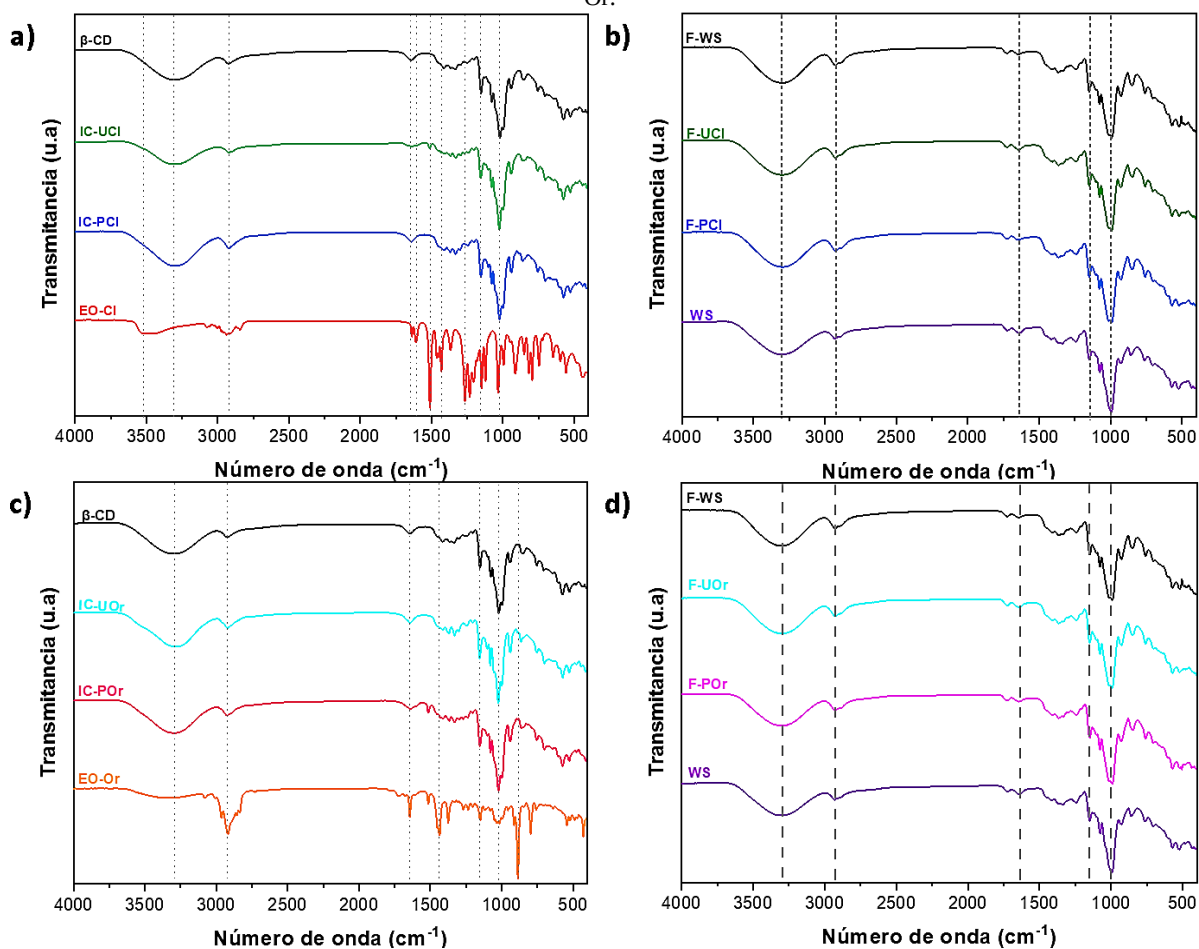
Las muestras β -CD, EO-Or, EO-Cl, IC-UCl, IC-POr, IC-UCl, IC-PCl y las películas F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr se analizaron por FT-IR para identificar los picos de grupos funcionales presentes en las muestras. Los espectros obtenidos se muestran en la Figura 4.1.

Con el objetivo de facilitar la identificación de las muestras, los complejos de inclusión y las materias primas utilizadas para su elaboración se presentan en figuras separadas, de acuerdo con el aceite esencial utilizado. En la Figura 4.1 a se muestran los IC del EO-Cl, mientras que en la Figura 4.1 c los correspondientes al EO-Or. De la misma forma, las películas adicionadas con IC-Cl se muestran en la Figura 4.1 b, y las de IC-Or en la Figura 4.1 d.

La β -CD presentó los picos característicos. En la banda 3304.96 cm^{-1} , asociado al estiramiento del grupo -OH, en la banda de 2924.84 cm^{-1} por el estiramiento de CH (grupo CH_2), en la banda de 1643.73 cm^{-1} por la deformación angular realizada por vibraciones de estiramiento C=O. También se mostró absorción en la banda de 1151.90 cm^{-1} debido al estiramiento -CH y C-O-C, y el pico en 1020.15 cm^{-1} es el estiramiento de C-O-C del alcohol, las bandas 1076.80 , 853.90 y 754.05 cm^{-1} atribuidas a picos característicos de los anillos de glucosa (da Silva et al., 2023; Guan et al., 2024a).

En el espectro de EO-Cl, Figura 4.1 a se identificaron los picos característicos. A 3515.15 cm^{-1} el estiramiento de O-H, las bandas de 2936.59 y 2842.84 cm^{-1} correspondientes a las vibraciones de estiramiento C-H en el anillo fenilo, en 1610.96 cm^{-1} las vibraciones de estiramiento C=C en el anillo de fenilo y el grupo alilo, y en la banda de 1510.65 cm^{-1} se muestran las vibraciones del anillo H-C-C. Las flexiones H-C-H simétricas y asimétricas menos intensas en el grupo metoxi y el grupo metileno de la cadena de alilo aparecen en la región de 1366.06 y 1430.85 cm^{-1} , junto con vibraciones de estiramiento de anillo de fenilo, mientras que la flexión C-O-H aparece como un pico fuerte a 1265 cm^{-1} (Mulla et al., 2017). El pico fuerte a 1231.41 cm^{-1} corresponde a la flexión C-C-H, a las vibraciones del anillo y al estiramiento C-OH (Fizer et al., 2022).

Figura 4.1 Espectros de FTIR a) IC de EO-Cl; b) Películas con IC de EO-Cl; c) IC de EO-Or; d) Películas con IC de EO-Or.



Elaboración propia García. (2024).

Los espectros FTIR de los complejos de inclusión IC-UCl y IC-PCl mostraron los picos característicos de la β -CD. Se observa que en IC-UCl el pico característico de la β -CD a 1643.73 cm^{-1} , se desplazó a 1637.63 cm^{-1} . Shen et al., (2024) tomaron este cambio como la presencia de más enlaces C=O en el IC, que se vieron potenciados por la influencia del componente encapsulado en su caso el citral. Se observó la aparición de un pico en 1513.76 cm^{-1} de la muestra IC-UCl debido al anillo H-C-C. Así mismo, los picos de 3304.96 , 2924.84 , y de 1020 cm^{-1} de la β -CD se llegaron a desplazar en las muestras IC-UCl y IC-PCl fenómenos similares también fueron observados en estudios anteriores (Guan et al., 2024; Z. Li et al., 2022; Miyoshi et al., 2022) tomando estos cambios como prueba de la formación del IC.

En la Figura 4.1c se muestra el espectro del aceite esencial de naranja (EO-Or). El pico en 2918.07 cm^{-1} se atribuye al estiramiento de los enlaces C-H, el de 1646 cm^{-1} a la vibración de estiramiento de C=O y a 1435 cm^{-1} la banda de metileno/metilo (de Araújo et al., 2020). La banda más importante reveló la presencia de D-limoneno a 886 cm^{-1} (Y. Li et al., 2018).

Los espectros FTIR de los complejos de inclusión IC-UOr y IC-POr también mostraron los picos característicos de β -CD. La muestra IC-POr mostró la presencia de un pico en 1514.24 cm^{-1} en la región C=O los cuales fueron potenciados por la presencia del EO (D. Shen et al., 2024). En el caso de los compuestos encapsulados que tienen baja solubilidad en agua y alta volatilidad, las regiones con mayor probabilidad de modificación son las regiones de doble enlace y el anillo aromático (Miyoshi et al., 2022). Los picos $1500\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$ de la β -CD en IC-UOr, y IC-POr fueron deformados o desaparecieron, lo que sugiere que esos enlaces podrían estar envueltos por la β -CD. Una vez que la molécula huésped entra en el orificio de la β -CD, da lugar a una restricción conformacional, reduce su vibración de estiramiento y debilita los picos típicos los cuales interpretaron estos pequeños cambios en la encapsulación exitosa del complejo de inclusión (Luo et al., 2022).

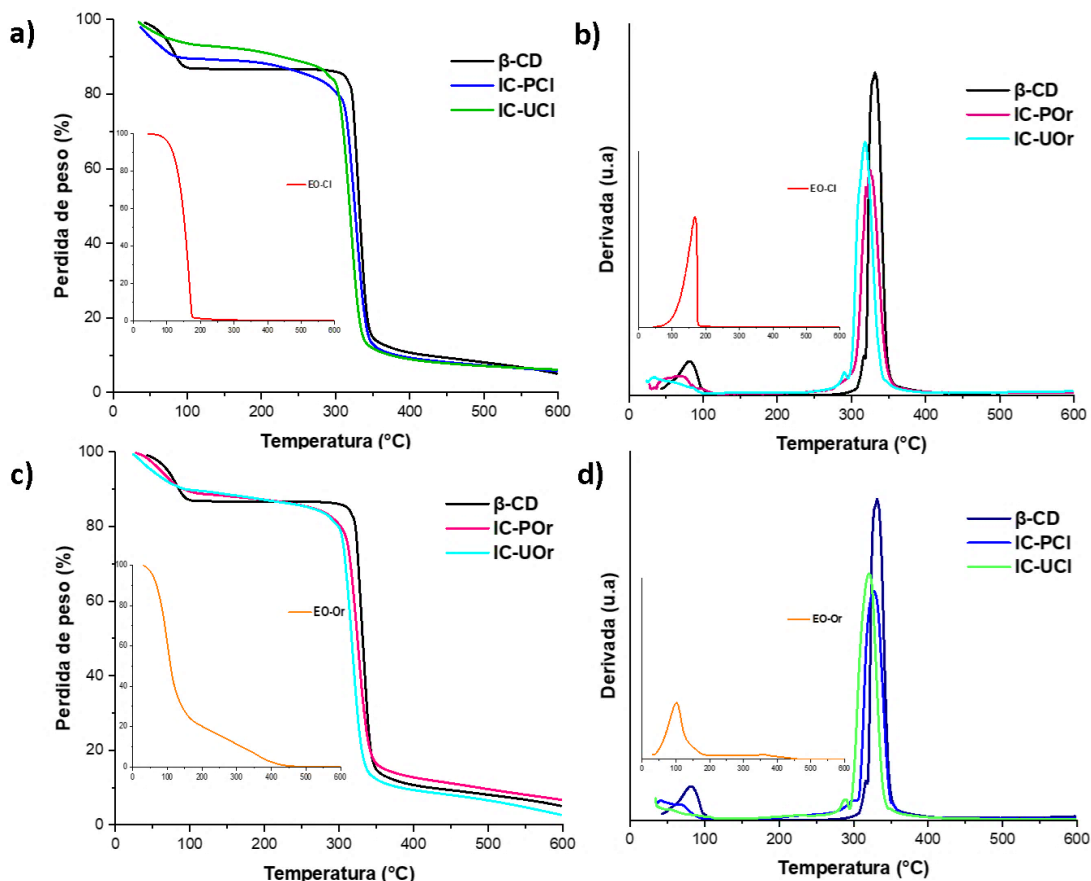
La Figura 4.1b y Figura 4.1d muestra los espectros FTIR de las películas F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr. Todas las películas presentaron las bandas características de almidón waxy (WS) en 3300 cm^{-1} , la cual corresponde a la vibración de los grupos hidroxilo -OH, 2930 cm^{-1} C-H de grupos alquilo, 1150 cm^{-1} estiramiento C-O y el enlace éster C=O en el rango de $1712\text{-}1730\text{ cm}^{-1}$ (Cai et al., 2020) No se observaron cambios aparentes en las películas con IC (F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr), lo cual se puede atribuir a la naturaleza de la β -CD y la cantidad adicionada de cada componente.

4.2 Análisis termogravimétrico (TGA)

El análisis termogravimétrico proporciona información sobre los cambios de masa de las muestras a determinadas temperaturas. La Figura 4.2 muestra las curvas de los termogramas de β -CD, EO-Cl, EO-Or, IC-UCl, IC-UOr, IC-PCl y IC-POr, las cuales incluyen un gráfico interno de la degradación térmica de los aceites esenciales. En la Figura 4.2a y Figura 4.2c el aceite esencial de clavo (EO-Cl), la Figura 4.2b y Figura 4.2d del aceite esencial de naranja (EO-Or). El termograma de β -CD mostró una pérdida de peso en dos etapas, la primera es de 12.370% a $80.59\text{ }^{\circ}\text{C}$, asociada con la pérdida de agua y 81.575% a $331.36\text{ }^{\circ}\text{C}$, relacionada por la descomposición de β -CD. Estos resultados son consistentes con informes anteriores sobre sistemas similares (Flores-Silva, Hernández-Hernández, et al., 2023). Las curvas para ambos aceites esenciales mostraron solo una pérdida de masa significativa (gráfico interno Figura 4.2a y Figura 4.2c), pero el aceite esencial de clavo se volatilizó a una temperatura más alta de $167.44\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.2a) que el aceite esencial de naranja $101.62\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 4.2c).

Los termogramas de IC-UCI, IC-UOr, IC-PCI y IC-POr son similares al de β -CD. Para todos los complejos de inclusión, se puede observar que la primera pérdida de peso fue menor que de la β -CD. Esta menor pérdida de peso en los complejos se atribuye a que las moléculas de agua en la cavidad hidrofóbica del β -CD han sido reemplazadas por las moléculas de aceite esencial lo que indica la existencia de una interacción huésped-huésped y la formación del IC (de Santana et al., 2020). El IC-UCI mostró una pérdida de peso de 6.468%, el IC-UOr de 9.538% (Figura 4.2a y Figura 4.2c), IC-PCI de 8.441% y IC-POr de 11.016% (Figura 4.2a y Figura 4.2c). Estas pérdidas de peso ocurrieron en el intervalo de temperatura entre 30°C y 120 °C, y están relacionadas con las moléculas de agua que no fueron reemplazadas por el aceite esencial. La descomposición máxima de los IC formados fue en un intervalo de 317 °C a 327 °C, sugiere que los compuestos presentes en el EO estaban protegidos por la β -CD, puesto que los complejos de ciclodextrina son estables a altas temperaturas debido a la alta degradación térmica de las β -CD (Velázquez-Contreras et al., 2022). El hecho de que sólo se presentaran dos pérdidas de peso sugiere que los EO estaban protegidos por la β -CD, y que los procesos de formación de los complejos de inclusión fueron eficientes (Miyoshi et al., 2022).

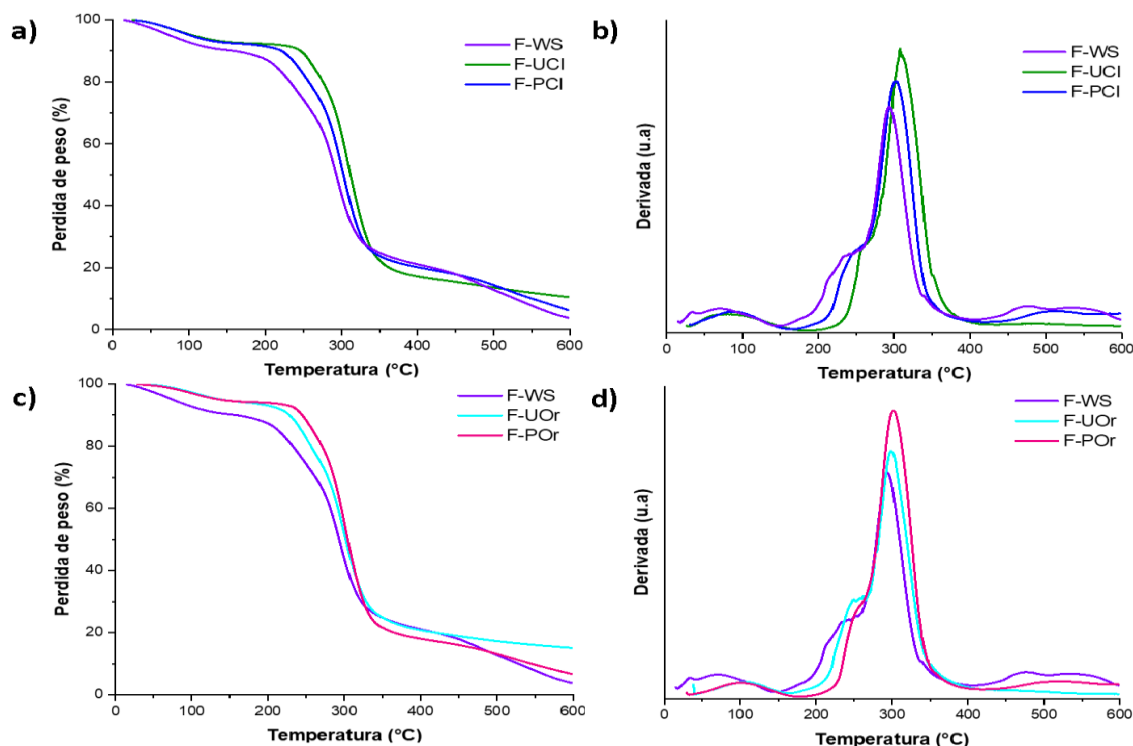
Figura 4.2 Curvas de pérdida de peso y derivadas de los IC por ultrasonido y plasma de EOs de clavo y naranja:(a) Curvas de pérdida de peso del IC de clavo, (c) de naranja, (b) Derivadas de la pérdida de peso del IC de clavo y (d) de naranja. Pérdida de peso de los EOs (Gráficos internos a y c) y sus derivadas (Gráficos internos a y c).



Elaboración propia García. (2024).

También, se obtuvieron las curvas termogravimétricas de las películas F-WS, F-UCI, F-UOr, F-PCI y F-POr, las cuales se muestran en la Figura 4.3. Los termogramas de todas las películas mostraron un perfil similar, con tres pérdidas de peso. La muestra F-WS presentó una pérdida de peso de 7.839% a 67.84°C atribuida regularmente a la eliminación de humedad (Barandiaran et al., 2024). La segunda de 17.594% a 238.50 °C está relacionada a la descomposición del glicerol (Gutiérrez et al., 2015). Finalmente, la tercera pérdida de peso, entre 250 y 350°C, atribuida a la degradación térmica de la matriz de almidón (de Almeida et al., 2020). En las películas F-UCI, F-UOr, F-PCI y F-POr, la primera pérdida de peso fue de 7.523%, 5.757%, 7.411% y 5.718%, respectivamente. Esta reducción en el peso ocurrió en un rango de temperatura de 80-100 °C y está relacionada con la pérdida de humedad.

Figura 4.3 Curvas de pérdida de peso y derivadas de la pérdida de peso, películas de almidón waxy (WS) con complejos de inclusión de aceite esencial de clavo (a, b) y películas de complejos de inclusión de aceite esencial de naranja (c, d).



Elaboración propia García. (2024).

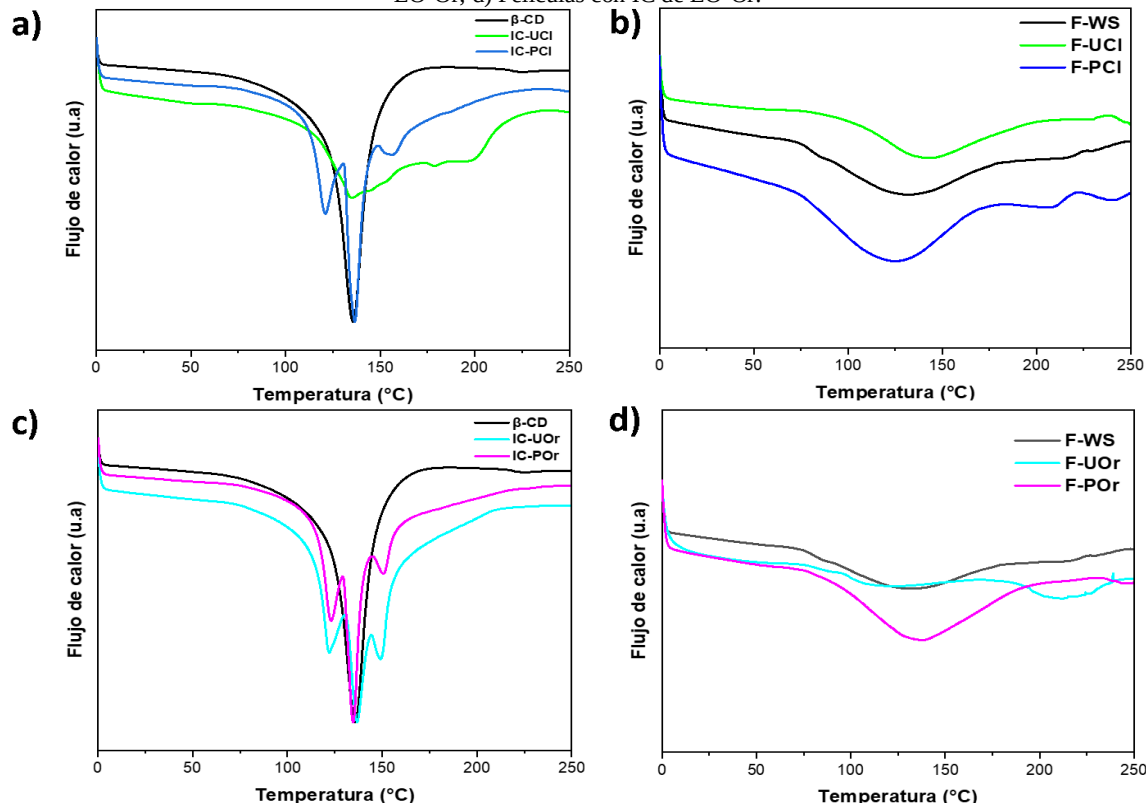
Además, las diferencias entre los valores sugieren que la adición de IC redujo la disponibilidad de agua libre en la matriz de la película, lo que disminuye la cantidad de humedad liberada durante la primera pérdida. A ~250°C las películas presentaron una pérdida de glicerol a una temperatura más alta que F-WS, así como su punto de descomposición máxima se mantuvo en un rango de 249 a 260 °C (Figura 4.3). Es posible observar que la adición de los IC aumentó la estabilidad térmica, estos resultados coinciden con reportes de sistemas similares (Flores-Silva, Aguilar-Padilla, et al., 2023). Finalmente, a partir de 400 °C corresponde al residuo carbonoso y está representada por una pérdida de masa de alrededor del 10~15%.

4.3 Calorimetría de Barrido Diferencial (DSC)

El análisis DSC se utilizó para visualizar las transiciones térmicas de los complejos de inclusión. La Figura 4.4a y Figura 4.4c muestra las transiciones de β -CD, IC-UCl, IC-UOr, IC-PCl y IC-POr. La muestra de β -CD presentó un único evento endotérmico a 135,64°C ($\Delta H=122.54$ J/g), que se relaciona con el agua pérdida en el interior de la cavidad hidrofóbica del β -CD (Wang et al., 2011).

El complejo de inclusión IC-UCl (Figura 4.4a) presenta un evento endotérmico a 136.66°C ($\Delta H=192.79$ J/g). Sin embargo, se observó un desplazamiento y una disminución en la intensidad del pico, esto se puede atribuir a la reducción en la masa de agua presente en el complejo cuando ocurre la complejación, ya que el agua se desplaza de la cavidad de β -CD por la molécula huésped (C. S. Marques et al., 2019). El termograma de IC-PCl mostró un pico a 120.23°C y un segundo pico desplazado a 137.57°C ($\Delta H=213.28$ J/g) estos cambios son similares a otros sistemas donde el termograma del complejo β -CD–eugenol mostró transiciones térmicas a 196.8 °C con picos endotérmicos. Los picos de β -CD puro aparecen a 187.3–188.7 °C. Debido a la interacción entre el anfitrión y el huésped que culmina en el aumento de la temperatura de transición de fase (Seo et al., 2010).

Figura 4.4 Termogramas de calorimetría diferencial de barrido a) IC de EO-Cl; b) Películas con IC de EO-Cl; c) IC de EO-Or; d) Películas con IC de EO-Or.



Elaboración propia García. (2024).

Para IC-UOr y IC-POr, presentaron tres picos (Figura 4.4 c), en comparación con la β -CD, para IC-UOr fue en 121.58, 137.65, 149.16°C ($\Delta H=128.28$ J/g) y en IC-POr fue a 122.46, 135.18 y 150.78°C ($\Delta H=128.24$ J/g), la aparición de estos picos se podría deber a la morfología de los IC de naranja observada en el SEM, los cuales mostraron una estructura aglomerada, requiriendo de una mayor cantidad de energía de fusión que la β -CD, puesto que la cavidad de la ciclodextrina afecta el comportamiento térmico de los complejos de inclusión, lo que conduce a la aparición de nuevos picos lo cual puede deberse a la evaporación, oxidación, descomposición, fusión o transición polimórfica, lo que sugiere la formación de complejos (Wadhwa et al., 2017).

El aumento de las temperaturas de los IC resultó en el aumento de la temperatura de transición de fase. Estudios informaron que el aumento en la temperatura de descomposición del complejo se debió a la inclusión de moléculas huésped en la cavidad β -CD, lo que mejoró la estabilidad térmica del complejo (Huang et al., 2024).

También se evaluaron las transiciones térmicas de las películas adicionadas con IC, en la Figura 4.4b y la Figura 4.4d se muestra los termogramas de F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl, F-POr y sus propiedades térmicas se muestran en la Tabla 4.1. La curva obtenida por DSC para F-WS presenta un evento endotérmico a 130.82°C ($\Delta H= 41.084$ J/g), La presencia de un solo pico endotérmico indica que no hay fases separadas (Jamróz et al., 2018). Este pico representa la fusión de los dominios cristalinos de almidón reorganizados durante la retrogradación (Almasi et al., 2010).

Tabla 4.1 Propiedades térmicas de las películas activas.

Película	ΔH_f(J/g)	T_f (°C)
F-WS	41.084	130.82
F-UCl	94.981	141.95
F-UOr	43.384/40.525	115.06/212.07
F-PCl	65.593	124.06
F-POr	100.98	136.99

Elaboración propia García. (2024).

También se observó un comportamiento similar en las muestras F-UCl y F-POr, pero con un aumento en su entalpía y temperatura. En donde F-UCl aumento la entalpía a 94.981 J/g y una temperatura de 141.95°C. mientras que F-POr fue a 100.298 J/g a una temperatura de 136.99 °C donde valores más altos de ΔH_f indican interacciones fuertes de enlace de hidrógeno entre la matriz de almidón y complejo de inclusión. El aumento de ΔH_f sugiere una mejor ordenación de los componentes en las películas, que necesitan ser superadas para lograr la fusión (de Souza et al., 2020). Por otra parte, F-UOr mostró este aumento de entalpía de fusión, pero fue en dos eventos endotérmicos debido a que la presencia de más de una T_f es típica de sistemas con más de una fase que muestran separación de fases (Merino & Athanassiou, 2022).

La película F-PCI, muestra un incremento en la entalpía a 65.593 J/g y una temperatura menor de 124.06 °C. El valor de T_f de la película F-PCI es más bajo que el de la película F-WS.

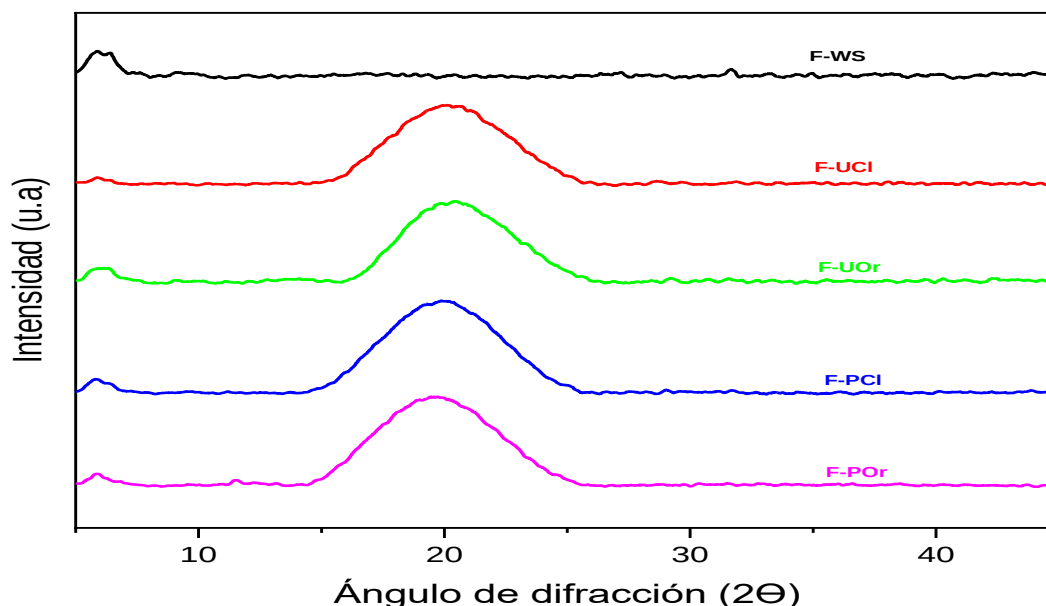
Aunque la β -ciclodextrina puede proteger el aceite esencial, la interacción entre el almidón, puede modificar su estructura térmica de la matriz polimérica, teniendo desplazamientos del pico endotérmico hacia valores de temperatura más bajos o altos.

4.4 Difracción de rayos X (DRX)

Se utilizó difracción de rayos X para identificar la estructura cristalina de muestras de las películas de almidón waxy con los IC. La Figura 4.5 muestra la cristalinidad de F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCI y F-POr. La película de almidón waxy F-WS presentó una forma amorfa, atribuido a que el contenido de cristalinidad de las películas de almidón aumenta con un alto contenido de amilosa, mientras que las películas basadas únicamente en amilopectina son amorfas (de Almeida et al., 2020). El grado de cristalinidad y la naturaleza amorfa están directamente relacionadas con la naturaleza del almidón (González-Torres et al., 2021).

Además, las películas con IC (F-UCl, F-UOr, F-PCI y F-POr) mostraron un pico en 2θ alrededor de $\sim 20^\circ$, característico de la estructura tipo V (de Almeida et al., 2020), relacionado a la estructura cristalina combinada de los IC en la película termoplástica de almidón waxy (Guan et al., 2024). Estos resultados concuerdan con estudios anteriores donde las películas preparadas con hidrocoloides mostraron zonas cristalinas y amorfas en las cuales los picos cristalinos fueron más evidentes al agregar β -CD en la película (G. Chen & Liu, 2016)

Figura 4.5 Curvas XRD de las películas control y con complejos de inclusión F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCI y F-POr.

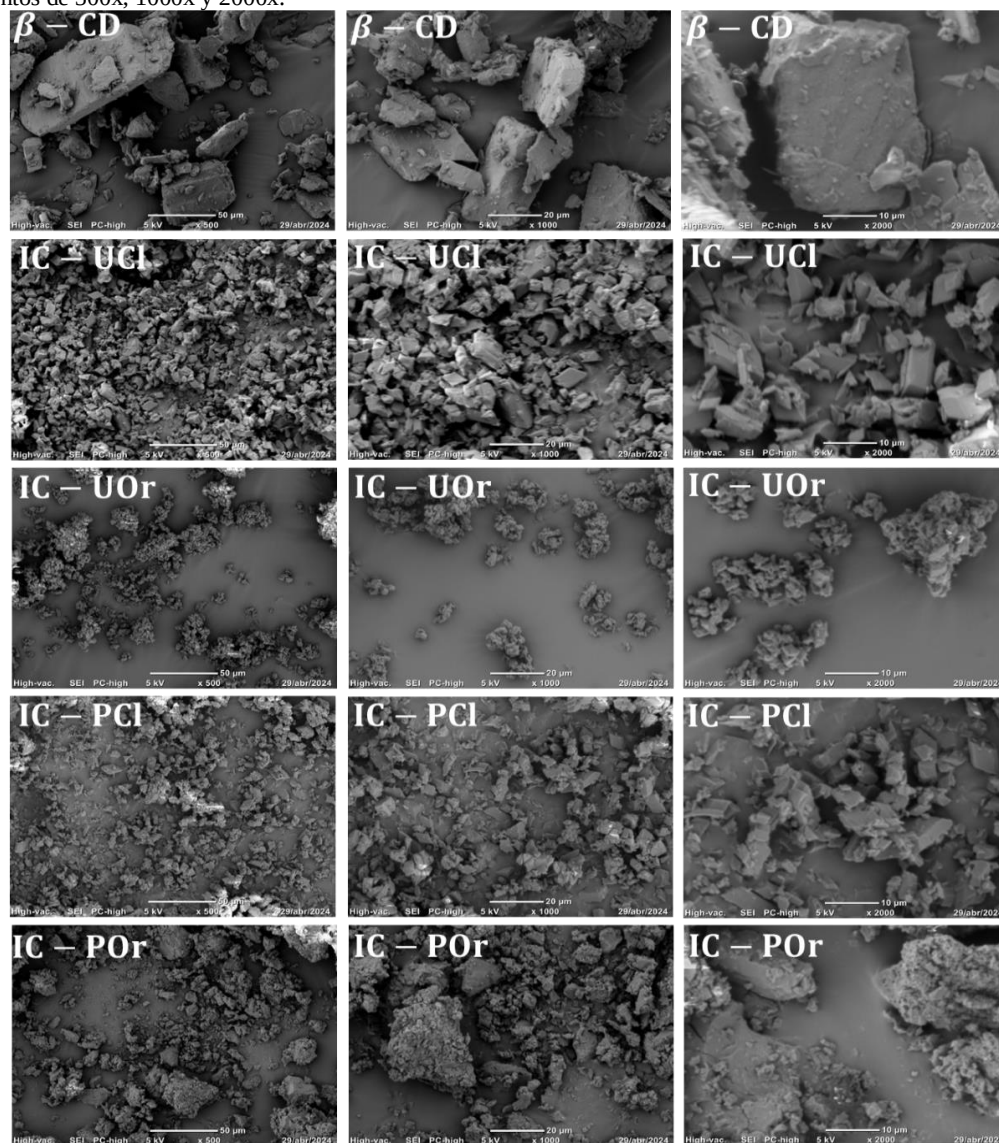


Elaboración propia García. (2024).

4.5 Microscopía electrónica de barrido (MEB)

Se utilizó microscopía electrónica de barrido (MEB) para observar la morfología de la β -CD, los complejos de inclusión (IC-UCl, IC-POR, IC-UCl, IC-PC) y las películas (F-UCl, F-UOr, F-PCl, F-POR) para determinar si se presentan cambios debido al tipo de metodología de procesamiento empleada para la obtención de los complejos, o por la incorporación de estos en las películas. En la Figura 4.6 se observa que la β -CD presentó forma de bloque irregular de diferentes tamaños, mientras que las muestras de IC-UCl y IC-PCl presentaron forma romboidal y un menor tamaño. Los complejos no mostraron fracturas, grietas o poros visibles, lo que indica una buena protección del EO (Anaya-Castro et al., 2017).

Figura 4.6 Caracterización y análisis de los complejos de inclusión y características de la morfología de las nanopartículas en aumentos de 500x, 1000x y 2000x.

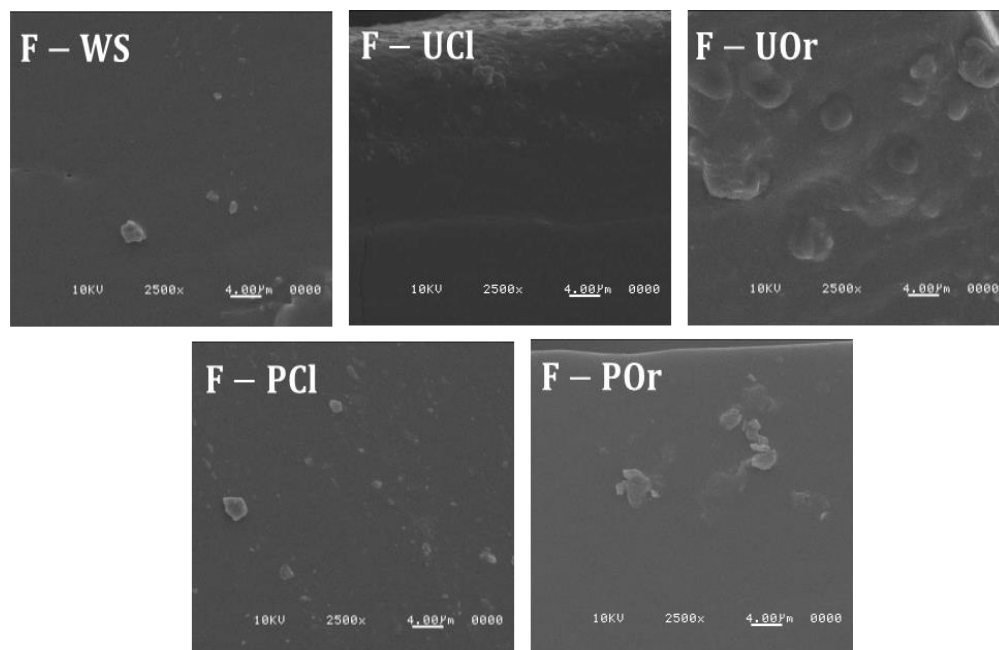


Elaboración propia García. (2024).

Por otro lado, los complejos IC-UOr y IC-POr mostraron cambios en la forma de las partículas, dando lugar a cúmulos y cambios en las estructuras, indicando la formación de un complejo de inclusión (Galvão et al., 2015). Estos resultados concuerdan con estudios anteriores, donde la estructura cambio a una forma irregular, presentando una forma geométrica indefinida y estar compuesta de partículas aglomeradas. De esta forma describen la formación del IC con EO-Or por medio de una mezcla física y precipitación (D. Kringel et al., n.d.; D. H. Kringel et al., 2017). Debido a la similitud en la morfología de los IC obtenidos por los métodos de ultrasonido y plasma, se sugiere que no hay un efecto por el tipo de metodología empleada (Kong et al., 2024).

Los cambios en la microestructura de los IC sugieren que hubo una interacción entre los EO y la β -CD, o sea se dio una interacción entre las moléculas huésped y hospedero (Liu et al., 2023). Las variaciones evidentes en el tamaño, la forma y la estructura de las partículas del IC en relación con la de β -CD demostraron la formación de los IC (Huang et al., 2024).

Figura 4.7 Imágenes SEM de la superficie de las películas de almidón waxy y las películas con complejos de inclusión con aumento de 2500x.



Elaboración propia García. (2024).

La película F-WS presentó una superficie lisa y homogénea. Las micrografías de las películas F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr presentaron pequeños cambios en la morfología con la adición de los IC. Como se puede observar en la Figura 4.7, la película F-UCl presento una estructura más rugosa que F-WS. Mientras que F-UOr presento múltiples formas esféricas dispersas en la película. Las muestras F-UOr y F-POr con una estructura más parecida a F-WS, pero con pequeñas aglomeraciones que pertenecen a los IC agregados durante la elaboración de la película. Después de la adición de IC, aparecieron

partículas amorfas en la película, lo que mostro que los IC estaban completamente fusionados a la película. Los fragmentos en el material fílmico podrían deberse a la ruptura de algunas de las estructuras de IC causadas durante el proceso de realización de la película (J. Li et al., 2023).

4.6 Prueba de funcionalidad

Se realizo la prueba de funcionalidad del recubrimiento activo de las muestras F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr para evaluar el efecto del recubrimiento en el peso y aspecto de alimentos perecederos (plátanos, champiñones) bajo condiciones de almacenamiento a temperatura ambiente y refrigeración. Para la evaluación del grado de madurez visual de las muestras de plátano se utilizó la escala mostrada en la Figura 3.4. Adicional a los frutos recubiertos, se evaluó una muestra sin recubrimiento (S/R) como control. El plátano sin recubrir (S/R) a temperatura ambiente mostraba una tonalidad más amarilla que verde durante el día 1 (Escala 4) y una tonalidad totalmente amarilla en el día 3 (Escala 6) (Figura 4.8). La pérdida del color verde se debe a la degradación de la estructura de la clorofila (Cho & Koseki, 2021). Al día 5 se encontraba en el nivel 7 de la escala de madurez con un color amarillo opaco y la presencia de manchas marrones en la cáscara. El color amarillo exterior de la fruta es debido a la acumulación de radicales libres durante el almacenamiento lo cual puede ser la causa de las manchas marrones en las cáscaras de plátano (Ma et al., 2022). Finalmente, a los 7 días de almacenamiento, comenzó a crecer hongo en la punta y tallo de la muestra S/R.

La muestra F-WS a temperatura ambiente mostro un proceso de maduración similar a S/R. El día 1 se identificó el número 4 en la escala, indicando un coloramiento más amarillo que verde con la pronta aparición de manchas. En la parte superior del plátano se observó una mancha que se le atribuyo a la manipulación de la muestra. En el día 3, se empezaron a mostrar manchas marrones más pronunciadas en su cáscara, alcanzando el número 5 en la escala de maduración utilizada. Sin embargo, se mantiene una coloración verde en la punta y tallo del plátano. En el 7mo día, el aspecto del plátano salió de la escala, sugiriendo la sobre maduración del fruto y el inicio de la descomposición de este. Al retirar la cáscara se visualizó que el tallo tenía un ligero coloramiento negro y en la punta se mantenía una parte blanda, lo que podría atribuirse a cambios en la estructura de la pared celular mediante la degradación de enzimas y a la degradación del almidón durante el proceso de maduración (Cho & Koseki, 2021).

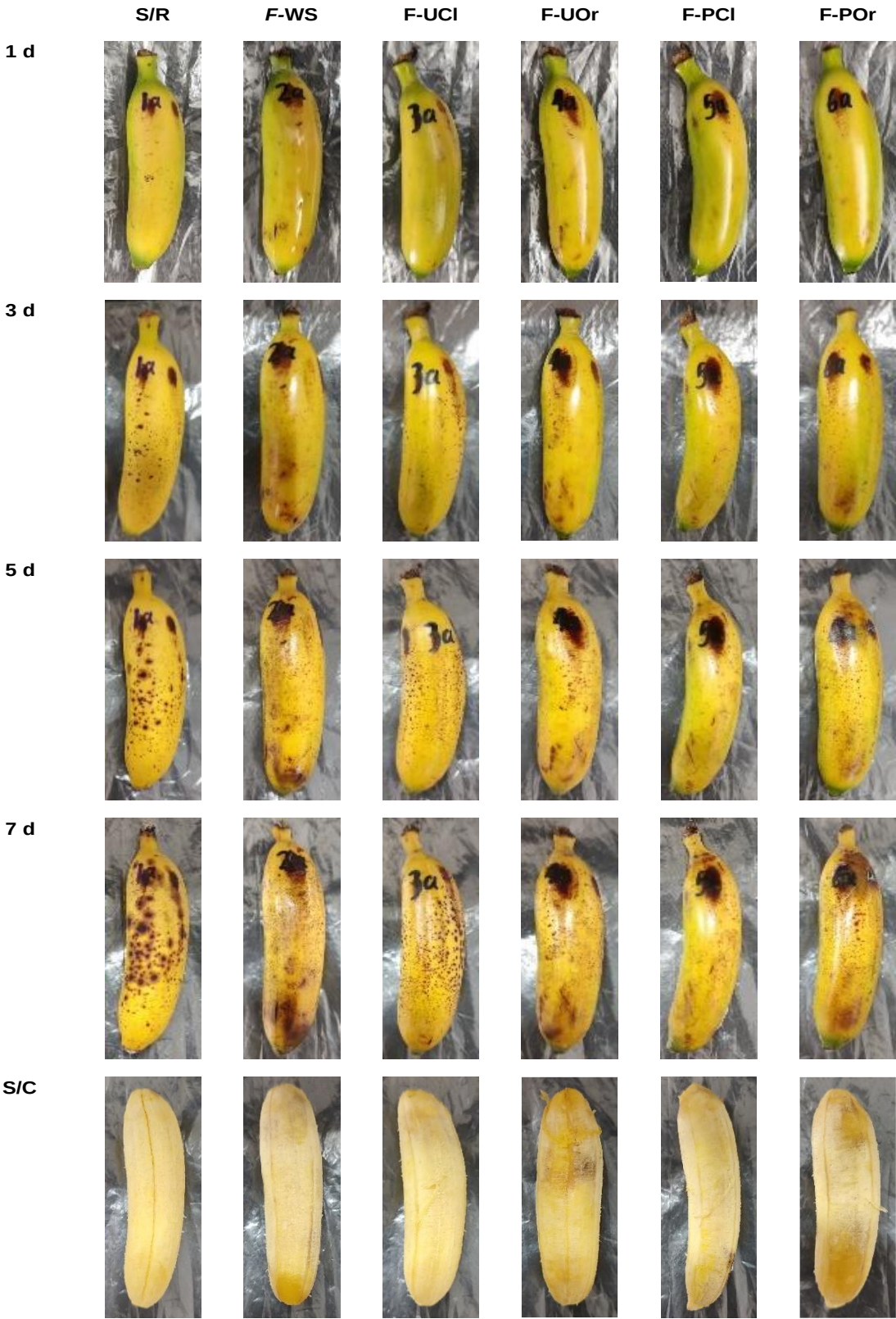
Las muestras F-UCl y F-PCl mostraron un comportamiento similar, dado que el primer día mantuvieron el número 4 en la escala con un color más amarillo que verde y la presencia de una mancha marrón en el área de identificación. Al 5to día los plátanos mantuvieron una maduración completa con pequeños puntos cafés. Los compuestos bioactivos presentes en el aceite esencial de clavo son agentes antioxidantes y antimicrobianos eficientes que se han asociado con el retraso y la

disminución de la descomposición de la fruta. Los compuestos fenólicos presentes retardan la biosíntesis de etileno, el aroma y sabor de la fruta (Baite et al., 2022), esto resulta en un retraso en la maduración en los plátanos.

Por otro lado, las muestras F-UOr y F-POr empezaron con una maduración similar a F-WS los días 1, 3 y 5; pero al 7mo día se observaron manchas marrones de gran tamaño en ambos extremos de los plátanos. Este cambio de tamaño de las manchas marrones podría ser debido a los radicales libres generados por el plasma frío al formar los complejos de inclusión, los cuales pudieron haber incrementado este cambio. Al retirar la cáscara, fue completamente perceptible el cambio de coloración y el reblandecimiento de esas zonas de pulpa. Cabe resaltar que, todas las muestras con recubrimiento de IC mostraron una coloración verde en la cola del plátano hasta el último día.

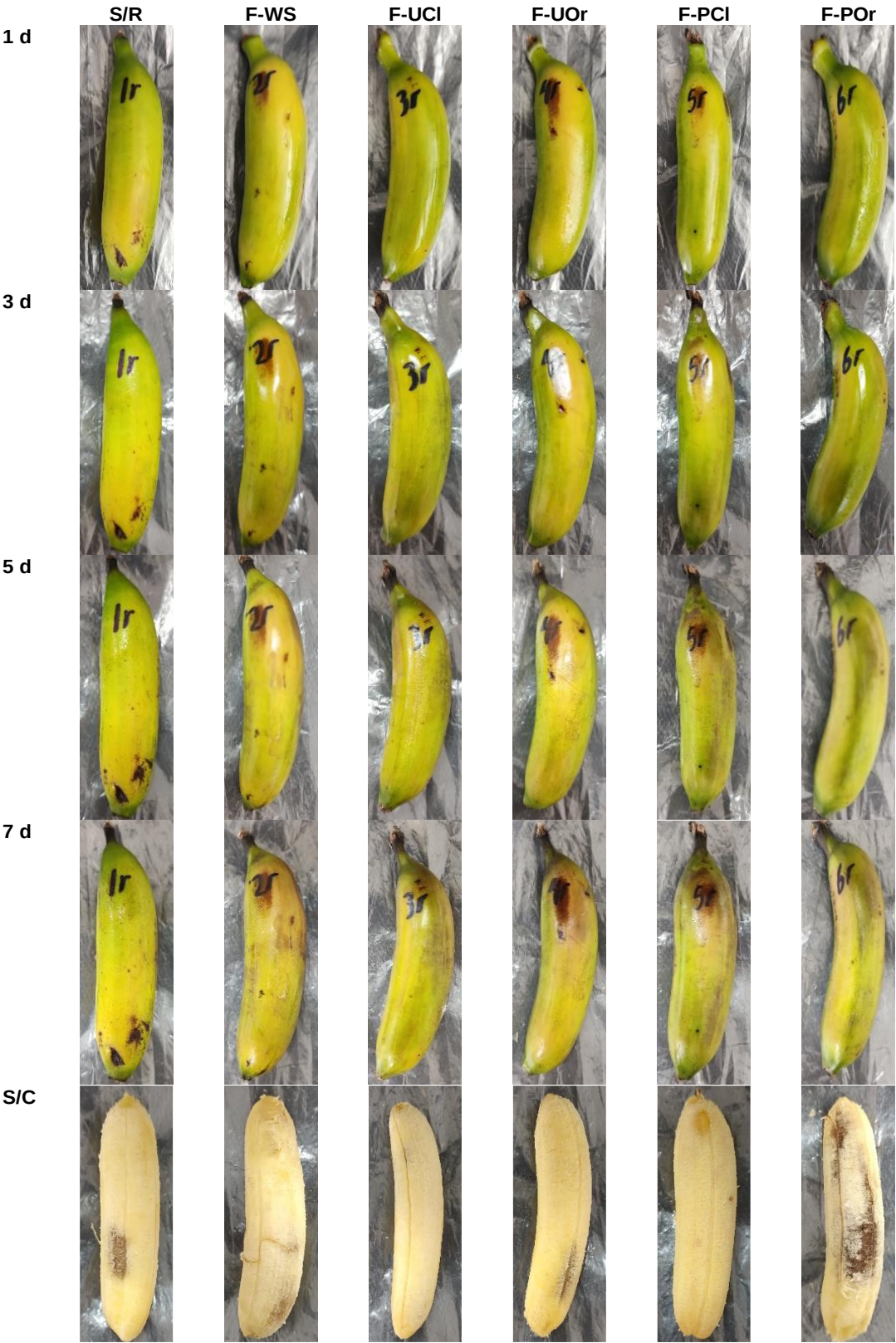
El aspecto de los plátanos refrigerados se muestra en la Figura 4.9. Las muestras S/R y F-WS se mantuvieron en el nivel 4 de la escala de maduración durante los 7 días de almacenamiento, iniciaron con una coloración verde amarillento en el día 1, que cambio a más amarillo que verde al 3er y 5to día. El 7mo día se visualizó la aparición de manchas marrones no tan pronunciadas, pero se mantuvo la coloración verde. Al retirar la cáscara se mostraron manchas marrones leves en ambos frutos. Las muestras F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr tuvieron un comportamiento similar, puesto que en todas la muestras los primeros días mostraron un coloramiento verde amarillento, pero en el quinto día se empezaron a visualizar cambios con la aparición de manchas marrones en la parte manipulada y manchas en el 7mo día, estas manchas se atribuyen a la temperatura de almacenamiento, debido a que son altamente sensibles al daño por frío cuando se exponen continuamente a temperaturas inferiores a 13 °C presentando pardeamiento en la cáscara, picaduras y falta de maduración normal (Khademi et al., 2019). Al retirar la cáscara, el fruto de F-UCl y F-POr mantuvo un color y firmeza homogénea con leves manchas, mientras que las muestra F-UOr mostraron una mancha negra y F-POr tuvo quemaduras por frío.

Figura 4.8 Plátanos almacenados a condiciones de temperatura ambiente.



Elaboración propia García. (2024).

Figura 4.9 Plátanos almacenados en refrigeración.



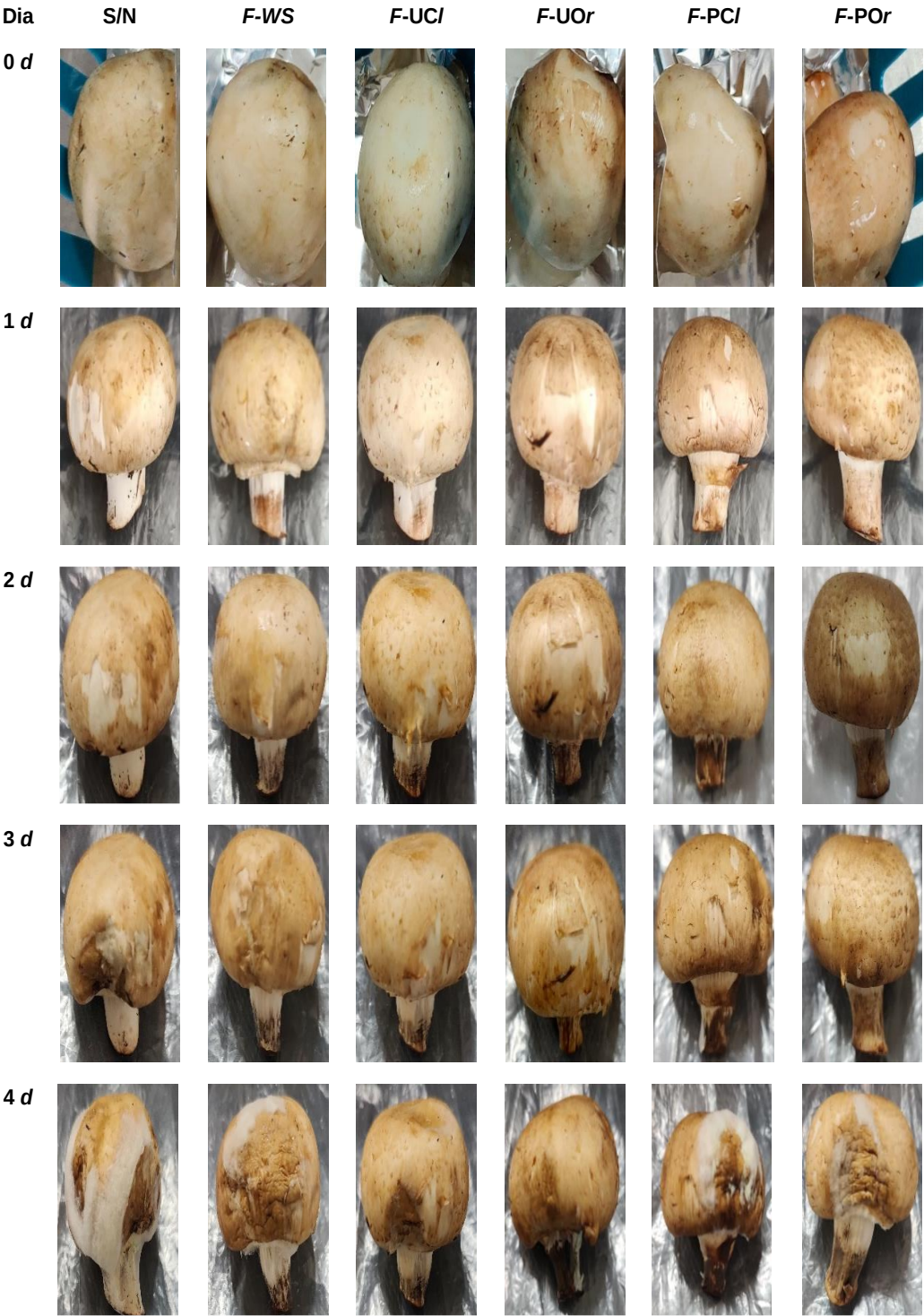
Elaboración propia García. (2024).

También, se evaluaron los cambios en peso y diámetro de los plátanos durante el periodo de almacenamiento, sin embargo, no se observan cambios significativos. Los plátanos almacenados a temperatura ambiente perdieron entre 3–4 % de peso, mientras que los que estuvieron en refrigeración tuvieron una disminución de 5-6 % de peso. El diámetro de ambos grupos se mantuvo constante ~28 cm y no se encontraron diferencias significativas entre las muestras. Estos resultados sugieren que la pérdida natural de humedad de los plátanos recubiertos podría estar influenciada por las condiciones de almacenamiento más que por las propiedades del recubrimiento, aunque hubo un cambio en la permeabilidad al vapor de agua de los recubrimientos, no fue suficiente para afectar la transferencia de agua entre el medio ambiente y los plátanos.

En la Figura 4.10 se puede visualizar el seguimiento de los champiñones almacenados en refrigeración. El champiñón sin recubrir (S/R) a temperatura ambiente mostraba una composición firme y uniforme en el 1er día. Al 3er día el champiñón presentó descomposición formando una zona blanda con color negro, este cambio se atribuye al pardeamiento enzimático de los champiñones que reaccionan con oxígeno, causando la oxidación de compuestos fenólicos y el cambio de pigmentación (Gholami et al., 2017). En el 4to día, el champiñón mostro una proliferación de moho debido a que pueden crecer dentro de un ambiente con gran cantidad de agua y nutrientes (Dagnas & Membré, 2013). La muestra F-WS mostro un comportamiento igual durante los primeros días, manteniendo su firmeza con pequeños cambios de color negro en el tallo. En el 4to día, presentó una pequeña deshidratación, reflejada por la forma rugosa de la piel, con un pequeño crecimiento de moho. Las muestras tratadas con plasma (F-PCl y F-POr) se vieron afectadas por el crecimiento de moho y su deshidratación, mientras que las muestras tratadas por ultrasonido (F-UCl, F-UOr) retrasaron este crecimiento manteniendo una forma más uniforme, el almacenamiento se mantuvo hasta el 4to día presentando una proliferación extensa de moho en la mayoría de muestras y un mal olor, probablemente debido al hecho de que la alta barrera de gas elevaba la concentración de CO₂ en el interior del recubrimiento, lo que provocaba una respiración anaeróbica y una mayor producción de olores (Song et al., 2024).

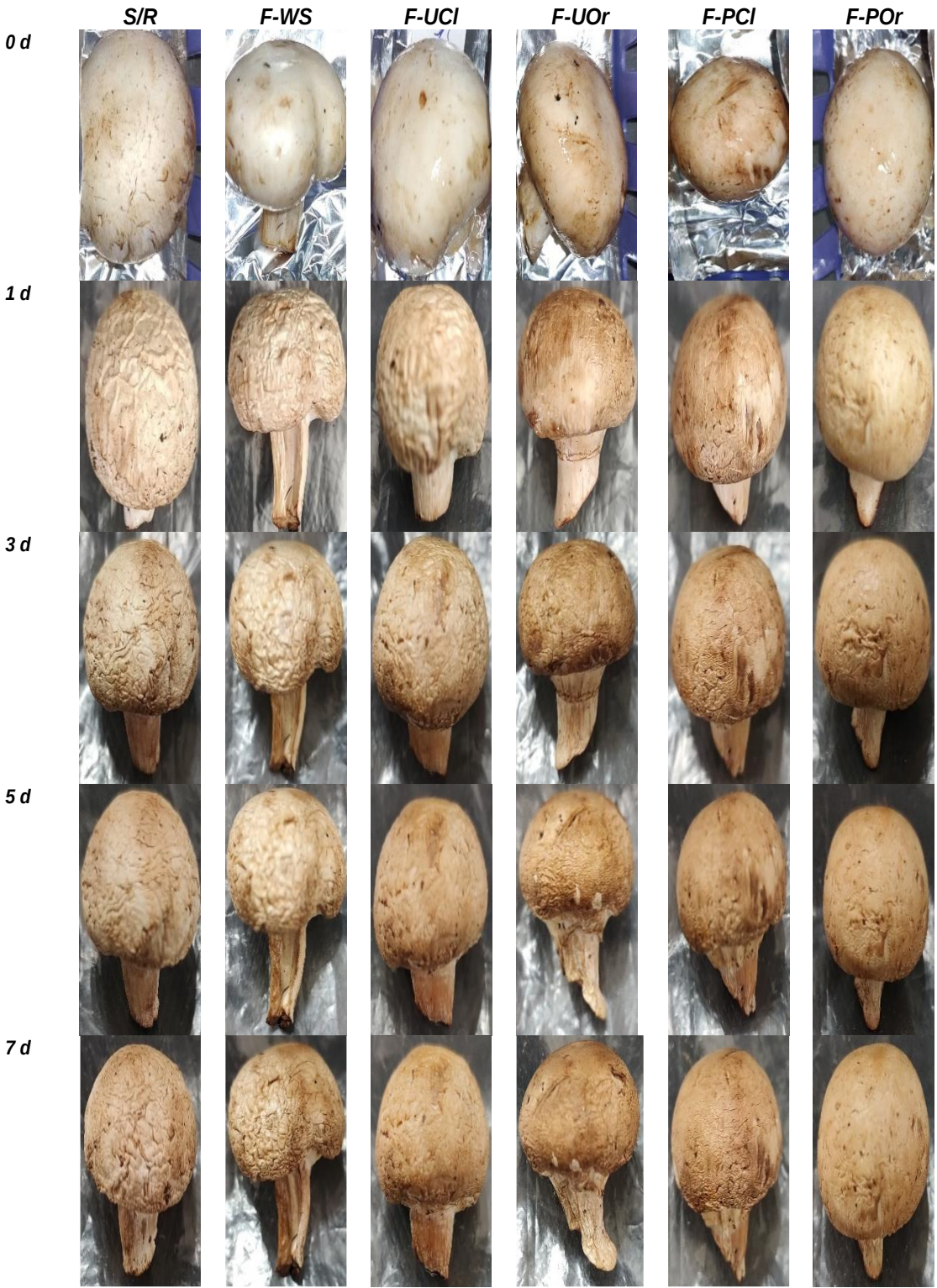
Por otro lado, las muestras S/R, F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr de los champiñones en refrigeración (Figura 4.11) mantenían su coloración blanco-amarillenta durante todo el almacenamiento, la mayoría de las muestras presentaron una pérdida de tamaño y forma por la deshidratación exceptuando a F-POr la cual mostró una composición más uniforme desde el primer día hasta el último. Estas pérdidas de agua del champiñón son por su estructura epidérmica muy delgada, que lo hace propenso a la pérdida agua (Zalewska et al., 2018).

Figura 4.10 Champiñones almacenados a temperatura ambiente.



Elaboración propia García. (2024).

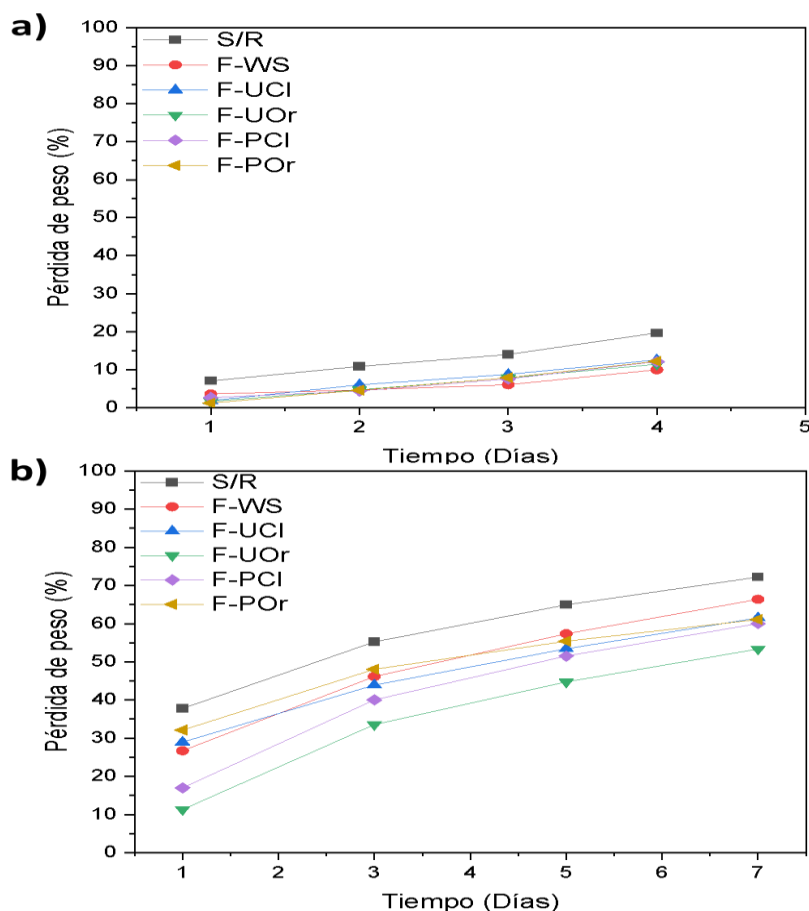
Figura 4.11 Champiñones almacenados en refrigeración.



Elaboración propia García. (2024).

Se evaluaron los cambios en peso de los champiñones durante el periodo de almacenamiento. La pérdida de peso se produjo en todos los recubrimientos incrementando durante el almacenamiento. Los champiñones a temperatura ambiente perdieron aproximadamente 2-4 g (Figura 4.12a), mientras que los refrigerados perdían más del 50% de su peso (Figura 4.12b). El tipo de recubrimiento también tuvo un efecto en la pérdida de peso en los champiñones. La mayor pérdida de peso fue en los champiñones refrigerados, el champiñón sin recubrimiento perdió el 72% de su peso después de 7 días de almacenamiento se observó que las muestras recubiertas (F-WS, F-UCI, F-UOr, F-PCI y F-POr) manteniendo su pérdida a ~60%. La menor pérdida de peso después de 7 días de almacenamiento se observó en la muestra F-UOr con un ~53% en comparación con las muestras S/R y F-WS. Cho & Koseki, (2021) sugirieron que la deshidratación es un proceso importante en la pérdida de calidad del champiñón durante el almacenamiento. El recubrimiento de F-UOr redujo la pérdida de peso en el champiñón para las muestras refrigeradas, mientras que en temperatura ambiente fue la que tuvo la menor pérdida de peso en comparación a las muestras F-UCI, F-PCI y F-POr.

Figura 4.12 Pérdida de peso en champiñones en los días 1,3,5 y 7 a) Champiñones almacenados en temperatura ambiente, b) Champiñones almacenados en refrigeración.



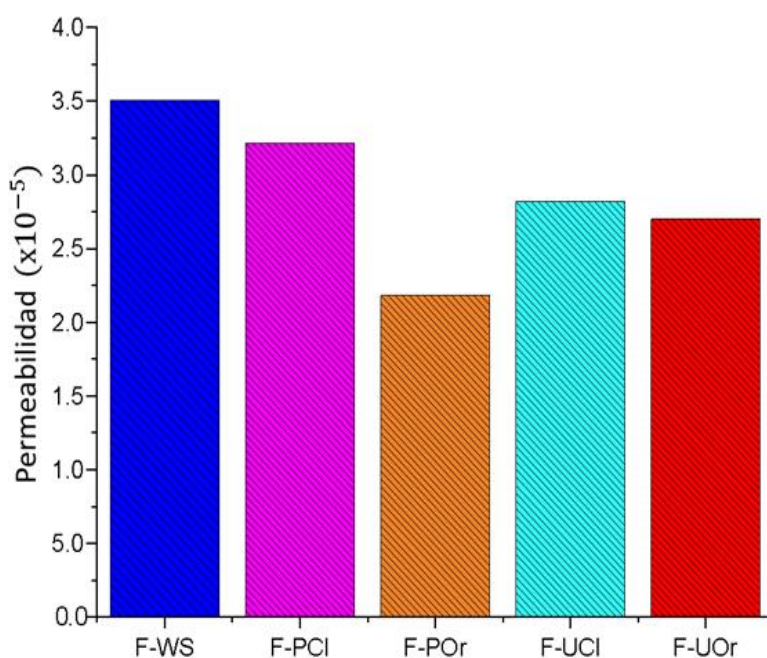
Elaboración propia García. (2024).

4.7 Permeabilidad al vapor de agua (WVP)

Se evaluó la permeabilidad al vapor de agua de las películas F-WS, F-UCl, F-UOr, F-PCl y F-POr, para la determinación de la capacidad de transferencia de agua entre los alimentos perecederos y el medio ambiente. En la Figura 4.13 se observó que la película F-WS posee una mayor cantidad de intercambio de agua con el exterior esto debido a la composición higroscópica del almidón y el carácter hidrofílico del glicerol, como resultado se tendrá una mayor difusión del agua, lo que dará películas con un WVP más alto (Al-Hassan & Norziah, 2012). esto concuerda con estudios anteriores donde explican que la naturaleza fuertemente higroscópica de las películas de almidón, junto con la influencia del glicerol, hace que la matriz de la película pueda absorber suficiente agua, especialmente cuando está expuesta al lado de alta humedad relativa (Bertuzzi et al., 2007).

la adición de IC en las películas mostro una reducción de vapor de agua en F-UCl, F-PCl, F-UOr y F-POr. Debido a las interacciones intermoleculares del almidón y la adición de los IC, formando enlaces de hidrógeno intermoleculares entre los grupos hidroxilo de los IC y los grupos hidroxilo de las moléculas de almidón (J. Li et al., 2023). Además, la disminución de la permeabilidad en F-UOr y F-POr puede deberse a la presencia de la fase hidrofóbica del EO-Or que conduce a una disminución de la afinidad de la película por el agua (Al-Hashimi et al., 2020).

Figura 4.13 Permeabilidad al vapor de agua en películas con IC.



Elaboración propia García. (2024).

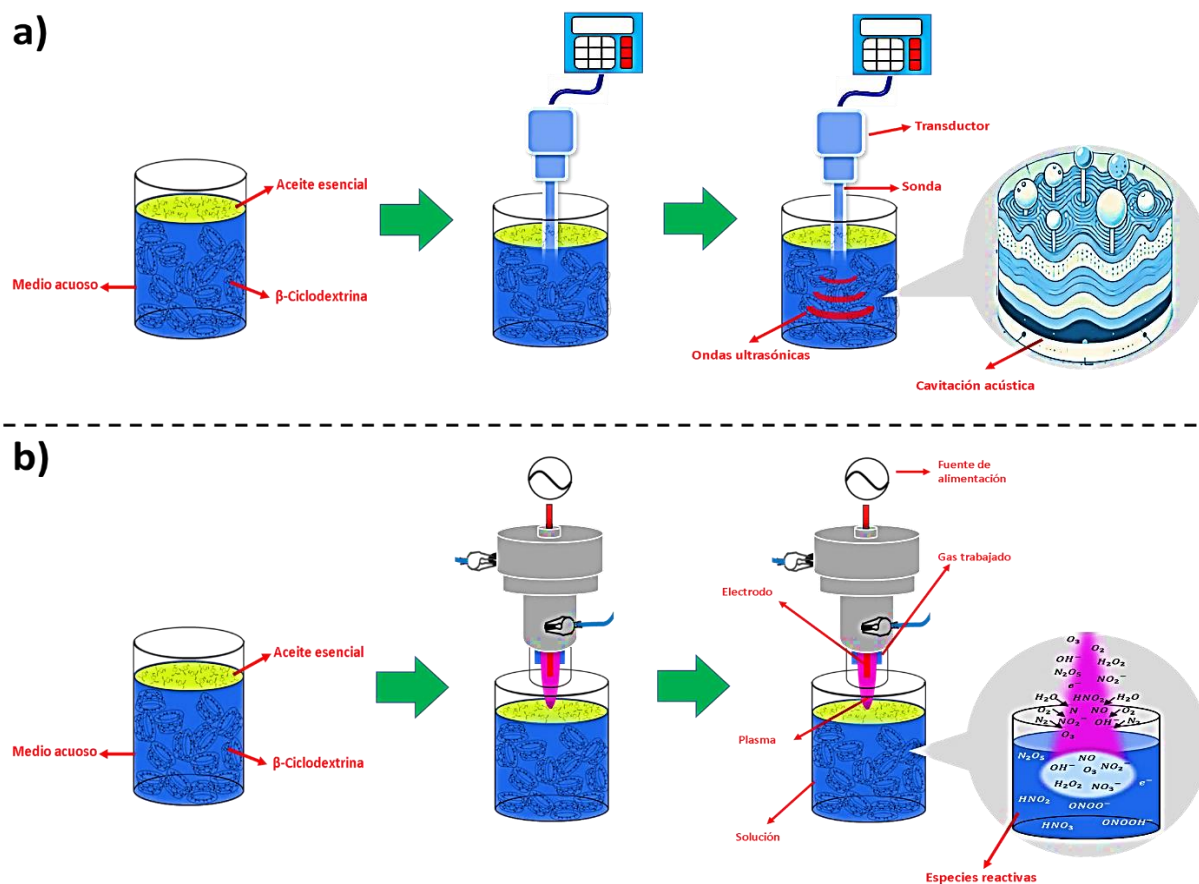
4.8 Mecanismo de formación de los complejos de inclusión

Se presentará una propuesta de mecanismo para la encapsulación de aceites esenciales en β -ciclodextrina.

La Figura 4.14a muestra cómo el ultrasonido genera lo que se conoce como cavitación acústica, la cual es la energía ultrasónica que genera ondas de presión en el medio acuoso, creando burbujas de cavitación que colapsan. Este colapso provoca la formación de microjets y regiones de alta presión y temperatura.

El plasma frío se genera a través de la ionización de un gas, utilizando una fuente de energía externa que produce una mezcla activa de partículas altamente reactivas como radicales libres, especies ionizadas y electrones como se observa en la Figura 4.14b. Estas especies reactivas interactúan con las moléculas de aceite esencial, lo que podría facilitar la encapsulación con la cavidad hidrofóbica de la β -ciclodextrina.

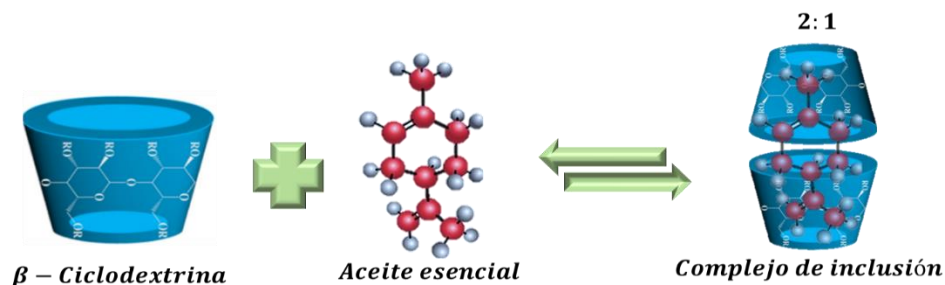
Figura 4.14 Métodos para la formación de IC, a) Ultrasonido y b) Plasma frío.



4.8.1 Formación de complejo de inclusión

La función principal de las ciclodextrinas (CDs) consiste en encapsular compuestos volátiles. La Figura 4.15 muestra una representación esquemática de la formación del IC en una relación 2:1 CD:EO.

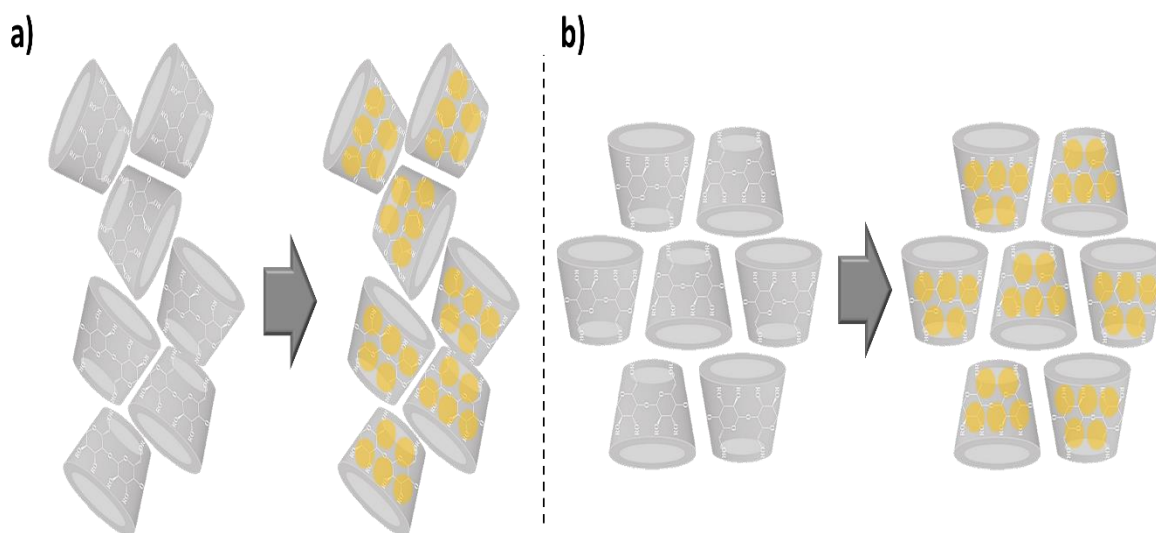
Figura 4.15 Representación esquemática de la formación del complejo de inclusión de ciclodextrina (IC).



Elaboración propia García. (2024).

De acuerdo con las micrografías MEB obtenidas de los IC formados se propone la siguiente forma de encapsulación y su liberación. No se observó un efecto por el tipo de metodología empleado para la formación de complejo. Las diferencias están atribuidas al tipo de aceite esencial utilizado. Los IC de aceite de naranja mostraron una estructura de tipo jaula (Figura 4.16a), por su forma aglomerada y menos organizada, mientras que los IC de aceite esencial de clavo se le atribuyó una encapsulación en forma de capa (Figura 4.16b) debido a que las moléculas invitadas se organizaron en patrones más ordenados.

Figura 4.16 Representación esquemática de las estructuras de IC del tipo a) jaula para aceite esencial de naranja y b) tipo capa para aceite esencial de clavo.

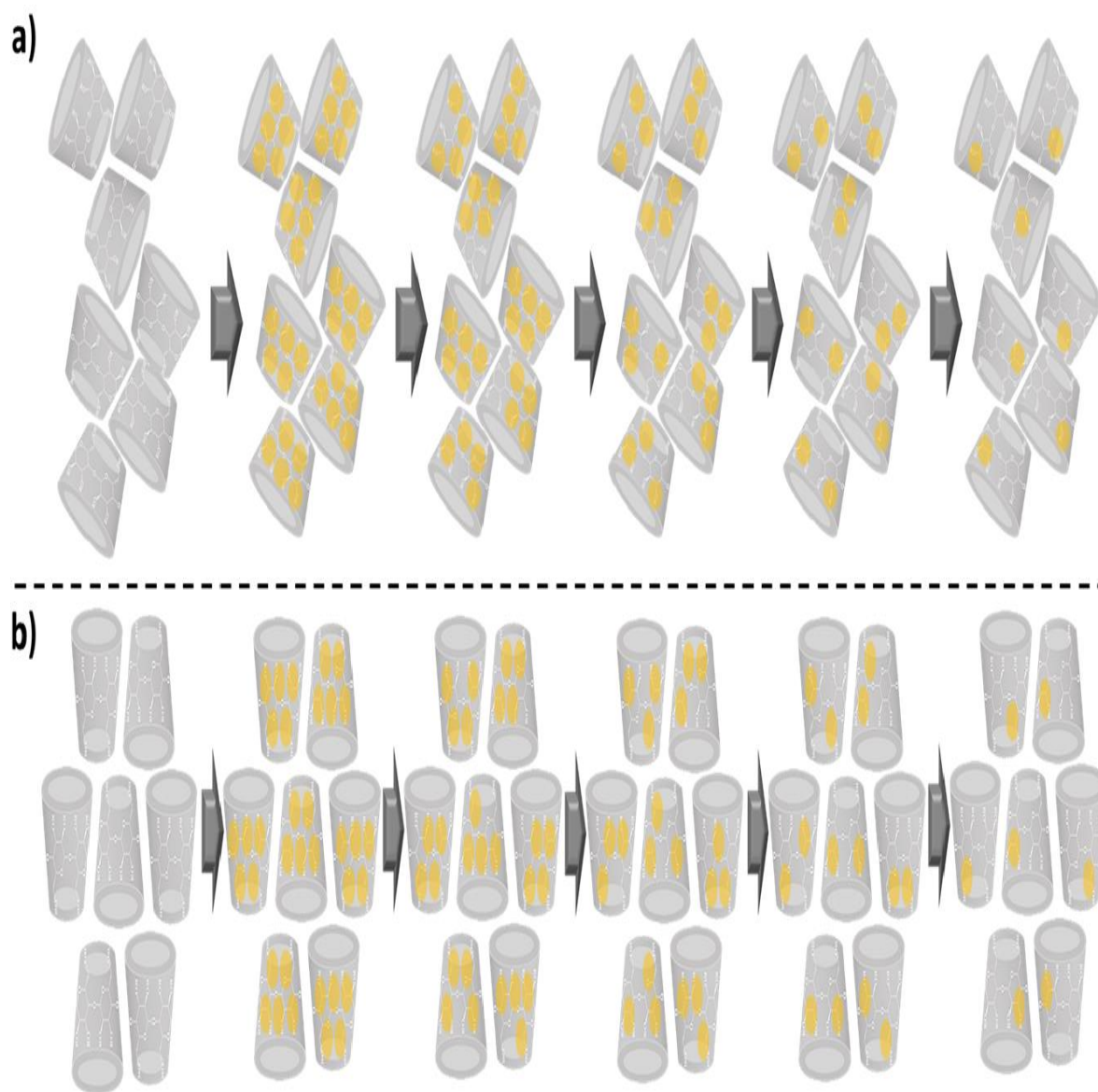


Elaboración propia García. (2024).

4.8.2 La liberación del aceite esencial de un IC

Ocurre por difusión pasiva gradualmente como se muestra en la Figura 4.17, dependiendo de varios factores, como la interacción entre el aceite esencial y la β -ciclodextrina o el ambiente donde ocurre la liberación. Este mecanismo no requiere ninguna energía externa. Las moléculas del aceite esencial se difunden lentamente desde la cavidad interna de la β -ciclodextrina hacia el medio circundante siguiendo un gradiente de concentración.

Figura 4.17 Difusión del proceso de liberación controlada del aceite esencial de la cavidad de la β -Ciclodextrina a) IC de aceite esencial de naranja y b) IC aceite esencial de clavo.



Elaboración propia García. (2024).

CONCLUSIÓN

Los resultados de este estudio demostraron la formación de complejos de inclusión entre la β -CD y los aceites esenciales de clavo y naranja por los métodos de ultrasonido y plasma en una relación 2:1. Los resultados de los análisis FT-IR, DSC, TGA y MEB confirmaron la encapsulación de los aceites esenciales en la cavidad de la β -CD. El análisis FT-IR mostró la desaparición de los picos característicos de aceites esenciales después de la complejación, lo cual también se vio reflejado con el desplazamiento de ciertos picos característicos de la β -CD. Los IC se confirmaron mediante las técnicas de TGA y DSC, que demostraron el reemplazo de las moléculas de agua por los aceites esenciales, mejorando la estabilidad volátil de los EO. Las micrografías MEB mostraron similitud en los IC elaborados con el mismo aceite esencial, lo que sugiere que hubo efecto en la morfología por el tipo de metodología empleada.

La estructura morfológica (MEB) de las películas activas, mostraban una superficie lisa, sin la presencia de hoyos, lo que sugiere una buena adherencia de los IC a la matriz de polimérica. Los análisis DRX demostró que la adición de los IC hizo que los recubrimientos tuvieran una estructura cristalina. Los recubrimientos adicionados con IC mostraron una prolongación de vida útil en plátanos y champiñones. Los recubrimientos obtenidos por ultrasonido (F-UCl y F-UOr) retrasaron la maduración de los plátanos, a través de la disminución de puntos marrones. Por otro lado, los recubrimientos obtenidos por plasma (F-PCl y F-POr) tuvieron la presencia de una mancha marrón grande en la cáscara de los plátanos, debida posiblemente a radicales libres que están encapsulados.

Los champiñones recubiertos con IC de clavo (F-UCl y F-PCl) mostraron una pérdida de agua en refrigeración, atribuida a su alta permeabilidad al vapor de agua, en comparación con los IC de naranja (F-UOr y F-POr), los cuales tuvieron una menor permeabilidad, pudiendo mantener la forma de los champiñones en el transcurso de los días. Además, los champiñones recubiertos con IC a temperatura ambiente demostraron propiedades antifúngicas al no tener o retrasar la proliferación de hongos. Por lo tanto, los EO de clavo y naranja mostraron un alto potencial para prolongar la vida de alimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Abhilash, M., & Thomas, D. (2017). Biopolymers for Biocomposites and Chemical Sensor Applications. In *Biopolymer Composites in Electronics* (pp. 405–435). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809261-3.00015-2>
- AgriCoat NatureSeal. (n.d.). NatureSeal para frutas y hortalizas mínimamente procesadas. Página Oficial de AgriCoat NatureSeal. Retrieved November 30, 2024, from <https://www.poscosecha.com/agriccoat-natureseal/>
- Akoh, C. C., & Min, D. B. (2002). *Food lipids : chemistry, nutrition, and biochemistry*. M. Dekker.
- Al-Hashimi, A. G., Ammar, A. B., Lakshmanan, G., Cacciola, F., & Lakhssassi, N. (2020). Development of a millet starch edible film containing clove essential oil. *Foods*, 9(2). <https://doi.org/10.3390/foods9020184>
- Al-Hassan, A. A., & Norziah, M. H. (2012). Starch-gelatin edible films: Water vapor permeability and mechanical properties as affected by plasticizers. *Food Hydrocolloids*, 26(1), 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.04.015>
- Almasi, H., Ghanbarzadeh, B., & Entezami, A. A. (2010). Physicochemical properties of starch-CMC-nanoclay biodegradable films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 46(1), 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2009.10.001>
- Alves, V. D., Mali, S., Beléia, A., & Grossmann, M. V. E. (2007). Effect of glycerol and amylose enrichment on cassava starch film properties. *Journal of Food Engineering*, 78(3), 941–946. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2005.12.007>
- Anaya-Castro, M. A., Ayala-Zavala, J. F., Muñoz-Castellanos, L., Hernández-Ochoa, L., Peydecastaing, J., & Durrieu, V. (2017). β -Cyclodextrin inclusion complexes containing clove (*Eugenia caryophyllata*) and Mexican oregano (*Lippia berlandieri*) essential oils: Preparation, physicochemical and antimicrobial characterization. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.09.002>
- Atarés, L., & Chiralt, A. (2016). Essential oils as additives in biodegradable films and coatings for active food packaging. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 48, pp. 51–62). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.12.001>

- Avebe. (n.d.). Perfectacote®: Edible coatings based on starch. Avebe. Retrieved November 30, 2024, from <https://www.avebe.com/products/perfectacote/>
- Baite, T. N., Mandal, B., & Purkait, M. K. (2022). Antioxidant-Incorporated Poly(vinyl alcohol) Coating: Preparation, Characterization, and Influence on Ripening of Green Bananas. *ACS Omega*, 7(46), 42320–42330. <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c05271>
- Bangar, S. P., Whiteside, W. S., Ashogbon, A. O., & Kumar, M. (2021). Recent advances in thermoplastic starches for food packaging: A review. In *Food Packaging and Shelf Life* (Vol. 30). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100743>
- Barandiaran, A., Montanes, N., Gomez-Caturla, J., Balart, R., Florez-Prieto, M. A., Ávila-Martin, L., & Perilla, J. E. (2024). “Development and characterization of edible films based on starch isolated from different Colombian potato varieties.” *International Journal of Biological Macromolecules*, 263. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.130165>
- Bertuzzi, M. A., Castro Vidaurre, E. F., Armada, M., & Gottifredi, J. C. (2007). Water vapor permeability of edible starch based films. *Journal of Food Engineering*, 80(3), 972–978. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.07.016>
- Bunaciu, A. A., Udriștioiu, E. gabriela, & Aboul-Enein, H. Y. (2015). X-Ray Diffraction: Instrumentation and Applications. *Critical Reviews in Analytical Chemistry*, 45(4), 289–299. <https://doi.org/10.1080/10408347.2014.949616>
- Cai, C., Ma, R., Duan, M., Deng, Y., Liu, T., & Lu, D. (2020). Effect of starch film containing thyme essential oil microcapsules on physicochemical activity of mango. *LWT*, 131. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.109700>
- Cari Nierenberg. (2015, September 3). Live Science. The Science of Essential Oils: Does Using Scents Make Sense?
- Cazón, P., Velazquez, G., Ramírez, J. A., & Vázquez, M. (2017). Polysaccharide-based films and coatings for food packaging: A review. *Food Hydrocolloids*, 68, 136–148. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.09.009>

- Cerqueira, M. A., Souza, B. W. S., Teixeira, J. A., & Vicente, A. A. (2012). Effect of glycerol and corn oil on physicochemical properties of polysaccharide films - A comparative study. *Food Hydrocolloids*, 27(1), 175–184. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2011.07.007>
- Chang, Q., Zheng, B., Zhang, Y., & Zeng, H. (2021). A comprehensive review of the factors influencing the formation of retrograded starch. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 186, pp. 163–173). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.050>
- Chen, C., & Zhu, F. (2024). Molecular structure in relation to swelling, gelatinization, and rheological properties of lotus seed starch. *Food Hydrocolloids*, 146. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109259>
- Chen, G., & Liu, B. (2016). Cellulose sulfate based film with slow-release antimicrobial properties prepared by incorporation of mustard essential oil and β -cyclodextrin. *Food Hydrocolloids*, 55, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2015.11.009>
- Chizoba Ekezie, F. G., Sun, D. W., Han, Z., & Cheng, J. H. (2017). Microwave-assisted food processing technologies for enhancing product quality and process efficiency: A review of recent developments. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 67, pp. 58–69). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2017.05.014>
- Cho, B. H., & Koseki, S. (2021). Determination of banana quality indices during the ripening process at different temperatures using smartphone images and an artificial neural network. *Scientia Horticulturae*, 288. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2021.110382>
- Choudhury, A., Sarma, S., Sarkar, S., Kumari, M., & Dey, B. K. (2022). Polysaccharides Obtained from Vegetables: An effective source of alternative excipient. In *Journal of Pharmacopuncture* (Vol. 25, Issue 4, pp. 317–326). Korean Pharmacopuncture Institute. <https://doi.org/10.3831/KPI.2022.25.4.317>
- Cid-Samamed, A., Rakmai, J., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J., & Astray, G. (2022a). Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. In *Food Chemistry* (Vol. 384). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132467>

- Cid-Samamed, A., Rakmai, J., Mejuto, J. C., Simal-Gandara, J., & Astray, G. (2022b). Cyclodextrins inclusion complex: Preparation methods, analytical techniques and food industry applications. In *Food Chemistry* (Vol. 384). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2022.132467>
- Copeland, L., Blazek, J., Salman, H., & Tang, M. C. (2009). Form and functionality of starch. *Food Hydrocolloids*, 23(6), 1527–1534. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2008.09.016>
- Costa, D. C., Costa, H. S., Albuquerque, T. G., Ramos, F., Castilho, M. C., & Sanches-Silva, A. (2015). Advances in phenolic compounds analysis of aromatic plants and their potential applications. *Trends in Food Science and Technology*, 45(2), 336–354. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.06.009>
- Cui, C., Ji, N., Wang, Y., Xiong, L., & Sun, Q. (2021). Bioactive and intelligent starch-based films: A review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 116, pp. 854–869). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2021.08.024>
- da Silva, W. F., dos Santos Niculau, E., de Oliveira, D. A. B., de Assis, M. W. V., & Oliveira, M. N. (2023). Preparation, physicochemical characterization and computational studies of *Plectranthus ornatus* codd essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex. *Journal of Molecular Structure*, 1285. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2023.135476>
- Dagnas, S. P., & Membré, J. M. (2013). Predicting and preventing mold spoilage of food products. In *Journal of Food Protection* (Vol. 76, Issue 3, pp. 538–551). <https://doi.org/10.4315/0362-028X.JFP-12-349>
- Das, S., Vishakha, K., Banerjee, S., Mondal, S., & Ganguli, A. (2020). Sodium alginate-based edible coating containing nanoemulsion of *Citrus sinensis* essential oil eradicates planktonic and sessile cells of food-borne pathogens and increased quality attributes of tomatoes. *International Journal of Biological Macromolecules*, 162, 1770–1779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.086>
- de Almeida, V. S., Barretti, B. R. V., Ito, V. C., Malucelli, L., da Silva Carvalho Filho, M. A., Demiate, I. M., Pinheiro, L. A., & Lacerda, L. G. (2020). Thermal, morphological, and mechanical properties of regular and waxy maize starch films reinforced with cellulose nanofibers (CNF). *Materials Research*, 23(2). <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2019-0576>

- de Araújo, J. S. F., de Souza, E. L., Oliveira, J. R., Gomes, A. C. A., Kotzebue, L. R. V., da Silva Agostini, D. L., de Oliveira, D. L. V., Mazzetto, S. E., da Silva, A. L., & Cavalcanti, M. T. (2020). Microencapsulation of sweet orange essential oil (*Citrus aurantium* var. *dulcis*) by liophylization using maltodextrin and maltodextrin/gelatin mixtures: Preparation, characterization, antimicrobial and antioxidant activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 143, 991–999. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.09.160>
- de Santana, N. A., da Silva, R. C. S., Fourmentin, S., dos Anjos, K. F. L., Ootan, M. A., da Silva, A. G., Pereira Araújo, B. G., dos Santos Correia, M. T., da Silva, M. V., & Machado, G. (2020). Synthesis, characterization and cytotoxicity of the *Eugenia brejoensis* essential oil inclusion complex with β -cyclodextrin. *Journal of Drug Delivery Science and Technology*, 60. <https://doi.org/10.1016/j.jddst.2020.101876>
- de Souza, A. G., dos Santos, N. M. A., da Silva Torin, R. F., & dos Santos Rosa, D. (2020). Synergic antimicrobial properties of Carvacrol essential oil and montmorillonite in biodegradable starch films. *International Journal of Biological Macromolecules*, 164, 1737–1747. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.07.226>
- Devi, L. S., Jaiswal, A. K., & Jaiswal, S. (2024). Lipid incorporated biopolymer based edible films and coatings in food packaging: A review. In *Current Research in Food Science* (Vol. 8). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2024.100720>
- do Evangelho, J. A., da Silva Dannenberg, G., Biduski, B., el Halal, S. L. M., Kringel, D. H., Gularte, M. A., Fiorentini, A. M., & da Rosa Zavareze, E. (2019). Antibacterial activity, optical, mechanical, and barrier properties of corn starch films containing orange essential oil. *Carbohydrate Polymers*, 222. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.114981>
- Dupont. (n.d.). Edible coatings for food packaging. Dupont. Retrieved November 30, 2024, from <https://www.dupont.com/packaging-materials-and-solutions/food-packaging.html>
- Farahnaky, A., Saberi, B., & Majzoobi, M. (2013). Effect of glycerol on physical and mechanical properties of wheat starch edible films. *Journal of Texture Studies*, 44(3), 176–186. <https://doi.org/10.1111/jtxs.12007>

- Fischer, E. R., Hansen, B. T., Nair, V., Hoyt, F. H., & Dorward, D. W. (2012). Scanning Electron Microscopy. *Current Protocols in Microbiology*, 25(1). <https://doi.org/10.1002/9780471729259.mc02b02s25>
- Fizer, M. M., Mariychuk, R. T., & Fizer, O. I. (2022). Gold nanoparticles green synthesis with clove oil: spectroscopic and theoretical study. *Applied Nanoscience (Switzerland)*, 12(3), 611–620. <https://doi.org/10.1007/s13204-021-01726-6>
- Flores-Silva, P. C., Aguilar-Padilla, G., Sifuentes-Nieves, I., González-Morones, P., Ledezma-Pérez, A., Hernández-Hernández, E., & Ramírez-Vargas, E. (2023). Post-consumer Recycled PET Active Films Containing β -Cyclodextrins-Based Inclusion Complexes with Essential Oils: A Comparative Study between Processing Methodologies. *Journal of Polymers and the Environment*. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03147-8>
- Flores-Silva, P. C., Hernández-Hernández, E., Sifuentes-Nieves, I., Lara-Sánchez, J. F., Ledezma-Pérez, A. S., Alvarado-Canché, C. N., & Ramírez-Vargas, E. (2023). Active Mono-Material Films from Natural and Post-consumer Recycled Polymers with Essential Oils for Food Packaging Applications. *Journal of Polymers and the Environment*, 31(12), 5198–5209. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-02943-6>
- Food and Agriculture Organization. (2014). Food wastage footprint full-cost accounting : final report. <https://www.fao.org/3/i3991e/i3991e.pdf>
- Galvão, J. G., Silva, V. F., Ferreira, S. G., França, F. R. M., Santos, D. A., Freitas, L. S., Alves, P. B., Araújo, A. A. S., Cavalcanti, S. C. H., & Nunes, R. S. (2015). β -cyclodextrin inclusion complexes containing *Citrus sinensis* (L.) Osbeck essential oil: An alternative to control *Aedes aegypti* larvae. *Thermochimica Acta*, 608, 14–19. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.04.001>
- Gholami, R., Ahmadi, E., & Farris, S. (2017). Shelf life extension of white mushrooms (*Agaricus bisporus*) by low temperatures conditioning, modified atmosphere, and nanocomposite packaging material. *Food Packaging and Shelf Life*, 14, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2017.09.001>
- González-Torres, B., Robles-García, M. Á., Gutiérrez-Lomelí, M., Padilla-Frausto, J. J., Navarro-Villarruel, C. L., Del-Toro-sánchez, C. L., Rodríguez-Félix, F., Barrera-Rodríguez, A., Reyna-Villela, M. Z., Avila-Novoa, M. G., & Reynoso-Marín, F. J. (2021). Combination of sorbitol

- and glycerol, as plasticizers, and oxidized starch improves the physicochemical characteristics of films for food preservation. *Polymers*, 13(19). <https://doi.org/10.3390/polym13193356>
- Guan, Y., Zhang, J., Zhang, J., Song, W., Shi, J., Huang, X., Zhai, X., Zhang, D., Li, Z., & Zou, X. (2024a). Preparation of active film based on cinnamon essential oil into β -cyclodextrin with high hydrophobic and its preservation for griskin. *Food Control*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110344>
- Guan, Y., Zhang, J., Zhang, J., Song, W., Shi, J., Huang, X., Zhai, X., Zhang, D., Li, Z., & Zou, X. (2024b). Preparation of active film based on cinnamon essential oil into β -cyclodextrin with high hydrophobic and its preservation for griskin. *Food Control*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110344>
- Gustavsson, J., Cederberg, C., & Sonesson, U. (2011). Global Food Losses and Food Waste.
- Gutiérrez, T. J., Tapia, M. S., Pérez, E., & Famá, L. (2015). Edible films based on native and phosphated 80:20 waxy:normal corn starch. *Starch/Staerke*, 67(1–2), 90–97. <https://doi.org/10.1002/star.201400164>
- Hădărugă, N. G., Bandur, G. N., David, I., & Hădărugă, D. I. (2019). A review on thermal analyses of cyclodextrins and cyclodextrin complexes. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 17, Issue 1, pp. 349–373). Springer Verlag. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0806-8>
- Hage, M., Khelissa, S., Akoum, H., Chihib, N. E., & Jama, C. (2022). Cold plasma surface treatments to prevent biofilm formation in food industries and medical sectors. In *Applied Microbiology and Biotechnology* (Vol. 106, Issue 1, pp. 81–100). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11715-y>
- Hassan, B., Chatha, S. A. S., Hussain, A. I., Zia, K. M., & Akhtar, N. (2018). Recent advances on polysaccharides, lipids and protein based edible films and coatings: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 109, pp. 1095–1107). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2017.11.097>
- Hoover, R. (2021). Composition, molecular structure, and physicochemical properties of tuber and root starches: a review. www.elsevier.com/locate/carbpol

- Huang, J., Pu, J., Yang, Z., Zhang, S., Zhang, Z., Lu, Q., Song, D., Li, X., Fang, Z., Liu, Y., & Hu, B. (2024). Development of a *Syzygium aromaticum*, L. essential oil/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex: Preparation, characterization, and evaluation. *Industrial Crops and Products*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118500>
- Ingredion. (n.d.). Edible coatings and their applications for food safety. Ingredion. Retrieved November 30, 2024, from <https://www.ingredion.com/na/en-us/categories/food/batters-breadings.html>
- Jamróz, E., Juszczak, L., & Kucharek, M. (2018). Investigation of the physical properties, antioxidant and antimicrobial activity of ternary potato starch-furcellaran-gelatin films incorporated with lavender essential oil. *International Journal of Biological Macromolecules*, 114, 1094–1101. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.04.014>
- Junejo, S. A., Flanagan, B. M., Zhang, B., & Dhital, S. (2022). Starch structure and nutritional functionality – Past revelations and future prospects. *Carbohydrate Polymers*, 277. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2021.118837>
- Kadam, A. A., Singh, S., & Gaikwad, K. K. (2021). Chitosan based antioxidant films incorporated with pine needles (*Cedrus deodara*) extract for active food packaging applications. *Food Control*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2021.107877>
- Khademi, O., Ashtari, M., & Razavi, F. (2019). Effects of salicylic acid and ultrasound treatments on chilling injury control and quality preservation in banana fruit during cold storage. *Scientia Horticulturae*, 249, 334–339. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2019.02.018>
- Kong, P., Zulfikar, A., Thangunpai, K., Masuo, S., Abe, J. P., & Enomae, T. (2024). Efficient encapsulation of Hinoki essential oil with β -cyclodextrin using an ultrasound-aided coprecipitation technique for dual anti-*Listeria monocytogenes* and anti-*Staphylococcus aureus* activities. *International Journal of Biological Macromolecules*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.132382>
- Kraśniewska, K., Pobiega, K., & Gniewosz, M. (2019). Pullulan-Biopolymer with Potential for Use as Food Packaging. *International Journal of Food Engineering*, 15(9). <https://doi.org/10.1515/ijfe-2019-0030>

Kringel, D., Colussi, R., Dias, A., & Zavareze, E. (n.d.). ORANGE ESSENTIAL OIL INCLUSION COMPLEX WITH β -CYCLODEXTRIN.

Kringel, D. H., Antunes, M. D., Klein, B., Crizel, R. L., Wagner, R., de Oliveira, R. P., Dias, A. R. G., & Zavareze, E. da R. (2017). Production, Characterization, and Stability of Orange or Eucalyptus Essential Oil/ β -Cyclodextrin Inclusion Complex. *Journal of Food Science*, 82(11), 2598–2605. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13923>

Kumar, A., Škoro, N., Gernjak, W., & Puač, N. (2021). Cold atmospheric plasma technology for removal of organic micropollutants from wastewater—a review. *European Physical Journal D*, 75(11). <https://doi.org/10.1140/epjd/s10053-021-00283-5>

Kupervaser, M. G., Traffano-Schiffo, M. V., Dellamea, M. L., Flores, S. K., & Sosa, C. A. (2023). Trends in starch-based edible films and coatings enriched with tropical fruits extracts: a review. In *Food Hydrocolloids for Health* (Vol. 4). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.fhfh.2023.100138>

Li, J., Bao, Y., Li, Z., Cui, H., Jiang, Q., Hou, C., Wang, Y., Wu, Y., Shang, J., Xiao, Y., Shu, C., Wang, Y., Wen, B., Si, X., & Li, B. (2023). Dual-function β -cyclodextrin/starch-based intelligent film with reversible responsiveness and sustained bacteriostat-releasing for food preservation and monitoring. *International Journal of Biological Macromolecules*, 253. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.127168>

Li, Y., Wu, C., Wu, T., Wang, L., Chen, S., Ding, T., & Hu, Y. (2018). Preparation and characterization of citrus essential oils loaded in chitosan microcapsules by using different emulsifiers. *Journal of Food Engineering*, 217, 108–114. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2017.08.026>

Li, Z., Jiang, X., Zhu, L., Chen, F., Liu, H., & Ming, L. (2022). New insights into the thermal degradation behavior of Hydroxypropyl-beta-cyclodextrin inclusion complexes containing carvacrol essential oil via thermogravimetric analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 147(20), 11301–11312. <https://doi.org/10.1007/s10973-022-11327-2>

Liu, Y., Weng, L., Lin, Y., Lin, D., Xie, L., & Zhong, T. (2023). Carvacrol/ β -cyclodextrin inclusion complex as a fumigant to control decay caused by *Penicillium digitatum* on Shatangju mandarin slices. *Heliyon*, 9(8). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18804>

- Luo, X., Zeng, L., Li, Q., Wang, Z., Kong, F., & Bi, Y. (2022). β -cyclodextrin inclusion complex containing essential oil from wampee [*Clausena lansium* (Lour.) Skeels] fruit pericarp: Synthesis, characterization, and evaluation of antioxidant activity. *Journal of Molecular Structure*, 1266. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.133525>
- Ma, L., Liang, C., Cui, Y., Du, H., Liu, H., Zhu, L., Yu, Y., Lu, C., Benjakul, S., Brennan, C., & Brennan, M. A. (2022). Prediction of banana maturity based on the sweetness and color values of different segments during ripening. *Current Research in Food Science*, 5, 1808–1817. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2022.08.024>
- Marques, C. S., Carvalho, S. G., Bertoli, L. D., Villanova, J. C. O., Pinheiro, P. F., dos Santos, D. C. M., Yoshida, M. I., de Freitas, J. C. C., Cipriano, D. F., & Bernardes, P. C. (2019). β -Cyclodextrin inclusion complexes with essential oils: Obtention, characterization, antimicrobial activity and potential application for food preservative sachets. *Food Research International*, 119, 499–509. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.01.016>
- Marques, H. M. C. (2010). A review on cyclodextrin encapsulation of essential oils and volatiles. In *Flavour and Fragrance Journal* (Vol. 25, Issue 5, pp. 313–326). <https://doi.org/10.1002/ffj.2019>
- Merino, D., & Athanassiou, A. (2022). Biodegradable and Active Mulch Films: Hydrolyzed Lemon Peel Waste and Low Methoxyl Pectin Blends with Incorporated Biochar and Neem Essential Oil. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(33), 10789–10802. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c01539>
- Miyoshi, J. H., Castro, J. C., Fenelon, V. C., Garcia, F. P., Nakamura, C. V., Nogueira, A. C., Ueda-Nakamura, T., de Souza, H. M., Mangolim, C. S., Moura-Costa, G. F., & Matioli, G. (2022). Essential oil characterization of *Ocimum basilicum* and *Syzygium aromaticum* free and complexed with β -cyclodextrin. Determination of its antioxidant, antimicrobial, and antitumoral activities. *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry*, 102(1–2), 117–132. <https://doi.org/10.1007/s10847-021-01107-0>
- Mulla, M., Ahmed, J., Al-Attar, H., Castro-Aguirre, E., Arfat, Y. A., & Auras, R. (2017). Antimicrobial efficacy of clove essential oil infused into chemically modified LLDPE film for chicken meat packaging. *Food Control*, 73, 663–671. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2016.09.018>

- Nagase America. (n.d.). Pullulan: A natural polymer for edible coatings. Página Oficial de Nagase America. Retrieved November 30, 2024, from <https://nagaseamerica.com/product/pullulan/>
- Nandiyanto, A. B. D., Ragadhita, R., & Fiandini, M. (2022). Interpretation of Fourier Transform Infrared Spectra (FTIR): A Practical Approach in the Polymer/Plastic Thermal Decomposition. *Indonesian Journal of Science and Technology*, 8(1), 113–126. <https://doi.org/10.17509/ijost.v8i1.53297>
- Ng, H. M., Saidi, N. M., Omar, F. S., Ramesh, K., Ramesh, S., & Bashir, S. (2018). Thermogravimetric Analysis of Polymers. In *Encyclopedia of Polymer Science and Technology* (pp. 1–29). Wiley. <https://doi.org/10.1002/0471440264.pst667>
- Paiva-Santos, A. C., Ferreira, L., Peixoto, D., Silva, F., Soares, M. J., Zeinali, M., Zafar, H., Mascarenhas-Melo, F., Raza, F., Mazzola, P. G., & Veiga, F. (2022). Cyclodextrins as an encapsulation molecular strategy for volatile organic compounds— Pharmaceutical applications. In *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* (Vol. 218). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2022.112758>
- Peerzada Gh, J., Sinclair, B. J., Perinbarajan, G. K., Dutta, R., Shekhawat, R., Saikia, N., Chidambaram, R., & Mossa, A. T. (2023). An overview on smart and active edible coatings: safety and regulations. In *European Food Research and Technology* (Vol. 249, Issue 8, pp. 1935–1952). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s00217-023-04273-2>
- Phan, C., Do, T., & Thuong, T. (2024). Two inclusion complexes of cinnamon essential oil and lemongrass essential oil with β -CD: preparation, characterisation and effect on the preservation of mango fruits. *International Journal of Food Science and Technology*. <https://doi.org/10.1111/ijfs.16893>
- Pipliya, S., Kumar, S., Babar, N., & Srivastav, P. P. (2023). Recent trends in non-thermal plasma and plasma activated water: Effect on quality attributes, mechanism of interaction and potential application in food & agriculture. In *Food Chemistry Advances* (Vol. 2). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.focha.2023.100249>

- Piyasena, P., Mohareb, E., & McKellar, R. C. (2003). Inactivation of microbes using ultrasound: A review. In *International Journal of Food Microbiology* (Vol. 87, Issue 3, pp. 207–216). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0168-1605\(03\)00075-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1605(03)00075-8)
- Principato, L., Mattia, G., Di Leo, A., & Pratesi, C. A. (2021). The household wasteful behaviour framework: A systematic review of consumer food waste. *Industrial Marketing Management*, 93, 641–649. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2020.07.010>
- Qin, Z., Jiang, Q., Chen, M., Li, J., Li, Y., & Zhang, H. (2024). An easy-to-clean nanofiber coating containing zanthoxylum bungeanum essential oil/ β -cyclodextrin inclusion complex for the preservation of mangoes. *Food Control*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2024.110326>
- Rahmadi Putri, T., Adhitasari, A., Paramita, V., Endy Yulianto, M., & Dwi Ariyanto, H. (2023). Effect of different starch on the characteristics of edible film as functional packaging in fresh meat or meat products: A review. *Materials Today: Proceedings*, 87, 192–199. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.396>
- Ribeiro, A. M., Estevinho, B. N., & Rocha, F. (2021). Preparation and Incorporation of Functional Ingredients in Edible Films and Coatings. <https://doi.org/10.1007/s11947-020-02528-4>/Published
- Ribeiro-Santos, R., Andrade, M., Melo, N. R. de, & Sanches-Silva, A. (2017). Use of essential oils in active food packaging: Recent advances and future trends. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 61, pp. 132–140). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2016.11.021>
- Ribeiro-Santos, R., Carvalho-Costa, D., Cavaleiro, C., Costa, H. S., Albuquerque, T. G., Castilho, M. C., Ramos, F., Melo, N. R., & Sanches-Silva, A. (2015). A novel insight on an ancient aromatic plant: The rosemary (*Rosmarinus officinalis* L.). *Trends in Food Science and Technology*, 45(2), 355–368. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.07.015>
- Rica, C., Céspedes, R., Tapia Fernández, C. , Cecilia, A., Brenes, C., De, P. E., De, L. C., De, F., De, B., Que, A., Produce, S. E., El, E. N., & De Turrialba, C. (2010). InterSedes: Revista de las Sedes Regionales. 20, 107–127. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=66619992007>

- Rojas, M. M., Sánchez, Y., Abreu, Y., Espinosa, I., Correa Ii, T. M., & Pino, O. (2012). Caracterización química y actividad antibacteriana de aceites esenciales de *Ocimum basilicum* L. y *Ocimum basilicum* var. *genovese* L. In *Rev. Protección Veg* (Vol. 27, Issue 2).
- Schick, C. (2009). Differential scanning calorimetry (DSC) of semicrystalline polymers. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 395(6), 1589–1611. <https://doi.org/10.1007/s00216-009-3169-y>
- Senturk Parreidt, T., Müller, K., & Schmid, M. (2018). Alginate-Based Edible Films and Coatings for Food Packaging Applications. *Foods*, 7(10), 170. <https://doi.org/10.3390/foods7100170>
- Seo, E. J., Min, S. G., & Choi, M. J. (2010). Release characteristics of freeze-dried eugenol encapsulated with β -cyclodextrin by molecular inclusion method. *Journal of Microencapsulation*, 27(6), 496–505. <https://doi.org/10.3109/02652041003681398>
- Shahidi, F., & Hossain, A. (2022). Preservation of aquatic food using edible films and coatings containing essential oils: a review. In *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* (Vol. 62, Issue 1, pp. 66–105). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/10408398.2020.1812048>
- Sharma, N., & Baldi, A. (2016). Exploring versatile applications of cyclodextrins: An overview. In *Drug Delivery* (Vol. 23, Issue 3, pp. 739–757). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.3109/10717544.2014.938839>
- Shen, D., Chang, X., Zhou, L., Hao, D., Fang, Z., Shan, Y., Huang, L., & Li, G. (2024). Ultrasonic preparation of citral/hydroxypropyl- β -cyclodextrin inclusion complex: Application as a potential antifungal preservative in strawberry storage. *Food Control*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.110046>
- Shen, Y., Ni, Z. J., Thakur, K., Zhang, J. G., Hu, F., & Wei, Z. J. (2021). Preparation and characterization of clove essential oil loaded nanoemulsion and pickering emulsion activated pullulan-gelatin based edible film. *International Journal of Biological Macromolecules*, 181, 528–539. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.03.133>
- Shishir, M. R. I., Xie, L., Sun, C., Zheng, X., & Chen, W. (2018). Advances in micro and nano-encapsulation of bioactive compounds using biopolymer and lipid-based transporters. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 78, pp. 34–60). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.05.018>

- Singh, J., Dartois, A., & Kaur, L. (2010). Starch digestibility in food matrix: a review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 21, Issue 4, pp. 168–180). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2009.12.001>
- Sinhmar, A., Pathera, A. K., Sharma, S., Nehra, M., Thory, R., & Nain, V. (2023). Impact of Various Modification Methods on Physicochemical and Functional Properties of Starch: A Review. In *Starch/Staerke* (Vol. 75, Issues 1–2). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/star.202200117>
- Siracusa, V., Rocculi, P., Romani, S., & Rosa, M. D. (2008). Biodegradable polymers for food packaging: a review. In *Trends in Food Science and Technology* (Vol. 19, Issue 12, pp. 634–643). <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2008.07.003>
- Siva, S., Li, C., Cui, H., Meenatchi, V., & Lin, L. (2020). Encapsulation of essential oil components with methyl- β -cyclodextrin using ultrasonication: Solubility, characterization, DPPH and antibacterial assay. *Ultrasonics Sonochemistry*, 64. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.104997>
- Song, Y., Sun, S., Hao, Q., Gao, S., Wang, W., & Hou, H. (2024). Effect of polydimethylsiloxane on the structure and barrier properties of starch/PBAT composite films. *Carbohydrate Polymers*, 336. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122119>
- Szejtli, J. (1998). Introduction and General Overview of Cyclodextrin Chemistry. <https://pubs.acs.org/sharingguidelines>
- Tester, R. F., & Morrison, W. R. (1988). Swelling and Gelatinization of Cereal Starches. I. Effects of Amylopectin, Amylose, and Lipids’.
- Tiwari, B. K. (2015). Ultrasound: A clean, green extraction technology. In *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 71, pp. 100–109). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2015.04.013>
- Velázquez-Contreras, F., Zamora-Ledezma, C., López-González, I., Meseguer-Olmo, L., Núñez-Delicado, E., & Gabaldón, J. A. (2022). Cyclodextrins in polymer-based active food packaging: A fresh look at nontoxic, biodegradable, and sustainable technology trends. In *Polymers* (Vol. 14, Issue 1). MDPI. <https://doi.org/10.3390/polym14010104>

- Venkatachalam, K., & Lekjing, S. (2020). A chitosan-based edible film with clove essential oil and nisin for improving the quality and shelf life of pork patties in cold storage. *RSC Advances*, 10(30), 17777–17786. <https://doi.org/10.1039/d0ra02986f>
- Vianna, T. C., Marinho, C. O., Marangoni Júnior, L., Ibrahim, S. A., & Vieira, R. P. (2021). Essential oils as additives in active starch-based food packaging films: A review. In *International Journal of Biological Macromolecules* (Vol. 182, pp. 1803–1819). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.05.170>
- Vrinceanu, N., Bucur, S., Rimbu, C. M., Neculai-Valeanu, S., Ferrandiz Bou, S., & Sucheai, M. P. (2022). Nanoparticle/biopolymer-based coatings for functionalization of textiles: recent developments (a minireview). In *Textile Research Journal* (Vol. 92, Issues 19–20, pp. 3889–3902). SAGE Publications Ltd. <https://doi.org/10.1177/00405175211070613>
- Wadhwa, G., Kumar, S., Chhabra, L., Mahant, S., & Rao, R. (2017). Essential oil–cyclodextrin complexes: an updated review. In *Journal of Inclusion Phenomena and Macrocyclic Chemistry* (Vol. 89, Issues 1–2, pp. 39–58). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s10847-017-0744-2>
- Wang, J., Cao, Y., Sun, B., & Wang, C. (2011). Physicochemical and release characterisation of garlic oil- β -cyclodextrin inclusion complexes. *Food Chemistry*, 127(4), 1680–1685. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.02.036>
- Wu, Y., Wu, H., & Hu, L. (2024). Recent Advances of Proteins, Polysaccharides and Lipids-Based Edible Films/Coatings for Food Packaging Applications: a Review. In *Food Biophysics* (Vol. 19, Issue 1, pp. 29–45). Springer. <https://doi.org/10.1007/s11483-023-09794-7>
- Zalewska, M., Marcinkowska-Lesiak, M., & Onopiuk, A. (2018). Physicochemical properties of white button mushrooms (*Agaricus bisporus*) as affected by coating. *Journal of Food Processing and Preservation*, 42(2). <https://doi.org/10.1111/jfpp.13419>

ABREVIATURAS Y SIMBOLOGÍA

IC: Complejo de inclusión

β -CD: Beta-Ciclodextrina

U: Ultrasonido

P: Plasma

EO: Aceite esencial

WS: Almidón waxy

EO-Cl: Aceite esencial de clavo

EO-Or: Aceite esencial de naranja

IC-UCI: Complejo de inclusión por ultrasonido de aceite esencial de clavo

IC-UOr: Complejo de inclusión por ultrasonido de aceite esencial de naranja

IC-PCI: Complejo de inclusión por plasma de aceite esencial de clavo

IC-POr: Complejo de inclusión por plasma de aceite esencial de naranja

F-WS: Película de almidón waxy

F-UCI: Película con complejo de inclusión de ultrasonido de clavo

F-UOr: Película con complejo de inclusión de ultrasonido de naranja

F-PCI: Película con complejo de inclusión de plasma de clavo

F-POr: Película con complejo de inclusión de plasma de naranja

FTIR: Espectroscopía de infrarrojo con transformada de Fourier

TGA: Análisis termogravimétrico

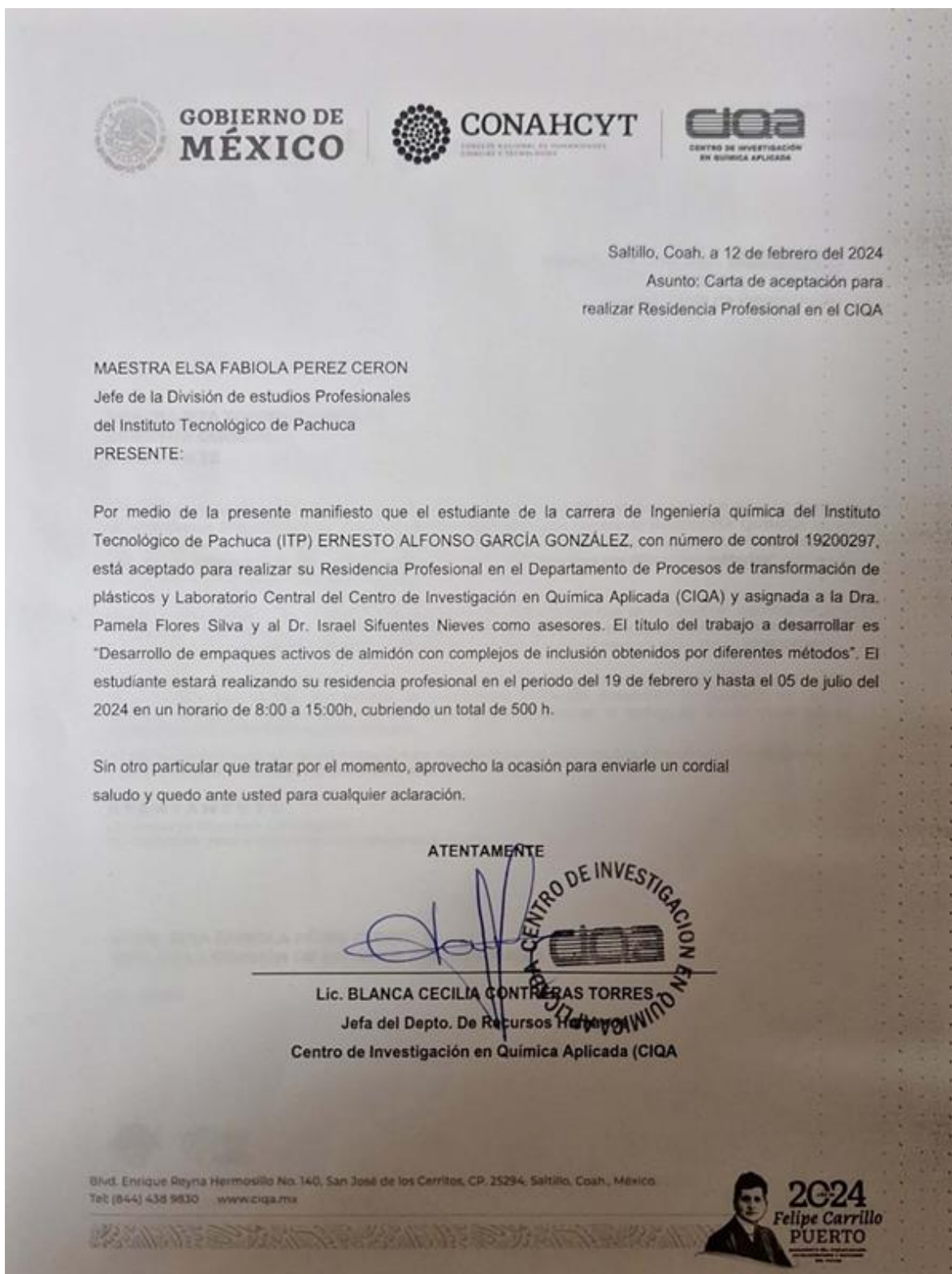
MEB: Microscopía electrónica de barrido

DSC: Calorimetría diferencial de barrido

DRX: Difracción de rayos

ANEXOS

7.1 Anexo A. Carta aceptación, Fuente: (CIQA, 2024).



7.2 Anexo B. Carta Terminación, Fuente: (CIQA, 2024).

