



Casa abierta al tiempo

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**  
**Unidad Iztapalapa**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)

***“Estructuración de un emulgel aceite – en – agua (O/W),  
estabilizado por mezclas proteína de chícharo – inulina de  
achicoria con propiedades tecnofuncionales como sustituto de  
grasa saturada”***

# **T E S I S**

PARA OBTENER EL GRADO DE:

**MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)**

PRESENTA:

**I.Q. Duviel Bermúdez Pérez**

**Matrícula: 2231801524**

**Correo electrónico: dubermudez.06@gmail.com**

DIRECTORES:

**Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter    Dra. Angelica Román Guerrero**

JURADO:

**Presidente: Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez**

**Secretario: Dr. Francisco Cruz Sosa**

**Vocal: Dr. Alfonso Totosaus Sánchez**

Iztapalapa, Ciudad de México, 26 de febrero de 2025

# Agradecimientos

Los agradecimientos son la primera sección que el lector encontrará, aunque para mí fue la última en redactarse. El proyecto ha llegado a su fin, y ahora quiero expresar mi gratitud a todas las personas que han contribuido de alguna manera a hacer posible esta culminación. No me preocuparé por que ocupe una página única e interesante; mi único objetivo es transmitir mis sentimientos hacia aquellos que han aportado su apoyo y esfuerzo.

Al **Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter**, por haber tenido confianza en mi trabajo, por ser una persona dispuesta a compartir sus conocimientos y brindarme sus consejos los cuales siempre fueron bien estratégicos para lograr la culminación del proyecto en tiempo y planificar mi crecimiento como profesional. Gracias por brindarme su amistad.

A la **Dra. Angelica Román Guerrero** por su excelente acogida en el grupo de trabajo, por su incondicional asesoramiento sin importar que en ocasiones dejaba de pasar tiempo con su familia por tal de proporcionarme sus consejos y recomendaciones. Muchas gracias por haber guiado mis esfuerzos y haberme proporcionado siempre la confianza que necesitaba para creer que, si se podía cumplir el objetivo en tiempo, más que un agradecimiento me gustaría dejarle mi felicitación por haber alcanzado de manera compartida este triunfo. Gracias por ser una gran persona y principalmente una amiga.

A los miembros del jurado, **Dr. José de Jesús Álvarez Ramírez**, **Dr. Francisco Cruz Sosa** y al **Dr. Alfonso Totosaus Sánchez** por su valiosa colaboración como revisores del trabajo, por sus valiosos consejos y observaciones emitidas para así lograr una tesis de alto nivel y la culminación de una etapa más en mi vida.

A mis compañeros del laboratorio **W – 107** y del posgrado, **M. en C. Linda Mey, M. en C. Julia de los Santos, M. en C. Alfonso Morales** y a la **I. Agroindustrial Carolina Estudillo**, por su apoyo constante y su compañerismo lo cual me permitió un crecimiento en esta etapa académica.

Un agradecimiento especial se merece el **Dr. Anthony Ortiz Deleón**, quien más que un amigo se comportó como un hermano mayor brindándome sus consejos, vivencias y principalmente asesorándome en todo momento tanto en mi trabajo experimental como en temas personales. Gracias por compartir sus conocimientos y apoyarme a superarme día a día. "MUCHAS GRACIAS CARNAL"

Finalmente, deseo expresar mi sincero agradecimiento al **CONSEJO NACIONAL DE HUMANIDADES, CIENCIAS Y TECNOLOGIA** (CONAHCYT), por el valioso apoyo recibido mediante la beca (**CVU: 1279160**). También estoy profundamente agradecido con la **Universidad Autónoma Metropolitana**, y el **Posgrado en Ingeniería Química** por permitirme el acceso a sus servicios, recursos y laboratorios los cuales fueron un pilar fundamental para el desarrollo de este proyecto y de mi perfil como profesional.

# Dedicatoria

Una tesis, es sin duda, una etapa final en la vida de cada estudiante la cual está llena esfuerzos, dedicación, frustraciones y mucho estudio. Por esa razón me gustaría dedicarle este logro en mi vida a:

Primeramente, a mi familia (abuelos, padres, tíos y hermano) la cual a pesar de estar a más de 1,784 kilómetros estuvieron pendiente de mi en todo momento y siempre me han apoyado en las decisiones y proyectos que me he propuesto en mi vida. En especial se la dedico a mis abuelos “**Juan de la Cruz Pérez García**” y “**María Caridad Gómez Acosta**” quienes no esperaban que ese niño travieso y quizás desobediente en Cuba se les convirtiera en un científico y emprendiera un viaje a otras tierras para dejar en alto tanto sus nombres, como la dignidad y el nombre de todo un país.

A todos los profesores de la carrera en ingeniería química de la **Universidad Marta Abreu de las Villas**, quienes brindaron sus conocimientos como buenos pedagogos para mi formación como profesional, en especial a la **Dra. María Hertha Broche Galindo** quien más que una profesora se convirtió en mi amiga y sus consejos fueron de mucha ayuda en esta etapa.

A todos mis amigos mexicanos en especial a “Leticia” porque indiscutiblemente sin ellos hubiese sido muy rutinaria la trayectoria por la **UAM – Iztapalapa** y por su hermoso país. También a mis compatriotas: Álvaro, Roxana, Rosangela, José, Michel, Laura, Pepe, Elianet y en especial a David, gracias por sus consejos y compartir momentos tan agradables, sé que cuento con ustedes.

# Índice General

Índice de figuras .....	8
Índice de Tablas .....	9
<b>Resumen</b> .....	10
<b>Abstract</b> .....	13
<b>Capítulo 1: Introducción</b> .....	16
<b>Capítulo 2: Antecedentes</b> .....	19
<b>2.1 Emulsiones</b> .....	19
<b>2.2 Emulsiones geladas o emulgeles</b> .....	20
<b>2.3 Clasificación de los emulgeles</b> .....	20
<b>2.4 Factores que influyen en propiedades de los emulgeles</b> .....	22
<b>2.5 Aplicaciones de los emulgeles en alimentos</b> .....	23
2.5.1 Sustitutos de grasas saturadas .....	25
<b>2.6 Hidrocoloides en los emulgeles</b> .....	26
2.6.1 Proteínas .....	26
2.6.2 Proteína de chícharo .....	26
2.6.3 Polisacáridos .....	27
2.6.4 Inulina .....	28
<b>Capítulo 3: Justificación</b> .....	30
<b>Capítulo 4: Hipótesis</b> .....	32
<b>Capítulo 5: Objetivos</b> .....	33
<b>5.1 Objetivo General</b> .....	33
<b>5.2 Objetivos Particulares</b> .....	33
<b>Capítulo 6: Estrategia experimental</b> .....	34
<b>6.1 Materiales</b> .....	35
<b>6.2 Evaluación de la solubilidad de PCH</b> .....	35
<b>6.3 Pre - acondicionamiento de PCH con ultrasonido (US)</b> .....	36
<b>6.4 Pre - acondicionamiento de Inu</b> .....	36
<b>6.5 Caracterización por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)</b> ..	37
<b>6.6 Propiedades reológicas de las PCH e Inu pre - acondicionadas</b> .....	37
<b>6.7 Mezclas binarias de PCH-Inu</b> .....	37
<b>6.8 Caracterización de las mezclas PCH-Inu</b> .....	38
<b>6.9 Preparación de emulgeles</b> .....	38
<b>6.10 Caracterización de los emulgeles</b> .....	38
a) Estabilidad contra cremado o sedimentación .....	38
b) Morfología y tamaño .....	39
c) Reología .....	39
d) Propiedades de textura .....	40

<b>6.11 Preparación de galletas adicionadas con emulgel</b> .....	40
<b>6.12 Caracterización de las masas y galletas adicionadas con emulgel</b> .....	41
a) Caracterización de las masas.....	41
b) Tamaño de las galletas.....	42
c) Pérdida de peso después del horneado (PPH) .....	42
d) Color.....	42
e) Propiedades texturales .....	43
<b>6.13 Análisis de la adsorción de agua</b> .....	43
a) Isotermas de sorción.....	43
b) Modelo de BET .....	44
c) Modelo de GAB.....	44
<b>6.14 Propiedades termodinámicas</b> .....	46
a) Propiedades diferenciales.....	46
b) Propiedades integrales .....	47
<b>6.15 Análisis estadístico</b> .....	48
<b>Capítulo 7: Resultados</b> .....	49
<b>7.1 Evaluación de la solubilidad de PCH</b> .....	49
<b>7.2 Pre - acondicionamiento de PCH</b> .....	50
7.2.1 Propiedades reológicas .....	53
<b>7.3 Pre - acondicionamiento de Inu</b> .....	57
7.3.1 Propiedades reológicas de Inu pre - acondicionada.....	58
<b>7.4 Caracterización de mezclas binarias PCH - Inu</b> .....	61
7.4.1 Propiedades reológicas de PCH-Inu.....	62
<b>7.5 Emulgeles estabilizados con geles de PCH - Inu</b> .....	64
<b>7.6 Caracterización de los emulgeles</b> .....	69
<b>7.7 Impacto de la sustitución de grasas saturadas por un emulgel</b> .....	71
7.7.1 Reología de las masas para las galletas con diferente % de emulgel .....	71
7.7.2 Propiedades texturales de la masa para la galleta.....	73
7.7.3 Características de la galleta.....	75
7.7.4 Propiedades texturales de las galletas .....	79
7.7.5 Isoterma de sorción de las galletas .....	80
7.7.6 Ajuste de los modelos BET y GAB a las isotermas de sorción de las galletas .....	83
7.7.7 Propiedades termodinámicas diferenciales .....	88
<b>Capítulo 8: Conclusiones</b> .....	93
<b>Capítulo 9: Perspectivas</b> .....	95
<b>Referencias</b> .....	96
<b>Anexos</b> .....	110
Anexo1 .....	110
Anexo 2: .....	111

Anexo 3 .....	116
Anexo 4 .....	121
Anexo 5 .....	125

## Índice de figuras

Figura 2.1 Principales factores fisicoquímicos y mecanismos de inestabilidad que influyen en las propiedades de los emulgeles.....	23
Figura 2.2 Principales aplicaciones de emulgeles en alimentos.....	24
Figura 2.3 Estructura química de la inulina A) molécula terminal de glucosa $\beta$ -D-glucopiranosil. B) molécula de terminal $\beta$ -D-fructopiranosil.....	28
Figura 7 Protocolo experimental utilizado para el desarrollo de la investigación. ....	34
Figura 7.1 Solubilidad de la proteína de chícharo a diferentes valores de pH. Letras distintas significan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ). ....	49
Figura 7.2 Espectros FTIR para las dispersiones de PCH: a) pH3 y b) pH 6 con y sin tratamiento de ultrasonido.....	52
Figura 7.3 Perfil de viscosidad para las dispersiones de PCH pre - acondicionadas con ultrasonido (0 min, 10 min y 20 min) a pH 3 (a) y pH 6 (b).....	54
Figura 7.4 Perfiles de módulos de almacenamiento ( $G'$ , símbolos llenos) y de pérdida ( $G''$ , símbolos vacíos) para las dispersiones de PCH pre -acondicionada con ultrasonido (0, 10 y 20 min) a pH 3 y 6.....	56
Figura 7.5 Espectro FTIR para Inu sin acondicionamiento (I0) y con pre - acondicionamiento con calentamiento usando dos velocidades de enfriamiento (5 y 10 °C/min; I5 e I10). ....	57
Figura 7.6 (a) Perfil de viscosidad aparente de Inu control (I0) y tratamientos de pre-acondicionamiento térmico (I5 e I10). Módulos viscoelásticos para (b) I0, (c) I5 y (d) I10.....	59
Figura 7.7 Espectros FTIR para mezclas de PCH pre - acondicionada a pH6 y 20 min de ultrasonido (PC620) e Inu pre - acondicionada térmicamente (I10) con diferentes relaciones másicas [PC620:I10] .....	61
Figura 7.8 Curva de flujo para las mezclas PC620-I10 empleando distintas relaciones másicas [PCH - Inu].....	63
Figura 7.9 Módulos $G'$ y $G''$ para las mezclas PC620:I10 a distintas relaciones másicas. ....	64
Figura 7.10 Imágenes de los emulgeles estabilizados con las mezclas de PCH-Inu pre - acondicionadas, utilizando distintas relaciones PCH - Inu y tres fracciones de fase dispersa. ....	65
Figura 7.11 Perfil de evolución del diámetro de gota ( $d_{10}$ ) de los emulgeles durante las primeras 48 h de almacenamiento. ....	68
Figura 7.12 Propiedades reológicas (a) curvas de viscosidad aparente y (b) módulos $G'$ (símbolos llenos) y $G''$ (símbolos vacíos) para emulgeles estabilizados con distintas mezclas de PC - I y con tres fracciones de fase dispersa ( $\Phi$ ). ....	70
Figura 7.13 Viscosidades de las distintas masas a diferentes composiciones de emulgel. ....	71
Figura 7.14 Módulos $G'$ y $G''$ de la masa de la galleta a diferentes composiciones de emulgel. ....	73
Figura 7.15 Galletas a diferente composición de emulgel .....	79
Figura 7.16 Isotermas de sorción de las distintas galletas almacenadas a diferente temperatura. .	83
Figura 7.17 Ajuste lineal y polinómico de los datos experimentales modelo de BET y GAB. ....	85
Figura 7.18 (a) Entalpía diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d)Teoría de compensación a diferentes temperaturas. ....	89
Figura 7.19 (a) Entalpía integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua. ....	92

## Índice de Tablas

Tabla 7 Formulaciones de masas para galleta con emulgeles como sustitutos de grasa.....	41
Tabla 7.1 Parámetros de modelo de Ostwald-de Waele para dispersiones de PCH pre acondicionadas con ultrasonido. ....	54
Tabla 7.2 Parámetros de flujo para los tratamientos de Inu con y sin pre - acondicionamiento. ....	60
Tabla 7.3 Parámetros reológicos del modelo de Ostwald – de Waele para geles de las mezclas binarias PCH - Inu pre - acondicionadas a distintas relaciones másicas. ....	63
Tabla 7.4 Constantes de velocidad de coalescencia para los emulgeles estabilizados con las mezclas PC - I .....	67
Tabla 7.5 Ajuste de las curvas de viscosidad usando el modelo de Ostwald – de Waele (Ley de potencia).....	72
Tabla 7.6 Dureza, adhesividad, resiliencia, cohesividad, elasticidad, índice de elasticidad, gomosidad, masticabilidad para cada muestra de masa para las galletas. ....	74
Tabla 7.7 Parámetros de color obtenidos a diferentes formulaciones de emulgel en las galletas. ..	76
Tabla 7.8 Parámetros de las galletas elaboradas a diferentes por cientos de emulgel. ....	77
Tabla 7.9 Pérdida de peso de las galletas luego del horneado. ....	78
Tabla 7.10 Parámetros Textura de las galletas a diferentes formulaciones de emulgel. ....	79
Tabla 7.11 Valores de peso inicial, peso final, humedad inicial en base humedad y humedad de equilibrio en base seca para las distintas galletas almacenadas a distintas aw a 20 °C. ....	80
Tabla 7.12 Valores de los parámetros del modelo BET a diferentes temperaturas y para las distintas galletas. ....	86
Tabla 7.13 Valores de los parámetros del modelo GAB a diferentes temperaturas y para las distintas galletas. ....	86
Tabla 7.14 Valores de los calores adsorción de agua para la monocapa (Hm) y multicapa (Hn) para las diferentes galletas.....	87
Tabla 7.15 Área superficial de adsorción, tamaño crítico del poro y tamaño del poro efectivo de adsorción para cada galleta a diferentes formulaciones de emulgel. ....	88
Tabla 7.16 Valores de la temperatura isocinética ( $T\beta$ ) para cada formulación de galletas a diferente temperatura. ....	91

## Resumen

Actualmente, en México, el consumo de productos horneados como el pan y las galletas, tienen un lugar preferente en la dieta diaria de la población, ocupando el octavo lugar a nivel mundial en la industria de panificación. Los productos horneados, como las galletas, destacan de otros productos horneados debido a su accesibilidad, bajo costo, aceptabilidad y larga vida útil, sin embargo, se caracterizan por proveer un elevado aporte calórico debido al uso de grasas y azúcares, contribuyendo en la incidencia de padecimientos de salud como el sobrepeso, obesidad y diabetes tipo 2. Por lo que, el desarrollo de alimentos que contribuyan a reducir el contenido de grasas saturadas empleando ingredientes funcionales y nutraceuticos, resulta en una oportunidad de innovación para proveer alternativas en el mercado de snacks y productos de panadería. Este trabajo proporciona bases tecnológicas para desarrollar sustitutos de grasas saturadas presentes en las formulaciones tradicionales de galletas, por emulgeles tipo aceite-en-agua (O/W) estabilizados con mezclas de proteína de chícharo (*Pisum sativum*, PCH) e inulina de achicoria (*Cichorium intybus*, Inu), evaluando su efecto sobre las propiedades fisicoquímicas y estabilidad de galletas como sistema modelo.

PCH es una proteína considerada de alta calidad debido a que posee excelentes propiedades funcionales como solubilidad, capacidad de retención de agua y de aceite, capacidad emulsificante, de gelificación y viscosidad, además de su alto contenido de aminoácidos esenciales. Por su parte, Inu es un polisacárido considerado como fibra dietética fermentable, compuesta por fructanos que actúan como prebióticos y proporciona un ligero efecto edulcorante, con propiedades funcionales destacadas como lo son la formación de soluciones de baja viscosidad a concentraciones relativamente altas, su habilidad de producir geles a concentraciones por arriba del 15%-25%, dependiendo de su peso molecular. Diversas investigaciones han señalado que la combinación de biopolímeros a base de proteína-polisacárido permite obtener sistemas hidrocoloides con propiedades de funcionales y estabilidad superior al logrado con los biopolímeros individuales.

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se propuso aplicar procesos de pre - acondicionamiento por ultrasonido (US; 20 kHz, 80% amplitud, 10 o 20 min) a dispersiones acuosas de PCH (20% p/p) y por temperatura (T; 70 °C, 20 min) empleando velocidades de enfriamiento de 10 y 5 °C/min para las dispersiones acuosas de Inu (20% p/p), con la finalidad de desarrollar estructuras gelificadas en ambos biopolímeros. Las dispersiones de PCH e Inu fueron caracterizadas reológicamente, exhibiendo un comportamiento pseudoplástico o readelgazante respecto al cizallamiento, con propiedades viscoelásticas predominantemente elásticas ( $G' > G''$ ), siendo el tratamiento de US con 20 min para PCH el que mostró un módulo elástico mayor, respecto al tratamiento de 10 min. Alternativamente se encontró que el pre - acondicionamiento de Inu con una velocidad de enfriamiento mayor (10 °C/min) condujo a la obtención de geles ( $G' > G''$ ) con mayor consistencia ( $>G'$ ) respecto a los obtenidos con una velocidad de enfriamiento de 5 °C/min.

De acuerdo con lo anterior, los biopolímeros pre - acondicionados fueron mezclados usando tres relaciones másicas PCH-Inu (2:1, 1:1, 1:2). La espectroscopia de infrarrojo con transformada de Fourier (FTIR) mostró las señales características para ambos biopolímeros, 1600  $\text{cm}^{-1}$  para los grupos amida I y 1500  $\text{cm}^{-1}$  amida II de las proteínas, y 3200 - 3500  $\text{cm}^{-1}$  para los grupos carboxilo presentes en los carbohidratos de Inu. Las mezclas PCH-Inu mantuvieron el comportamiento pseudoplástico que presentaron las dispersiones individuales de los biopolímeros, respecto a las propiedades viscoelásticas, las mezclas exhibieron un comportamiento predominantemente elástico ( $G' > G''$ ), incrementando su estructuración conforme el contenido de proteína se incrementaba en las mezclas PCH-Inu (2:1 > 1:1 > 1:2).

A partir de estos resultados, las mezclas PCH-Inu se utilizaron para la formación y estabilización de los emulgeles (O/W), empleando aceite de canola en tres fracciones másicas de fase dispersa ( $\phi = 0.10, 0.20$  y  $0.30$ ). Los emulgeles mostraron diámetros de gota ( $d_{10}$ ) entre 4.53 y 11.06  $\mu\text{m}$ , donde los sistemas con mayor contenido de aceite mostraron mayor tamaño del glóbulo de aceite y heterogeneidad, asociado con la viscosidad de la fase de acuosa. El análisis a las 48 horas reveló que el diámetro de las partículas de aceite en las emulsiones

aumentó, alcanzando un rango de 5.56 a 17.94  $\mu\text{m}$ , destacando que los emulgeles con fase acuosa gelificada (1:2) presentaron los tamaños de partículas más grandes, lo que llevó a una rápida pérdida de estabilidad comparada con los otros emulgeles en la prueba visual. Adicionalmente, se realizaron pruebas de reología y textura en cada una de las muestras de emulgeles. Según los resultados obtenidos, los emulgeles que contenían un 30% de aceite de canola y fueron estabilizados con el complejo PCH - Inu (2:1) mostraron las mejores propiedades funcionales, por lo que fueron usados como sustitutos de grasas saturadas en las galletas.

La segunda etapa de la investigación consistió en la sustitución parcial y total de la mantequilla por emulgel en diferentes porciones (25, 50, 75 y 100 %), para así conformar las masas y posteriormente las galletas. Los resultados reológicos y de textura realizados a cada una de las masas arrojaron que la adición de emulgel contribuye a una mejor integración de los componentes de la masa. Se encontró por una prueba de colorimetría que las galletas horneadas con una mayor fracción de emulgel, se fueron tornando más amarillentas. Texturalmente, las galletas elaboradas con emulgel exhibieron una mayor dureza que la galleta elaborada tradicionalmente. Al dimensionar estas galletas se observa que las que contienen (75 y 100%) de emulgel aumentan en espesor, pero disminuyen su diámetro comparadas con la galleta tradicional.

## Abstract

Currently, in Mexico, the consumption of baked goods such as bread and cookies holds a prominent place in the daily diet of the population, ranking eighth globally in the baking industry. Baked products, particularly cookies, stand out due to their accessibility, low cost, acceptability, and long shelf life. However, they are characterized by a high caloric content due to the use of fats and sugars, contributing to health issues such as overweight, obesity, and type 2 diabetes. Therefore, developing foods that help reduce saturated fat content using functional and nutraceutical ingredients presents an innovative opportunity to provide alternatives in the snack and bakery product market. This work provides technological foundations for developing substitutes for saturated fats in traditional cookie formulations using oil-in-water (O/W) emulsions stabilized with mixtures of pea protein (*Pisum sativum*, PCH) and chicory inulin (*Cichorium intybus*, Inu), evaluating their effect on the physicochemical properties and stability of cookies as a model system.

PCH is a protein considered high quality due to its excellent functional properties such as solubility, water and oil retention capacity, emulsifying ability, gelation, and viscosity, along with a high content of essential amino acids. Inu, on the other hand, is a polysaccharide regarded as fermentable dietary fiber, composed of fructans that act as prebiotics and provide a mild sweetening effect, with notable functional properties such as forming low-viscosity solutions at relatively high concentrations and its ability to produce gels at concentrations above 15%-25%, depending on its molecular weight. Various studies have indicated that combining protein-polysaccharide biopolymers allows for the creation of hydrocolloid systems with functional properties and stability superior to those achieved with individual biopolymers.

Accordingly, this study proposed applying pre-conditioning processes using ultrasound (US; 20 kHz, 80% amplitude, 10 or 20 min) to aqueous dispersions of

PCH (20% w/w) and temperature (T; 70 °C, 20 min) using cooling rates of 10 and 5 °C/min for aqueous dispersions of Inu (20% w/w) to develop gelled structures in both biopolymers. The dispersions of PCH and Inu were characterized rheologically, exhibiting pseudoplastic or shear-thinning behavior, with predominantly elastic viscoelastic properties ( $G' > G''$ ), where the US treatment for 20 min for PCH showed a higher elastic modulus compared to the 10 min treatment. Alternatively, it was found that pre-conditioning Inu with a higher cooling rate (10 °C/min) led to gels ( $G' > G''$ ) with greater consistency ( $>G'$ ) compared to those obtained with a cooling rate of 5 °C/min.

Based on these results, the pre-conditioned biopolymers were mixed using three mass ratios of PCH-Inu (2:1, 1:1, 1:2). Fourier-transform infrared spectroscopy (FTIR) showed the characteristic signals for both biopolymers, 1600  $\text{cm}^{-1}$  for amide I and 1500  $\text{cm}^{-1}$  for amide II groups of proteins, and 3200 - 3500  $\text{cm}^{-1}$  for carboxyl groups present in the carbohydrates of Inu. The PCH-Inu mixtures maintained the pseudoplastic behavior shown by the individual dispersions of the biopolymers; regarding viscoelastic properties, the mixtures exhibited predominantly elastic behavior ( $G' > G''$ ), increasing their structuring as the protein content in the PCH-Inu mixtures increased (2:1 > 1:1 > 1:2).

From these results, the PCH-Inu mixtures were used for the formation and stabilization of O/W emulsions, employing canola oil in three mass fractions of the dispersed phase ( $\phi = 0.10, 0.20, \text{ and } 0.30$ ). The emulsions showed droplet diameters ( $d_{10}$ ) ranging from 4.53 to 11.06  $\mu\text{m}$ , where systems with higher oil content exhibited larger oil globule sizes and heterogeneity, associated with the viscosity of the aqueous phase. Analysis at 48 hours revealed that the diameter of the oil particles in the emulsions increased, reaching a range of 5.56 to 17.94  $\mu\text{m}$ , highlighting that the emulsions with gelled aqueous phase (1:2) presented the largest particle sizes, leading to a rapid loss of stability compared to the other emulsions in visual testing. Additionally, rheological and texture tests were conducted on each emulsion sample. According to the obtained results, the emulsions containing 30%

canola oil stabilized with the PCH-Inu complex (2:1) showed the best functional properties, making them suitable substitutes for saturated fats in cookies.

The second stage of the research involved the partial and total substitution of butter with emulgel in different portions (25, 50, 75, and 100%) to form the dough and subsequently the cookies. The rheological and texture results for each dough indicated that the addition of emulgel contributed to better integration of the mass components. A colorimetric test revealed that the baked cookies with a higher fraction of emulgel turned more yellow. Texturally, the cookies made with emulgel exhibited greater hardness compared to those made traditionally. When measuring these cookies, those containing 75% and 100% emulgel increased in thickness but decreased in diameter compared to the traditional cookie.

# Capítulo 1: Introducción

De acuerdo con el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP, 2024), la incidencia de obesidad en la población mexicana se ha duplicado respecto a la contabilizada en la década de los 80's, estimándose que el 45% en la población adulta de México, y 4 mil millones de personas a nivel mundial sufrirán este padecimiento. De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Organización Panamericana de la Salud (OPS), el consumo de grasas trans y grasas saturadas en la dieta ha demostrado estar asociada con el incremento en el riesgo de padecimientos como cardiopatías coronarias, y han propuesto medidas legislativas para limitar el consumo de este tipo de grasas en alimentos, minimizando o eliminando la adición de aceites parcialmente hidrogenados, ya que estos son considerados como la principal fuente de grasas trans (Rincón-Gallardo Patiño et al., 2022; Mao et al., 2024; OPS, 2021).

Recientemente, la Food and Drug Administration (FDA) de los Estados Unidos ha dejado de considerar a los aceites parcialmente hidrogenados como compuestos GRAS (Generalmente reconocidos como seguros), con la finalidad de evitar su incorporación en alimentos y con ello lograr la producción de alimentos con bajos contenidos de grasas saturadas y libres de grasas trans. Cabe destacar, que la demanda de alimentos reducidos en grasa ha aumentado, sobre todo en productos de panadería, donde se utilizan grasas sólidas como mantequilla y margarinas como ingrediente clave en su formulación. Sin embargo, uno de los retos principales a los que se enfrenta la industria de los alimentos se centra en lograr reemplazar las grasas sólidas sin afectar la textura, sabor, características nutrimentales y tecnofuncionales de los alimentos. En este sentido, diversos estudios han centrado esfuerzos en diseñar aditivos que permitan reducir la necesidad de utilizar grasas sólidas sin sacrificar propiedades de textura y nutrimentales. El empleo de materiales organogelados (oleogeles) basados en el uso de ceras y aceites vegetales (poliinsaturados); emulsiones gelificadas (emulgeles) y sustitutos basados en el uso de carbohidratos y proteínas, han mostrado características tecnofuncionales que pueden contribuir a lograr este objetivo. Sin embargo, la

implementación de este tipo de materiales en el desarrollo de productos horneados reducidos en grasa, como las galletas, los pasteles y las pastas hojaldradas, representan un reto significativo para la industria de los alimentos, debido al papel que juegan las grasas sólidas en las características de los alimentos, como su volumen, textura, sabor, vida de anaquel y funcionalidad.

Para replicar las funciones que estas grasas llevan a cabo, es fundamental comprender los mecanismos involucrados y los factores que influyen en sus propiedades funcionales. Debido a que el desarrollo de sustitutos de grasas sólidas en alimentos va más allá de convertir un aceite o grasa poliinsaturada en una forma sólida, sino que estos materiales deben simular los efectos que generan las redes o agregados de cristales de grasa en el alimento, empleando un aceite líquido atrapado en una matriz (Tan et al., 2025). En este sentido, el uso de biopolímeros, proteínas y polisacáridos, como agentes sustitutos de grasas ofrece ventajas económicas, ambientales y tecnológicas, ya que este tipo de materiales provienen de fuentes naturales, son accesibles, biodegradables y poseen propiedades funcionales asociadas con actividades emulsificantes, espesantes y/o gelificantes, entre otras (Shanthakumar et al., 2022). Los emulgeles son sistemas dispersos estabilizados con biopolímeros, utilizados individualmente o en mezclas, que ofrecen una mayor capacidad de estructuración del sistema y de contribuir a desarrollar propiedades viscoelásticas adecuadas (Tan et al., 2025). La estructuración de las fases de emulgeles o emulsiones geladas, puede modularse a través del aprovechamiento de las propiedades funcionales (emulsificantes y espesantes) de los biopolímeros y de distintos mecanismos de unión interfacial (Bonacucina et al., 2009).

Biopolímeros como las proteínas han mostrado que al ser sometidas a procesos de desnaturalización mejoran la formación de estructuras geladas con redes 3D más fuertes en presencia de aceites, pero son sistemas altamente susceptibles a los esfuerzos de corte o cizalla (Tan et al., 2025). Las proteínas de suero de leche (Sala et al., 2007),  $\beta$ -lactoglobulina (Knudsen et al., 2008), caseinato de sodio (Dickinson & Merino, 2002), proteína de soya (Kim et al., 2001), proteína de chícharo (Kim et al., 2025), entre otras, han sido empleadas como agentes desarrolladores

de textura para alimentos. En el caso de los polisacáridos, materiales como la hidroxietilcelulosa modificada (Akiyama et al., 2007), K - carragenina (Sala et al., 2007), goma gelana (Lorenzo et al., 2013) y agar (Piazza y Benedetti, 2010) han demostrado excelentes propiedades superficiales para la formación y estabilización de emulgeles. De acuerdo con Oppong et al. (2024), un emulgel es definido como un material tipo gel que contiene una emulsión, donde la fase gelada proporciona el desarrollo de una textura semisólida, proporcionando propiedades físicas, químicas y mecánicas deseables en ciertos alimentos, además de ofrecer atributos de alta estabilidad contra fenómenos agregativos y capacidad de liberación controlada de compuestos bioactivos atrapados dentro de la fase dispersa. Basado en lo anterior, los emulgeles estabilizados con proteínas se basan en la formación de las emulsiones para posteriormente ser tratadas mediante la aplicación de temperatura, la adición de enzimas o sales, o bien mediante la modificación del pH, con la finalidad de inducir la gelificación en la emulsión (Lin et al., 2020). Respecto a los emulgeles basados en polisacáridos, el proceso de estructuración es semejante al de las proteínas, sin embargo, el mecanismo de gelificación depende de la estructura y grupos funcionales de los hidrocoloides empleados (Jiang et al., 2020). Por lo anterior, este trabajo plantea el uso de mezclas binarias de proteína-polisacárido para formar y estabilizar emulgeles, con la finalidad de evaluar sus propiedades tecnofuncionales como sustitutos de grasas sólidas en galletas como sistema modelo.

## Capítulo 2: Antecedentes

### 2.1 Emulsiones

Las emulsiones son sistemas dispersos compuestos de la combinación de dos líquidos o fases inmiscibles, como el agua y el aceite, donde una de las fases es dispersada en la fase continua en forma de pequeñas gotitas, generalmente a través del uso de métodos mecánicos de agitación como la homogeneización, los cuales aportan la suficiente energía al sistema para lograr el rompimiento de la fase discontinua y su dispersión en la fase continua, resultando en un sistema homogéneo (McClements, 2015). Uno de los criterios de clasificación de las emulsiones se basa en el arreglo de distribución de fases; una emulsión donde la fase oleosa (O) esta dispersa en forma de gotas rodeadas de una fase acuosa (W) se denomina una emulsión tipo O/W, mientras que la distribución inversa de las fases involucradas lleva a producir una emulsión tipo W/O, es decir, las gotas de la fase W se encuentran rodeadas de la fase externa O (McClements, 2003). Debido a la naturaleza química y termodinámica de las emulsiones, para lograr la estabilización de este tipo de sistemas dispersos por un tiempo prolongado, se requiere del uso de un tercer componente que se sitúa en la interfase agua-aceite, y posee la capacidad de reducir la tensión interfacial entre las fases O-W, y de retardar en el movimiento de las gotas dispersas. En este sentido, la adición de agentes estabilizantes ha mostrado eficacia al prevenir la agregación y coalescencia de las gotas, ya que estos materiales pueden adsorberse en la interfase O-W y formar membranas que actúan como barreras estéricas, viscoelásticas y/o electrostáticas, y reducir el movimiento de las gotas causado por la fuerza gravitacional o el movimiento Browniano, además de impactar la textura y propiedades mecánicas/reológicas de estos sistemas dispersos, y de sistemas alimenticios más complejos a los que se añaden (McClements 2003). Generalmente, los estabilizantes incluyen a los tensoactivos, que son moléculas anfifílicas de bajo peso molecular, biopolímeros como las proteínas y polisacáridos, y partículas coloidales. Siendo el conjunto de biopolímeros, los que han recibido mayor atención en los últimos años, debido a las restricciones y efectos negativos

a la salud que se han asociado con el uso de los tensoactivos en los alimentos (Karaca et al., 2025).

## **2.2 Emulsiones geladas o emulgeles**

Como se ha mencionado anteriormente, la formación de emulsiones involucra la creación de pequeñas gotitas dispersas en una segunda fase no miscible en presencia de un agente estabilizante. En el caso de las emulsiones geladas o emulgeles, estas también involucran la dispersión de una fase, mayoritariamente se considera O como fase dispersa, dentro de una fase gelificada, donde la fase lipídica actúa como un material de relleno dentro de la matriz tridimensional del gel, conduciendo a la formación de materiales con propiedades semisólidas (Oppong et al., 2024). Recientemente, el interés en la aplicación de geles como coloides funcionales ha atraído gran atención en la industria alimentaria debido a su morfología y microestructura ajustables, propiedades fisicoquímicas, mecánicas y funcionales, y estabilidad superior a las emulsiones convencionales, así como características de liberación controlada para los compuestos bioactivos encapsulados en su interior (Abdullah et al., 2022). En los emulgeles, su producción involucra la creación de una emulsión inicial, seguida de la transformación de las gotas emulsificadas en un material gelificado, empleando procesos de homogeneización de alta energía como la aplicación de ultrasonido, micro fluidización u homogeneizadores de ala presión, donde las características finales del emulgel dependen de las interacciones que pueden desarrollarse entre las gotas del emulgel y la matriz gelada, el tamaño de gota, la fracción másica o volumétrica y la distribución de las fases (Geremias-Andrade et al., 2016)

## **2.3 Clasificación de los emulgeles**

Los emulgeles pueden clasificarse de acuerdo con la distribución de fases en emulgeles tipo O/W y W/O, sin embargo, la mayoría de los reportes encontrados en la literatura se centran en los emulgeles O/W para fines de aplicación en alimentos,

por lo que las siguientes clasificaciones y descripción de sistemas sólo abordará este tipo de configuraciones y distribución de fases.

Los emulgeles pueden clasificarse dependiendo de la conformación y dispersión de las gotas de emulsión en: a) geles con agregados de gotas de emulsión (*emulsion droplet-aggregated gels*), donde la matriz gelada agrupa las gotas de emulsión, conduciendo a la formación de redes 3D que modifican la continuidad de la estructura del gel; y b) geles rellenos con las gotas de emulsión (*emulsion droplet-filled gels*), donde las gotas de la emulsión se encuentran embebidas dentro de la matriz gelada produciendo una fase continua más homogénea (Oppong et al., 2024).

Otra clasificación que se ha empleado para este tipo de sistemas se centra en el tipo de biopolímero utilizado para producir la matriz del gel (Abdullah et al., 2022; Oppong et al., 2024), como se describe a continuación:

- I. Emulgeles a base de proteína.** Son sistemas donde las emulsiones estabilizadas con proteínas son sometidas a tratamientos térmicos, adición de enzimas o sales, o modificación del pH para inducir la gelificación de las proteínas. Generalmente se emplean proteínas de origen animal como las caseínas, gelatina, o proteínas de suero de leche, o de origen vegetal como los aislados de proteína de soya, haba, chícharo, entre otras.
- II. Emulgeles a base de polisacáridos.** Los emulgeles formados empleando polisacáridos son producidos de manera semejante a los anteriores, comenzando por una emulsión estabilizada con el polisacárido, sin embargo, los procesos de gelificación de los hidrocoloides se ven más influenciados por la presencia y tipo compuestos iónicos, y en menor medida, dependiendo de la estructura de polisacárido, por los procesos térmicos. Los principales polisacáridos que se han utilizado para estabilizar emulgeles comprenden a las pectinas, almidones, alginato, gomas, inulina y carragenina, entre otros. Este tipo de emulgeles tienden a ser termorreversibles.
- III. Emulgeles mixtos.** Son aquellos sistemas donde se aprovechan las propiedades funcionales de mezclas de proteína-polisacárido, logrando

comportamientos de gelificación enriquecidos y un control más preciso de las propiedades fisicoquímicas, reológicas y funcionales respecto a los emulgeles estabilizados con biopolímeros individuales. Dentro de las propiedades más sobresalientes de estos sistemas mixtos, se ha encontrado que estos logran alcanzar capacidades de retención de agua significativamente mayores a sus contrapartes, y logran producir una amplia gama de microestructuras que pueden ser aprovechadas para diversificar texturas y atributos sensoriales deseables en los alimentos (Le et al., 2017). Para estos sistemas, los métodos de gelificación incluyen además del calentamiento, el control de las condiciones de enfriamiento, tratamiento enzimático, cizallamiento y coacervación. Algunas combinaciones de biopolímeros empleadas para la producción de emulgeles mixtos son aislado de proteína de soya y pectina de betabel, goma xantana-goma guar, zeína-caseinato de sodio-alginato de propilenglicol, entre otros.

#### **2.4 Factores que influyen en propiedades de los emulgeles**

Las propiedades tecnofuncionales de los emulgeles se encuentran influenciadas no sólo por las características fisicoquímicas de las materias primas que se emplean para su fabricación (tipo de aceite o fase oleosa, tipo de biopolímero, concentraciones, relación másica entre las fases, etc.) o el método de formación (térmicos, físicos o químicos), sino también por variables como la viscosidad, temperatura, pH, actividad de agua, fuerza iónica, etc., y por los mecanismos de desestabilización que afectan a los sistemas dispersos en general (floculación, coalescencia, sedimentación, inversión de fases) son múltiples como se muestra en la Figura 2.1.

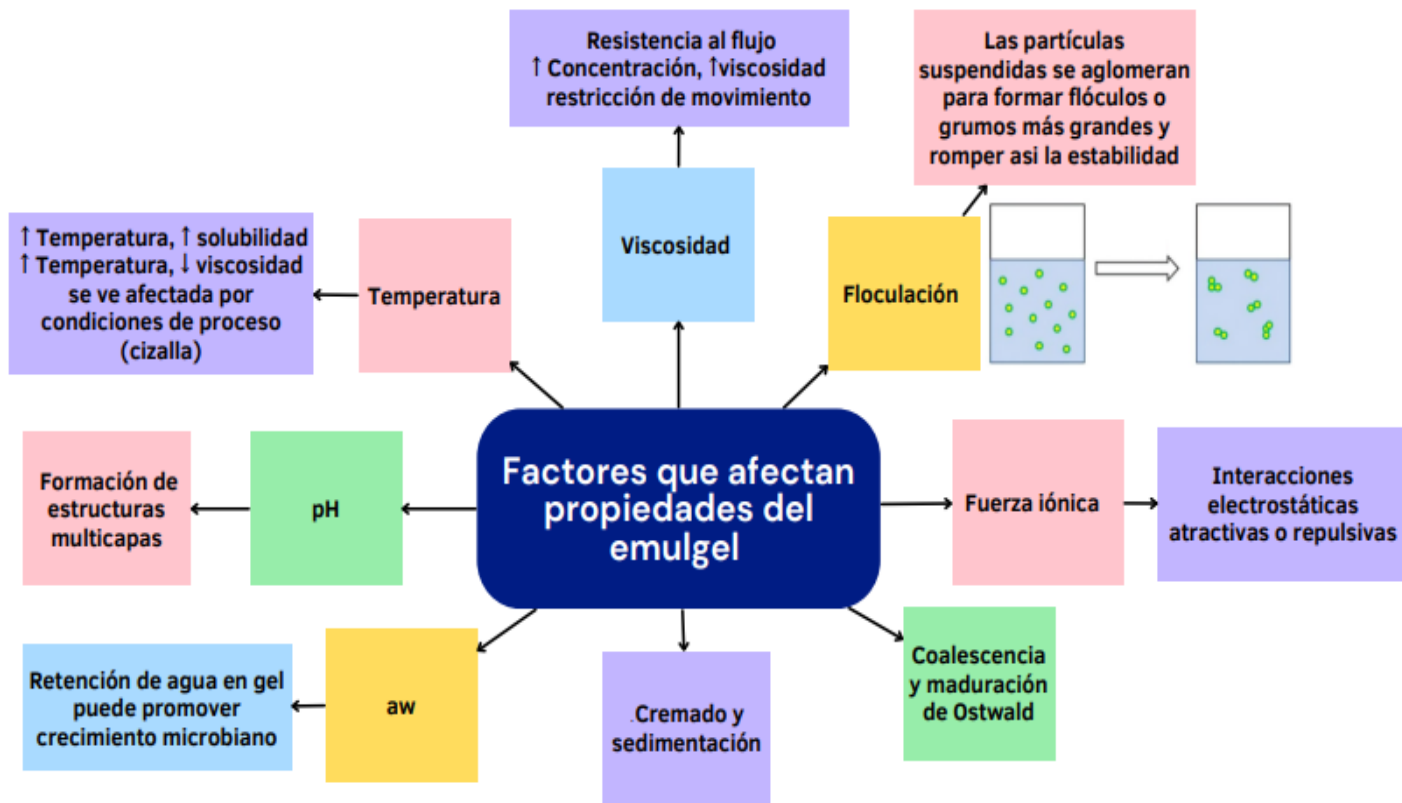


Figura 2.1 Principales factores fisicoquímicos y mecanismos de inestabilidad que influyen en las propiedades de los emulgeles.

## 2.5 Aplicaciones de los emulgeles en alimentos

De acuerdo con diversos reportes, los emulgeles exhiben excelentes propiedades como sistemas de protección, acarreo y liberación de compuestos bioactivos que pueden ser incorporados en matrices alimentarias, mejorando la digestibilidad y absorción de los nutrientes y bioactivos a lo largo del tracto gastrointestinal (Abdullah et al., 2022). En la Figura 2.2 se muestran algunas de las principales aplicaciones de los emulgeles en la industria de los alimentos.

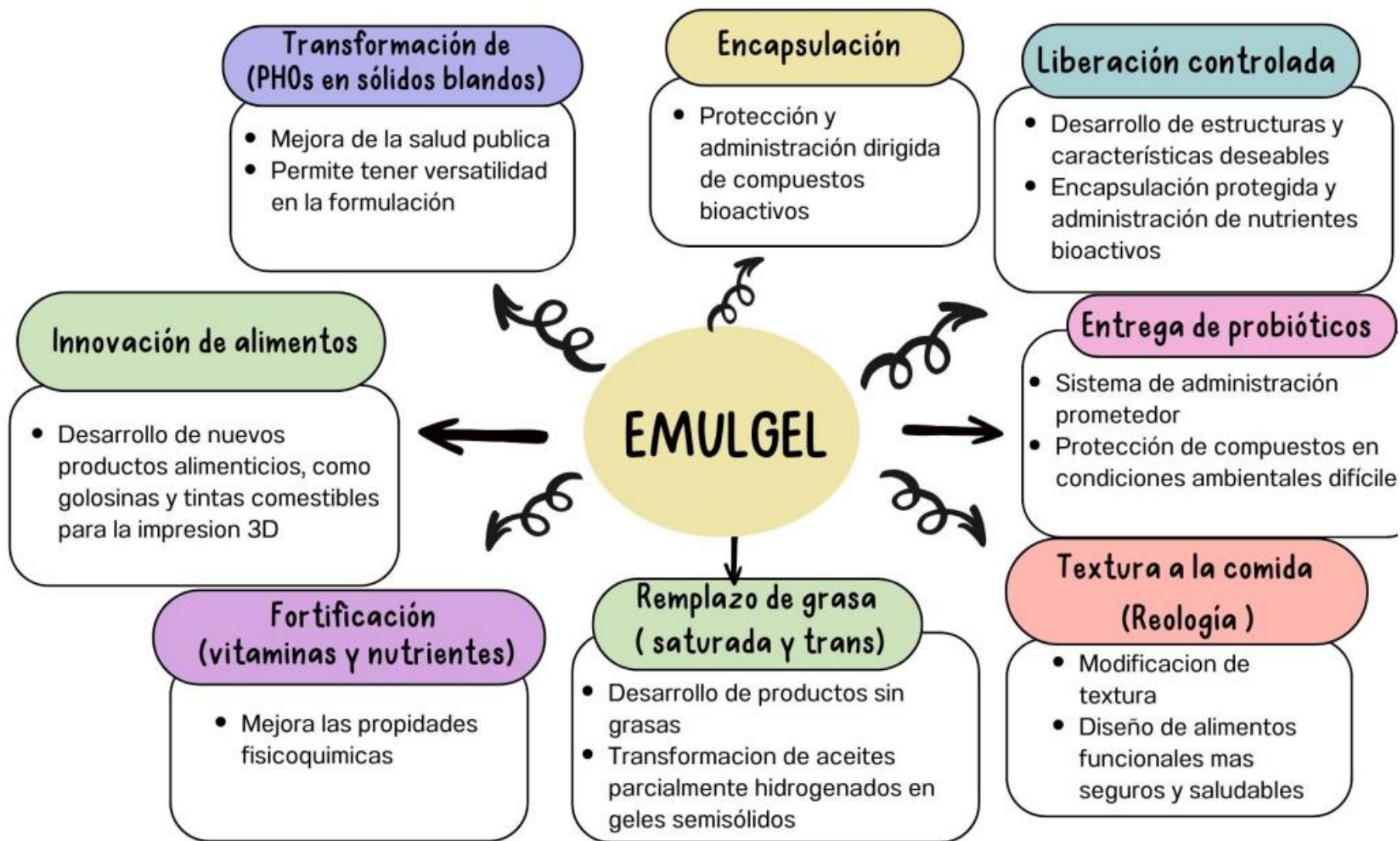


Figura 2.2 Principales aplicaciones de emulgeles en alimentos.

### 2.5.1 Sustitutos de grasas saturadas

Investigaciones previas han explorado el uso de nuevos alimentos funcionales y técnicas innovadoras como alternativas a las grasas saturadas. Un estudio de Giarnetti et al. (2015) muestra que se pueden utilizar emulgeles elaborados con inulina y aceite de oliva en lugar de mantequilla en la producción de galletas, logrando una reducción del 19% en la grasa total y un 39% en grasas saturadas. Las galletas que contenían un 50% de esta emulsión mantuvieron propiedades de fractura similares a las galletas tradicionales. Por otro lado, Vergara Herrera (2013) desarrolló emulgeles con mezclas de goma de tragacanto y albumina de huevo, observando que la variación en la concentración de albumina afectaba ligeramente los parámetros reológicos, aunque la estabilidad de la emulsión no mostró cambios significativos. Sereti et al. (2023) utilizaron un emulgel enriquecido con B-glucano de cebada para sustituir hasta el 100% de la margarina en galletas. Resultados reológicos indicaron que, con un 50% de sustitución, las propiedades eran similares a las de la masa de control, mientras que mayores niveles de inclusión resultaron en masas menos viscosas y elásticas, generando galletas más gruesas y de menor diámetro. Hadnadev et al. (2015) desarrollaron un sustituto de grasa semi-plástico basado en un almidón modificado con ácido octenil-sódico-succínico, elaboraron galletas, y las compararon con galletas elaboradas con grasa vegetal hidrogenada y aceite vegetal líquido. El reemplazo de ambas grasas vegetales produjo una fuerza de la masa menor, mejorando la apariencia superficial de las galletas. Además, los emulgeles han sido aplicados en productos lácteos. Mahdieh et al. (2024) desarrollaron un emulgel de proteína de suero y alginato como sustituto de margarina en queso procesado, concluyendo que este reemplazo resultó en menor dureza y mayor cohesión y elasticidad del queso. Se observó también una mejora en las propiedades viscoelásticas y estabilidad térmica, sin diferencias significativas en las características sensoriales con respecto a las muestras de control.

## 2.6 Hidrocoloides en los emulgeles

Como se ha mencionado anteriormente, los emulgeles empleados en alimentos se basan principalmente en el uso de proteínas y polisacáridos, por lo que en esta sección se describirán algunas de las propiedades funcionales de este tipo de biopolímeros.

### 2.6.1 Proteínas

Las proteínas son moléculas anfífilas con actividad superficial que les permite adsorberse rápidamente en interfases aceite-agua, reducir la tensión interfacial que existe entre las fases y formar una película o membrana protectora sobre la interfase que permite brindar protección a las gotas de la fase dispersa previniendo los fenómenos de agregación que eventualmente pueden conducir al rompimiento de las emulsiones y separación de fases. Debido a lo anterior, diversos trabajos han demostrado que este tipo de biopolímeros exhibe excelentes propiedades emulsificantes (Cen et al., 2024). El comportamiento de las proteínas está definido por su arreglo estructural (estructuras secundaria y terciaria), tamaño, composición de aminoácidos, carga eléctrica, etc. De acuerdo con su origen, las proteínas pueden ser de origen animal, las cuales ofrecen ventajas nutrimentales debido a su alta digestibilidad y biodisponibilidad; mientras que, las proteínas vegetales representan una alternativa a las proteínas de origen animal, dadas las preocupaciones ambientales que pueden atribuirse a la producción pecuaria intensiva, exhibiendo propiedades superficiales y nutricionales semejantes a las de origen animal (Chen et al., 2023).

### 2.6.2 Proteína de chícharo

Las proteínas presentes en aislados de chícharo representan entre el 23 y 31% del total de la semilla, siendo las globulinas (70-80%) y las albuminas (10-20%) las que

se encuentran en mayor abundancia. Estas proteínas son consideradas fuente importante de aminoácidos esenciales como la lisina (Ge et al., 2020; Bogahawaththa et al., 2019) y exhiben excelentes propiedades emulsificantes (Olsmans & Rennie 2024). Dentro de las propiedades funcionales que se han estudiado para este tipo de proteína está el aprovechamiento de su capacidad para formar geles y emulsiones geladas a través del aprovechamiento de interacciones electrostáticas moduladas a través del cambio en el pH del medio o de la aplicación de tratamientos físicos (temperatura, presión, cizalla, etc.) que induzcan su desnaturalización y conformación estructural que origine materiales con características viscoelásticas mejoradas (Olsmans et al., 2025).

### 2.6.3 Polisacáridos

Los polisacáridos son macromoléculas de carbohidratos complejos, compuestos por una cadena de unidades monosacáridas unidas por grupos glucosídicos. En la industria de los alimentos este tipo de hidrocoloides representan una materia prima multifuncional, con propiedades fisicoquímicas adecuadas para ser incorporados como aditivos en alimentos, actuar como vehículos de acarreo, protectores y sistemas de liberación controlada de compuestos bioactivos, ya que por su estructura y peso molecular, son compuestos resistentes a las enzimas y condiciones de pH del tracto gastrointestinal, permitiendo el diseño de sistemas de liberación controlada y/o dirigida. Dependiendo de su estructura y composición, algunos de estos polisacáridos actúan como prebióticos, favoreciendo la proliferación de la flora intestinal. En su mayoría, este tipo de macromoléculas son adecuados para su uso como agentes gelificantes, formando estructuras de entrecruzamiento en presencia de cationes divalentes, cambios de pH, interacciones hidrofóbicas o la adición de entrecruzantes como el glutaraldehído. El uso de polisacáridos en emulgeles, ha mostrado que este tipo de macromoléculas brindan protección a los compuestos atrapados dentro de la emulsión gelada, mejorando su biodisponibilidad en los sitios de absorción. De acuerdo con diversas investigaciones, los emulgeles basados en polisacáridos comprenden el uso de

alginato, agarosa, almidones modificados, carragenina, goma konjac, gelana, xantana, e inulina. Las condiciones de formación de las redes 3D de los respectivos geles a formar, depende del tipo de estructura y propiedades químicas de cada polisacárido (Jo et al., 2024). Debido a que en este trabajo se utilizará la inulina de achicoria como estabilizante de los emulgeles, en la siguiente sección se da una breve descripción de este material.

#### 2.6.4 Inulina

La inulina es un polisacárido compuesto de moléculas de fructosa unidas por enlaces  $\beta$ -(2-1) fructosil-fructosa, las cuales suelen terminar en una unidad de glucosa conectada por un enlace  $\alpha$ -(1,2) (Watherhouse, 2001), o bien en un residuo de  $\beta$ -D-fructopiranosil, como se muestra en la Figura 2.3.

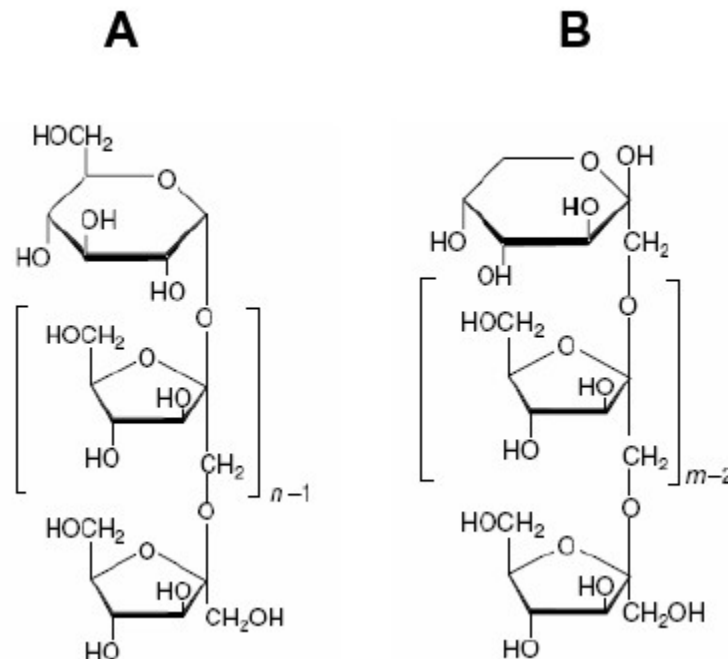


Figura 2.3 Estructura química de la inulina A) molécula terminal de glucosa  $\beta$ -D-glucopiranosil. B) molécula de terminal  $\beta$ -D-fructopiranosil.

Los fructanos, como las inulinas, son polisacáridos no estructurales que suelen encontrarse almacenados en raíces de algunas especies vegetales como la patata (*Helianthus tuberosus*), la cebolla (*Allium cepa* L.), ajo (*Allium sativum*), espárrago

(*Asparragus officinalis* L.), la achicoria (*Cichorium intybus*), entre otras (Flamm et al., 2001). La inulina tiene una amplia variedad de aplicaciones como ingrediente en la formulación de productos, por ejemplo, en yogures elaborados con leche descremada, la inulina contribuye a mejorar la aceptabilidad al proporcionar una textura más cremosa, actuando como un agente espesante que contribuye a la retención de agua y estabilización de los geles (Kip et al., 2005). La capacidad de la inulina para formar geles ha permitido su uso como sustituto de grasas en productos lácteos, untables, aderezos, salsas, etc., incluso se ha incorporado en panes de trigo como sustituto de la grasa vegetal, donde no se observaron cambios significativos en las características reológicas de la masa antes de hornear, resultando en características y atributos sensoriales comparables a los observados en el pan convencional (Wang et al., 2002).

De acuerdo con lo anterior, en este trabajo se plantea aprovechar las propiedades fisicoquímicas y funcionales de las proteína de chícharo (PCH) y la inulina de achicoria (Inu) para formar un emulgel O/W que actúe como un sustituto de grasas sólidas en galletas, evaluando las condiciones de pre - acondicionamiento de los hidrocoloides, las condiciones de formación de los emulgeles y el nivel de sustitución de grasa sólida, sobre las características fisicoquímicas y de estabilidad de las galletas como sistema modelo.

## Capítulo 3: Justificación

El incremento y prevalencia a nivel mundial de enfermedades asociadas al Síndrome Metabólico como la obesidad, diabetes y la hipertensión son adjudicadas principalmente a un sobreconsumo de alimentos con altos contenidos en calorías, azúcares y grasas. Esto ha conllevado a las organizaciones de salud a impulsar a los fabricantes de alimentos que desarrollen productos saludables, especialmente los productos de panificación, reduciendo los niveles o que estén exentos de azúcares, grasas saturadas y trans. Esto es más fácil decirlo que lograrlo, no solo deben sustituirse unos ingredientes por otros para lograr un producto más saludable nutricionalmente, sino que deben presentar propiedades texturales, sensoriales y de sabor similares o superiores a los productos tradicionales que se buscan sustituir en el mercado. Lo anterior es todo un reto tecnológico, ya que las grasas, además de ser una fuente de energía, juegan un papel fundamental en la textura, sabor y estabilidad de los productos horneados.

A partir de este conocimiento se pueden explorar ingredientes y técnicas alternativas que permitan reducir o suprimir el uso de las grasas saturadas e hidrogenadas, y valorar las ventajas y desventajas que ofrece el uso de los nuevos ingredientes. En la industria alimentaria existe un interés creciente por el uso de los emulgeles, pero la mayoría de los estudios se han enfocado en su aplicación en productos lácteos y cárnicos, dejando un vacío significativo en la investigación sobre su uso en productos de panificación. El uso de mezclas binarias de proteína de chícharo e inulina para estabilizar emulgeles O/W es una técnica innovadora y prometedora ya que la proteína de chícharo no solo es una fuente rica en aminoácidos esenciales, sino que también posee propiedades emulsificantes que, junto con la inulina, la cual actúa como un agente gelificante y prebiótico, pueden mejorar la estabilidad de los emulgeles. Explorar el efecto de las mezclas binarias proteína de chícharo-inulina en la estabilización de emulgeles O/W no solo contribuirá a la formulación y sustitución de grasas sólida en las galletas, sino que también permitirá analizar cómo estos afectan las propiedades reológicas y mecánicas de la masa, así como la textura y estabilidad de las galletas. La

comprensión de estos aspectos es crucial para el desarrollo de productos de panificación que no solo sean más nutritivos, sino que también mantengan la calidad sensorial y funcional similar a los tradicionales.

Sin duda es un enfoque innovador que representa una contribución significativa al campo de la ingeniería química y en especial a la rama destinada a estudiar la tecnología de los alimentos, al proponer un uso innovador de emulgeles en la formulación de galletas. Además, se alinea con las tendencias actuales hacia la reducción de grasas saturadas y la inclusión de ingredientes funcionales que aporten beneficios para la salud, también podría ofrecer soluciones prácticas y accesibles para la industria alimentaria, beneficiando así a los consumidores y promoviendo un estilo de vida más saludable.

## Capítulo 4: Hipótesis

La estructuración de emulgeles O/W empleando mezclas de proteína-polisacárido como estabilizantes permitirá obtener materiales complejos con propiedades fisicoquímicas y funcionales modulables para actuar como sustitutos de grasas sólidas en productos de panificación, mejorando sus propiedades reológicas y texturales, y su estabilidad durante el almacenamiento.

# Capítulo 5: Objetivos

## 5.1 Objetivo General

Diseñar un emulgel de aceite en agua (O/W) estabilizado con mezclas de proteína de chícharo – inulina de achicoria para obtener un sustituto de grasa sólida con propiedades fisicoquímicas, mecánicas y funcionales adecuadas para productos de panificación (galletas).

## 5.2 Objetivos Particulares

- ✓ Establecer las condiciones de pre - acondicionamiento de los biopolímeros (PCH e Inu) que permitan obtener materiales con propiedades viscoelásticas adecuadas para estabilizar los emulgeles.
- ✓ Establecer las condiciones de formación del emulgel O/W estabilizado con las mezclas de proteína de chícharo – inulina de achicoria.
- ✓ Evaluar las propiedades fisicoquímicas y funcionales del emulgel.
- ✓ Establecer los niveles de sustitución de emulgel en las galletas en función de sus propiedades fisicoquímicas, mecánicas y de estabilidad.

## Capítulo 6: Estrategia experimental

En la Figura 7 se muestra el diagrama de flujo con la estrategia experimental aplicada para la realización de este trabajo.

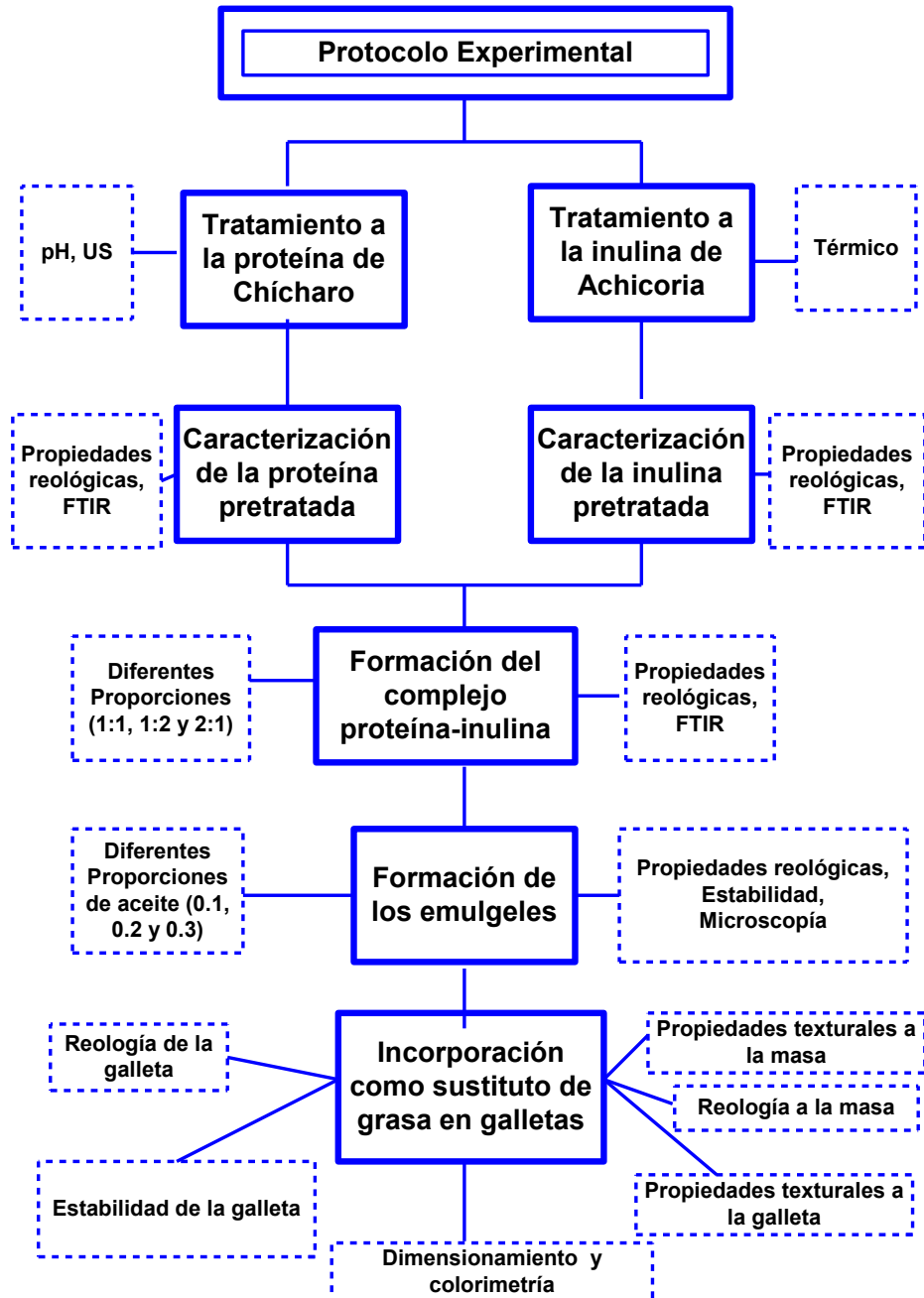


Figura 7 Protocolo experimental utilizado para el desarrollo de la investigación.

## 6.1 Materiales

Se utilizó aislado de proteína de chícharo (PCH, PRO-ASC-13, 85% de proteína, lote: 3700D40190B235360) de AMFHER foods (Ciudad de México, México). La inulina de achicoria (Inu) de la marca Ebien® (87% de fibra dietética) fue comprado a FINITAJ 14, S.A. De C.V. (Santiago de Querétaro, Qro, México). El aceite comestible de canola fue comprado en un supermercado local (Ciudad de México; México). Las sales como cloruro de potasio (KCl), cloruro de sodio (NaCl), nitrato de magnesio ( $MgNO_3$ )<sub>2</sub>, carbonato de potasio ( $K_2CO_3$ ), cloruro de cobre (CuCl), cloruro de litio (LiCl), sulfato de sodio ( $Na_2SO_2$ ), y acetato de potasio ( $CH_3COOK$ ), así como el hidróxido de sodio (NaOH) fueron de la marca J.T Baker (México) grado analítico. El ácido clorhídrico (HCl) y éter de petróleo fueron comprados a Sigma Aldrich Química S.A. de C.V. (Toluca, Estado de México, México). En todos los experimentos se utilizó agua desionizada. Los ingredientes empleados para formación de las galletas (harina de trigo, azúcar estándar, sal yodada, huevo, mantequilla sin sal, polvo para hornear, etc.) fueron adquiridos en la Central de Abastos de la Ciudad de México, México.

## 6.2 Evaluación de la solubilidad de PCH

La solubilidad de PCH se determinó siguiendo la metodología descrita por Shanthakumar et al. (2022) con las siguientes modificaciones. Se preparó una dispersión de PCH al 10 % (p/p) manteniéndola en agitación constante durante 8 h para permitir su hidratación. A muestras independientes de las dispersiones de PCH se les ajustó el pH en un intervalo de 3-10 empleando una solución valorada de HCl (0.1 N) o NaOH (0.1N), según sea necesario. Posteriormente, las dispersiones resultantes fueron centrifugadas a 3,000 rpm durante 30 min en una centrífuga refrigerada Hermle Z36HK (Hermle Labortechnik GmbH, Wehingen, Alemania) a 20 °C. Las fases obtenidas de la centrifugación, sobrenadante (fase rica en proteína soluble) y precipitado (fracción insoluble) fueron separadas mediante decantación,

y secadas en una estufa de vacío a 40 °C hasta alcanzar peso constante. La masa de las fracciones soluble e insoluble fue cuantificada y el porcentaje de proteína soluble (%PS) fue determinado empleando la Ecuación 1.

$$\%PS = \frac{m_{PCH} - m_{sólidos\ sobrenadante}}{m_{PCH}} \times 100 \quad (1)$$

### 6.3 Pre - acondicionamiento de PCH con ultrasonido (US)

La inducción de gelificación en PCH se realizó empleando ultrasonido (US) como método físico de desnaturalización de la proteína. Para ello, dispersiones acuosas de PCH (20% p/p) fueron preparadas de acuerdo con la sección anterior. Previo a la aplicación de US, el pH de las dispersiones fue ajustado a 3 y 6 (debajo y por encima del punto isoeléctrico de PCH ~4.5). Cada tratamiento de pH en las dispersiones de PCH fueron sometidas a US empleando un sonicador Sonics VXC-130 (Vibracell, Newtown, CT, EE. UU.) con una frecuencia de 20 kHz y 80% de amplitud. Los tratamientos se sonicaron durante 1 o 2 ciclos de US de 10 min, registrando la temperatura final de las muestras. Las muestras tratadas fueron almacenadas en refrigeración durante 12 h previas a su caracterización y denominadas como PC<sub>xz</sub>, donde (x) representa el pH que tiene la solución (x = 3 o 6) y la (z) representa el tiempo de ultrasonido aplicado (z = 0, 10 o 20 min).

### 6.4 Pre - acondicionamiento de Inu

Se prepararon dispersiones de Inu al 20% (p/p) en agua desionizada. Las dispersiones fueron sometidas a calentamiento hasta 70 °C y mantenidas a esa temperatura durante 20 min. Posteriormente, las dispersiones fueron sometidas a enfriamiento hasta alcanzar la temperatura ambiente empleando dos velocidades de enfriamiento (5 y 10 °C/min). Las muestras pre - acondicionadas de Inu (I0, I5 o I10) se almacenaron en refrigeración hasta su posterior caracterización.

## 6.5 Caracterización por espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR)

Las muestras pre - acondicionadas de PC<sub>xz</sub> e Inu fueron caracterizadas mediante espectroscopia FTIR para evaluar los cambios estructurales inducidos derivado de los tratamientos de US o temperatura. Las muestras fueron escaneadas en un intervalo de 400 a 4000 cm<sup>-1</sup>, aplicando 20 escaneos con una resolución de 4 cm<sup>-1</sup>.

## 6.6 Propiedades reológicas de las PCH e Inu pre - acondicionadas

Las muestras de PCH e Inu fueron caracterizadas respecto a sus propiedades reológicas de flujo y oscilatorias según De los Santos-Trinidad et al. (2023), empleando un reómetro MCR 300 (Physica Messtechnik GmbH, Stuttgart, Alemania) acoplado a una geometría cono-plato de 50 mm de diámetro y usando 1 mm de gap. Las muestras de PCH e Inu fueron colocadas en el reómetro y se dejaron reposar durante 20 min previos a su caracterización. Las curvas de flujo fueron realizadas en un intervalo de velocidad de corte ( $\dot{\gamma}$ ) entre 10<sup>-3</sup>– 10<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, donde las curvas resultantes de viscosidad aparente ( $\mu$ ) fueron ajustadas al modelo de Ostwald-de-Whaele para la determinación del índice de flujo ( $n$ ) e índice de consistencia ( $K$ , Pa s<sup>-1</sup>), de acuerdo con la Ecuación 2.

$$\mu = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

En el caso de las propiedades viscoelásticas, los módulos viscoelásticos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ) fueron determinados dentro de la región viscoelástica lineal (RVL) en un barrido de frecuencia ( $\omega$ ) entre 10<sup>-2</sup>– 10<sup>3</sup> rad/s.

## 6.7 Mezclas binarias de PCH-Inu

A partir de los resultados obtenidos en los tratamientos de pre - acondicionamiento de PCH e Inu, se eligieron aquellos tratamientos que presentaron mejores

características viscoelásticas en cada uno de los biopolímeros pre - acondicionados, y se prepararon mezclas binarias PC620-I10 utilizando tres relaciones másicas (1:1, 1:2 y 2:1) a una concentración total de biopolímeros de 20% (p/p). Las dispersiones de PCH e Inu pre - acondicionadas se colocaron en un vaso de precipitado en las cantidades necesarias para cada relación másica y se homogeneizaron en un homogeneizador Ultra -Turrax T50 (IKA Works, Inc., Wilmington, NC, EE.UU.) a 10,000 rpm durante 5 min, asegurando la integración de los biopolímeros. Las muestras resultantes (PI<sub>x</sub>, donde x representa la relación másica) se dejaron reposar y almacenaron a 10 °C hasta su caracterización.

## **6.8 Caracterización de las mezclas PCH-Inu**

Las mezclas PI<sub>x</sub> se caracterizaron mediante espectroscopia FTIR y propiedades reológicas, tanto su comportamiento de flujo como sus propiedades viscoelásticas, empleando las mismas condiciones descritas en las secciones 6.5 y 6.6.

## **6.9 Preparación de emulgeles**

Para la formación de los emulgeles O/W se utilizó aceite de canola como fase dispersa (O), y las mezclas PI<sub>x</sub> como fase continua gelada (W). Se utilizaron tres fracciones másicas de fase dispersa,  $\phi = 0.10, 0.20$  y  $0.30$ , respectivamente. Las mezclas geladas de PI<sub>x</sub> se colocaron en un vaso de precipitado y la cantidad necesaria de aceite para cada  $\phi$  fue agregada gota a gota mientras se homogeneizaba en un homogeneizador Ultra-Turrax T50 (IKA Works, Inc., Wilmington, NC, EE.UU.), una vez que la fase O se adicionó en su totalidad, el proceso de emulsificación se llevó a cabo a 10,500 rpm durante 5 min. Los emulgeles resultantes se almacenaron en refrigeración hasta su caracterización.

## **6.10 Caracterización de los emulgeles**

### **a) Estabilidad contra cremado o sedimentación**

Los emulgeles producidos se sometieron a pruebas de estabilidad contra cremado o sedimentación, para ello, se siguió la metodología descrita por Sohail et al. (2018).

Brevemente, 5 g de emulgel se colocaron en tubos de centrifuga y se sometieron a centrifugación a 5,000 rpm por 10 min a 25 °C. Al término del proceso se evaluó la presencia de separación de fases. Los emulgeles fueron monitoreados durante 15 días en intervalos de 24 h entre cada evaluación.

### b) Morfología y tamaño

Una alícuota del emulgel se colocó en entre las superficies de un portaobjetos y cubreobjetos, y fue observada en un microscopio óptico Olympus BX45 (Olympus Corp., Tokio, Japón) acoplado a una cámara digital Moticam 2300 (Motic, Inc., Xiamen, China), empleando una magnificación de 10×. Un total de 40 micrográficas para cada emulgel fueron analizadas con el software de microscopia ZEN con todos los sistemas de captura y análisis de imágenes ZEISS para estimar el tamaño promedio y distribución de tamaño de gota en los emulgeles. Las imágenes que mostraban al menos 20 gotas de emulsión fueron consideradas para estas determinaciones. Las visualizaciones de los emulgeles se realizaron a tiempo cero (recién formado el emulgel) y después de 48 h de almacenamiento.

### c) Reología

La caracterización reológica de los emulgeles se realizó considerando pruebas a temperatura constante siguiendo los procedimientos descritos en la sección 6.6 para las curvas de flujo y módulos viscoelásticos ( $G'$  y  $G''$ ). Además, se evaluó el efecto de la temperatura sobre las propiedades viscoelásticas de los emulgeles, para ello, se aplicaron barridos de temperatura de 20 a 80 °C con rampa de calentamiento de 5 °C/min, utilizando una frecuencia constante de 1 Hz y una deformación del 0.1 % dentro de la RVL (Patel et al., 2015). Para evitar la pérdida de humedad en el emulgel debido al calentamiento, la muestra fue cubierta con parafina sobre el borde de la geometría y el borde externo de la muestra.

#### d) Propiedades de textura

Las propiedades de textura de los emulgel se obtuvieron mediante un análisis de perfil de textura (APT) en un analizador de textura Brookfield CT3-4500 (AMETEK, Middleborough, MA, USA) siguiendo la metodología reportada por Glusac et al. (2018). Una alícuota de emulgel se colocó en un recipiente de vidrio (altura de 10 mm x diámetro de 15 mm), asegurando que durante el llenado no hubiera burbujas en la parte inferior del recipiente. La determinación de las propiedades de textura se realizó utilizando una celda de carga de 4 500 g y la aplicación de una doble compresión sobre la muestra, empleando una sonda cilíndrica TA10 y el elemento TA-DEC, hasta alcanzar una penetración de sonda del 40 %, con una velocidad de prueba fue de 1.0 mm/s. Los resultados obtenidos se reportaron como las propiedades de dureza, cohesividad, resiliencia, masticabilidad, adhesividad, gomosidad y el índice de elasticidad.

### **6.11 Preparación de galletas adicionadas con emulgel**

Las galletas adicionadas con emulgel fueron preparadas basadas en la formulación reportada por Barragán-Martínez et al. (2022). Cinco formulaciones de masa para galletas (ME) fueron obtenidas variando el contenido de emulgel adicionado como sustituto de la grasa de acuerdo con las composiciones de la Tabla 7. Los ingredientes sólidos fueron mezclados y tamizados previos a su incorporación en la fase oleosa (mantequilla previamente cremada con o sin emulgel) y mezclada con el huevo para su batido en una batidora Kitchen Aid 5KPM50 (Kitchen Aid, Benton Harbor, MI, EE. UU.) con un batidor plano, raspando cada 60 s para asegurar la integración de los ingredientes en la masa. La masa se dejó reposar durante 30 min en una laminadora Salva L-500-J (Salva Industrial SL, Lezo, España). La masa fue caracterizada respecto a sus propiedades reológicas y de textura.

Finalmente, la masa se cortó con un cortador circular (4 mm de espesor y 45 mm de diámetro) y se horneó a 185 °C durante 14 min en un horno eléctrico (Oster Mod. TSSTTVFDMAFNS-013, Sunbeam Products, Inc, Atlanta, GA, EE. UU.). Transcurrido este tiempo, las galletas se dejaron enfriar hasta alcanzar temperatura

ambiente (25°C) y se almacenaron en bolsas de plástico herméticas en un desecador hasta su posterior uso.

**Tabla 7 Formulaciones de masas para galleta con emulgeles como sustitutos de grasa**

<b>Ingredientes (g)</b>	<b>ME0</b>	<b>ME25</b>	<b>ME50</b>	<b>ME75</b>	<b>ME100</b>
Harina de trigo	41.00	41.00	41.00	41.00	41.00
Azúcar	23.50	23.50	23.50	23.50	23.50
Huevo	11.70	11.70	11.70	11.70	11.70
Polvo para hornear	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
Sal	0.12	0.12	0.12	0.12	0.12
<b>Mantequilla</b>	<b>23.50</b>	<b>17.59</b>	<b>11.73</b>	<b>5.86</b>	<b>0.00</b>
<b>Emulgel</b>	<b>0.00</b>	<b>5.86</b>	<b>11.73</b>	<b>17.59</b>	<b>23.50</b>

*Cantidades expresadas por cada 100 g de masa para galleta.*

Las galletas resultantes se codificaron como ( $G_x$ ), donde “x” denota el porcentaje de emulgel agregado en la formulación ( $G_0, G_{25}, G_{50}, G_{75}, G_{100}$ ).

## 6.12 Caracterización de las masas y galletas adicionadas con emulgel

### a) Caracterización de las masas

Las masas para galleta con o sin emulgel se caracterizaron reológicamente de acuerdo con la metodología descrita en la sección 6.6. Además, se evaluaron sus propiedades de textura mediante una prueba APT siguiendo la metodología descrita por Agrahar-Murugkar et al. (2015) con algunas modificaciones. Las muestras de masa se colocaron en recipientes de vidrio (40 mm altura x 30 mm diámetro) y fueron sometidas a una prueba de compresión empleando un analizador de textura Brookfield CT3-4500 (AMETEK, Middleborough, MA, EE. UU.) acoplado a una sonda cilíndrica TA11/1000 con una celda de carga de 250 kg y una deformación del 30%. Los ajustes realizados al analizador de textura fueron: velocidad previa a la prueba de 2.0 mm/s, velocidad de prueba de 3.0 mm/s, velocidad posterior a la

prueba de 3.0 mm/s. Los parámetros analizados fueron dureza, adhesividad, resiliencia, cohesividad, elasticidad, gomosidad y masticabilidad.

#### b) Tamaño de las galletas

El diámetro y espesor de las galletas fue medido utilizando un vernier en dos y cuatro puntos distintos en la galleta, respectivamente. El promedio de las mediciones de 10 galletas para el diámetro y espesor fue reportado en cada tratamiento. La extensión en las galletas se calculó al dividir el diámetro y el espesor de las galletas.

#### c) Pérdida de peso después del horneado (PPH)

La PPH se determinó de acuerdo con la ecuación (3):

$$PPH (\%) = \frac{m_{ME} - m_G}{m_{ME}} \times 100 \quad (3)$$

Donde  $m_{ME}$  son los gramos de masa empleados para producir una galleta y  $m_G$  son los gramos de la galleta resultante después del horneado de la masa. La estimación de  $PPH$  se determinó empleando las determinaciones de 10 muestras para cada tratamiento.

#### d) Color

Los parámetros de color de las galletas se determinaron en un colorímetro Minolta (CR- 300, Konica Minolta, Osaka, Japón) y siguiendo la metodología de Barragán-Martínez et al. (2022). Las galletas de cada tratamiento se colocaron en recipiente de vidrio de 10 cm de diámetro y los parámetros de color de ( $L^*$  (luminosidad; 0: negro, 100: blanco),  $a^*$  (+a: rojo, -a: verde),  $b^*$  (+b: amarillo, -b: azul). El índice de pardeamiento (PI) y la diferencia total de color ( $\Delta E$ ) se estimaron de acuerdo con las Ecuaciones (4 – 6) descritas por Nadian et al. (2021) y Alsaleem & Hamouda (2024).

$$PI = \frac{[100 \times (x - 0.31)]}{0.17} \quad (4)$$

donde

$$x = \frac{(a^* + 1.75L^*)}{(5.645L^* + a^* - 3.012b^*)} \quad (5)$$

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 + (\Delta L^*)^2} \quad (6)$$

Los valores de los parámetros de color representan en valor promedio de 5 determinaciones de color tomadas en distintos puntos aleatorios de la galleta y considerando 10 galletas por tratamiento.

#### e) Propiedades texturales

Para evaluar la dureza y firmeza de las galletas, se implementó la metodología descrita por (Rodríguez, 2015). La prueba de ruptura se llevó a cabo en el analizador de textura Brookfield CT3-4500 (AMETEK Brookfield, Middleborough, MA, EE. UU.), equipado con una sonda TA 39 y un elemento TA-DE. Los parámetros establecidos para la evaluación de la textura incluyeron una carga de activación de 0.067 N, con una corrección de 3059.100 N, ejecutando la prueba a una velocidad de 0.5 mm/s, una velocidad de pre - prueba de 2.0 mm/s y una velocidad de retorno de 4.5 mm/s. La prueba se llevó a cabo hasta la ruptura de la galleta, y el valor de dureza se registró como la fuerza máxima necesaria para provocar la ruptura. Adicionalmente, se determinaron parámetros como la fracturabilidad y el porcentaje de deformación en la primera fractura. Se realizó el análisis en diez galletas para cada tratamiento y los resultados se reportaron como el promedio de dichas determinaciones.

### 6.13 Análisis de la adsorción de agua

#### a) Isotermas de sorción

Para obtener las isotermas de sorción de agua para los tratamientos de galletas con y sin emulgel se determinaron basados en la metodología descrita por Collazos-Escobar et al. (2023), utilizando un medidor de actividad de agua AQUALAB con compensador de temperatura (mod. Series 3 TE, Decagon Devices, Inc., Pullman, WA, EE. UU.). Para cada prueba, aproximadamente 4 g de muestra se utilizaron

para obtener las isothermas de sorción de agua a temperaturas de 5, 20, 30 y 45 °C, en un intervalo de actividad de agua ( $a_w$ ) de 0.1-0.8.

#### b) Modelo de BET

Los datos de las isothermas de sorción de agua se ajustaron al modelo de BET (Ecuación 7).

$$W_e = \frac{W_0 * C * a_w}{(1-a_w)*(1+(C-1)*a_w)} \quad (7)$$

Este modelo establece una relación entre la humedad en equilibrio ( $W_e$ ) y la actividad de agua ( $a_w$ ) mediante dos parámetros  $W_0$  y  $C$ , donde el primero representa la humedad adsorbida en la monocapa, mientras que  $C$  es una constante específica del material que se relaciona con el calor liberado durante el proceso de sorción.

#### c) Modelo de GAB

Las propiedades de adsorción de agua en las galletas se realizaron mediante un ajuste de los datos experimentales de las isothermas de sorción al modelo de GAB. Los parámetros del modelo de GAB (Ecuación 9) fueron estimados a través del arreglo de la Ecuación 9 a un modelo polinomial de segundo orden (Ecuación 10) y del ajuste de los datos experimentales. El contenido de humedad de equilibrio de la monocapa ( $W_e$ , % b.s.; Ecuación 8), los parámetros  $C$  y  $K$  se identificaron al minimizar el error cuadrático medio (ECM, Ecuación 10), utilizando el método de optimización de gradiente reducido (GRG, Ecuación 11) a través de la herramienta Solver disponible en la hoja de cálculo de Excel (Microsoft, E.U.A). El ajuste al modelo de GAB se realizó para cada temperatura.

$$W_e = \frac{m_0 * X_{wi} + (m_f - m_0)}{m_0 * (1 - X_0)} \quad (8)$$

donde  $W_e$  es la humedad en equilibrio (% b.s.) de la muestra alcanzada en cada valor de  $a_w$ ;  $m_0$  y  $m_f$  son las masas inicial y final de las muestras;  $X_{wi}$  es la humedad inicial de la muestra (b.s).

$$W_e = \frac{W_0 \cdot C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 + (C - 1) \cdot K \cdot a_w)} \quad (9)$$

$$\frac{a_w}{W_e} = \frac{1}{W_0 \cdot C \cdot K} + \frac{C - 2}{W_0 \cdot C} \cdot a_w + \frac{K \cdot (1 - C)}{W_0 \cdot C} \cdot a_w^2 \quad (10)$$

$$GRC = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{exp} - Y_{pred})^2}{N} \quad (11)$$

donde C y K son constantes del modelo de GAB asociadas al calor de sorción de la monocapa y al calor de sorción de la multicapa, respectivamente;  $Y_{exp}$  y  $Y_{pred}$  son las respuestas experimentales y predecidas ( $a_w/X_e$ ), y N es el número de datos experimentales (Collazos-Escobar et al., 2023).

Además, la influencia de los parámetros de C y K respecto de la temperatura fue determinado para evaluar el calor de sorción de agua en la monocapa ( $H_m$ ) y en la multicapa ( $H_n$ ) (kJ/mol) a través del uso de relaciones tipo-Arrhenius como se muestra en las Ecuaciones 12 y 13, respectivamente.

$$C = C_0 \cdot e^{\left(\frac{H_m - H_n}{RT}\right)} \quad (12)$$

$$K = K_0 \cdot e^{\left(\frac{\lambda_r - H_n}{RT}\right)} \quad (13)$$

Donde  $C_0$  y  $K_0$  son los parámetros preexponenciales (GAB),  $R$  es la constante universal de los gases ( $8.31447 \times 10^{-3} \text{ kJ/mol} \cdot \text{K}$ ),  $\lambda_r$  es el calor latente de vaporización de agua ( $\text{kJ/mol}$ ) y  $T$  es la temperatura (K).

A partir de los valores de C y K, el área de adsorción,  $S_A$ , ( $\text{m}^2/\text{g}$ , b.s) y la presión de difusión,  $\pi$ , ( $\text{J}/\text{m}^2$ ) de las galletas se calculó a las diferentes temperaturas usando las ecuaciones 14 y 15.

$$S_A = W_0 \left(\frac{1}{MW}\right) N_0 A_m \quad (14)$$

$$\pi = \frac{k \cdot T}{A_m} \ln \left[ \frac{1 + CKa_w - Ka_w}{1 - Ka_w} \right]_{0.05}^{a_w} \quad (15)$$

Donde  $MW$  es el peso molecular del agua (kg/mol),  $N_0$  es el número de Avogadro ( $6 \times 10^{23}$  moléculas /mol),  $A_m$  es el área de una molécula de agua ( $1.06 \times 10^{-19}$  m<sup>2</sup>/molécula), y  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1.380 \times 10^{-23}$  J/K) (Červenka et al., 2019).

El tamaño de poro crítico ( $r_c$ , nm) se estimó utilizando la ecuación de Kelvin (Ecuación 16) y la expresión de Halsey (Ecuación 17) fue empleada para calcular el espesor del agua adsorbida en la multicapa (Tao et al., 2018). Finalmente, el tamaño de poro efectivo ( $r_p$ , nm) se calculó con la Ecuación 18.

$$r_c = \frac{2\sigma V_m}{RT \ln(a_w)} \quad (16)$$

$$t = 0.354 \left( \frac{-5}{\ln(a_w)} \right)^{1/3} \quad (17)$$

$$r_p = r_c + t \quad (18)$$

Donde  $\sigma$  es la tensión superficial del agua (N/m) y  $V_m$  es el volumen molar del adsorbato en el seno de una fase líquida (m<sup>3</sup>/mol).

## 6.14 Propiedades termodinámicas

El análisis termodinámico de adsorción de agua en las galletas con y sin emulgel fue realizado mediante el análisis diferencial e integral de las isotermas a distintas temperaturas para la estimación de la energía libre de Gibbs y la entalpía y entropía diferencia e integral.

### a) Propiedades diferenciales

La energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) se determinó con la Ecuación 19.

$$\Delta G = RT \ln(a_w) \quad (19)$$

El calor neto isostérico de adsorción o entalpía diferencial ( $\Delta H_{dif}$ ) se calculó empleando la ecuación de Clausius-Clapeyron (Ecuación 20) de acuerdo con la metodología descrita por Sánchez-Torres et al. (2021). La entropía diferencial ( $\Delta S_{dif}$ ) se calculó como la diferencia entre  $\Delta H_{dif}$  y  $\Delta G$  (Ecuación 21).

$$\Delta H_{dif} = -R \left[ \frac{\partial(\ln a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{X_e} \quad (20)$$

$$\Delta S_{dif} = -\frac{\Delta H_{dif} - \Delta G}{T} \quad (21)$$

Donde la relación lineal entre la entalpía y entropía diferenciales se utiliza como criterio de compensación (Ecuación 22).

$$\Delta H_{dif} = T_\beta \Delta S_{dif} + \Delta G_\beta \quad (22)$$

Donde  $T_\beta$  es la temperatura isocinática (K), y  $\Delta G_\beta$  es la energía libre de Gibbs a la temperatura isocinática. Si  $T_\beta$  es diferente de la temperatura armónica ( $T_{hm}$ ) Ecuación 23, la teoría de compensación es válida.

$$T_{hm} = \frac{n_t}{\sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{1}{T_i}\right)} \quad (23)$$

Donde  $n_t$  es el número total de isothermas.

#### b) Propiedades integrales

El calor integral total de adsorción (entalpía integral,  $\Delta H_{int}$ ) es calculado de manera semejante a la entalpía diferencial, como se observa en la Ecuación 24, manteniendo el valor de la presión  $\pi$  constante.

$$\Delta H_{int} = -R \left[ \frac{\partial(\ln a_w)}{\partial\left(\frac{1}{T}\right)} \right]_{\pi} \quad (24)$$

Mientras que la entropía integral se estima mediante la Ecuación 25.

$$\Delta S_{dif} = -\frac{\Delta H_{int} - R T \ln(a_w)^*}{T} \quad (25)$$

donde  $(a_w)^*$  es la actividad de agua geométrica interpolada a una presión de difusión ( $\pi$ ) constante para cada temperatura experimental.

### 6.15 Análisis estadístico

Los datos experimentales derivados de la caracterización de los materiales (dispersiones, emulgeles, galletas) fueron analizados en el software estadístico SPSS (version, IBM, E.U.A). Se aplicó un análisis de varianza de una vía (ANOVA), y donde fuera necesario se aplicaron pruebas de comparación de Tukey a un nivel de significancia de  $P < 0.05$ . Todas las muestras y caracterizaciones se realizaron al menos por triplicado.

## Capítulo 7: Resultados

### 7.1 Evaluación de la solubilidad de PCH

Las proteínas, como se mencionó en secciones anteriores, deben su actividad funcional como agentes emulsionantes a su solubilidad. Esta característica es influenciada por condiciones ambientales como la fuerza iónica, concentración, temperatura, pH, entre otros. Los resultados de la evaluación de la solubilidad de PCH en función del pH se muestra en la Figura 7.1, donde puede observarse que en un intervalo de pH entre 4 y 5 se encuentra la menor solubilidad de PCH, coincidiendo con el punto isoeléctrico reportado para los aislados de proteína de chícharo (~4.5) (Guldiken et al., 2023). Además, no se encontraron diferencias significativas ( $P < 0.05$ ) en el porcentaje de solubilidad  $\text{pH} > 6.0$ , mientras que, por debajo del punto isoeléctrico dentro del intervalo de pH evaluado, la solubilidad más alta se encontró a pH 3.

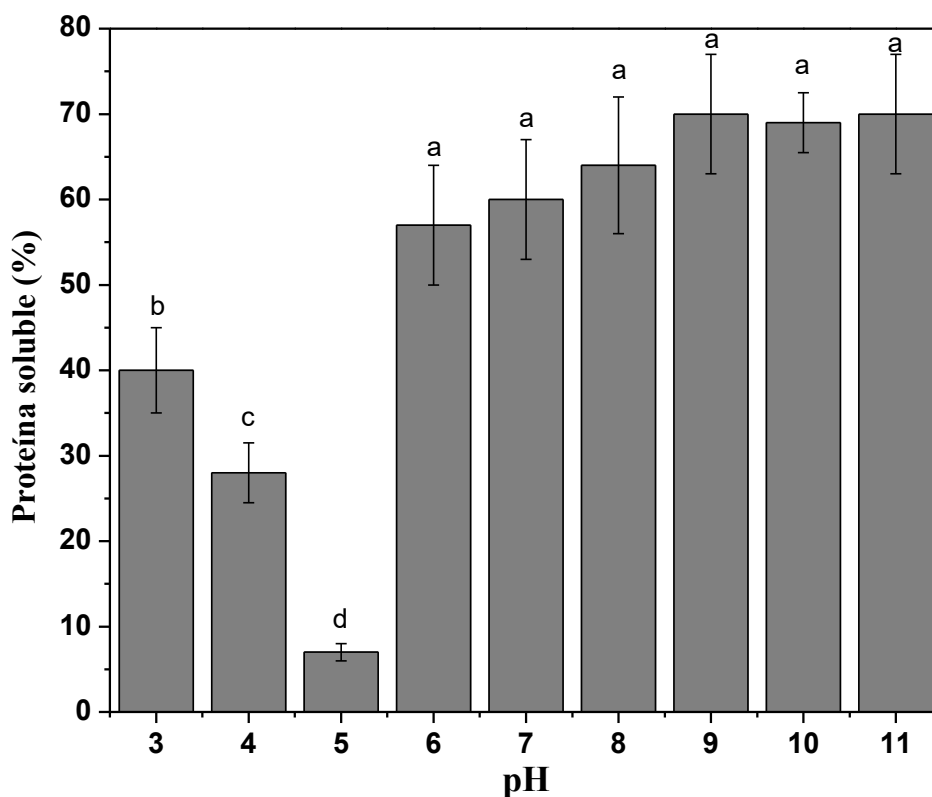


Figura 7.1 Solubilidad de la proteína de chícharo a diferentes valores de pH. Letras distintas significan diferencia significativa ( $P < 0.05$ ).

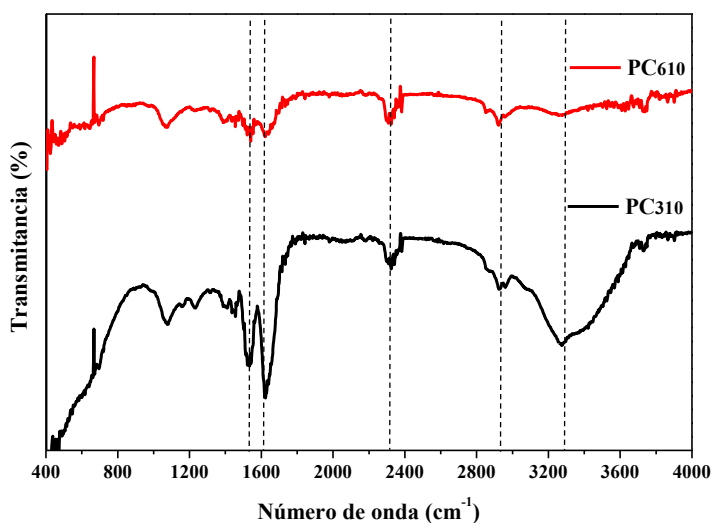
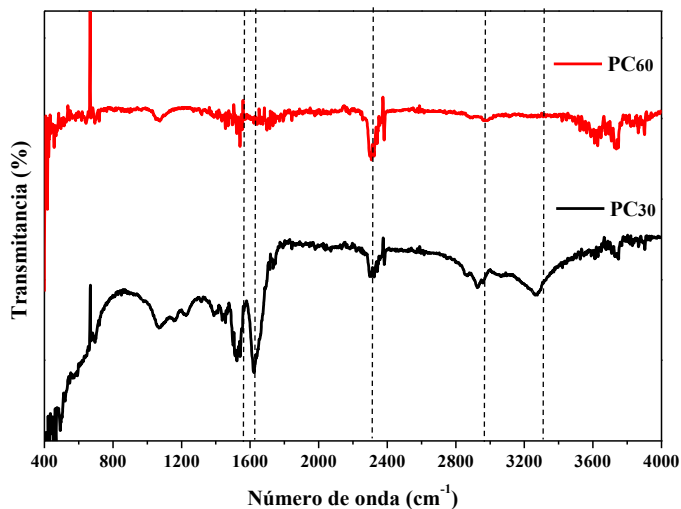
Basado en los datos de solubilidad, el pre-acondicionamiento de PCH para la obtención de geles se realizó a pH 3 y 6, siendo este último el pH natural de la dispersión de PCH.

## 7.2 Pre - acondicionamiento de PCH

Posterior a la aplicación de ultrasonido en las dispersiones de PCH a pH 3 y 6, éstas fueron caracterizadas por espectroscopia FTIR (Figura 7.2), con la finalidad de evaluar el efecto de la aplicación de ultrasonido por 1 o 2 ciclos de 10 min, sobre la estructura y propiedades funcionales de PCH. En la caso de las dispersiones de PCH nativas a pH 3 y 6, PC30 y PC60 respectivamente (Figura 7.2<sup>a</sup>), la región ubicada en  $1630\text{ cm}^{-1}$  se asocia con la región de la amida I en proteínas debido a la vibración del estiramiento del enlace C=O en el grupo amida de la proteína, y de acuerdo con diversos autores, dentro de esta región se encuentran las estructuras tipo hoja- $\beta$ , y es considerada un indicador confiable de las estructuras secundarias en las proteínas (Belton et al., 2017; Carbonaro et al., 2012). De acuerdo con Moreno et al. (2020), dentro de la región de la amida I, las principales estructuras secundarias de las proteínas se encuentran las estructuras tipo  $\alpha$ -hélice ( $1650\text{-}1660\text{ cm}^{-1}$ ), bandas  $\beta$  ( $1660\text{-}1690\text{ cm}^{-1}$ ,  $1630\text{-}1638\text{ cm}^{-1}$ ,  $1620\text{-}1630\text{ cm}^{-1}$ ), agregados intermoleculares de láminas  $\beta$  ( $1690\text{-}1695\text{ cm}^{-1}$ ,  $1610\text{-}1620\text{ cm}^{-1}$ ) y estructuras aleatorias ( $1640\text{-}1648\text{ cm}^{-1}$ ). Respecto a las señales observadas entre  $1500\text{-}1544\text{ cm}^{-1}$ , estas se asocian a la región de la amida II, la cual tiene a verse menos afectada por los fenómenos de hidratación de la molécula de proteína, ya estas se asocian con la vibración de flexión en el plano del enlace N-H y al estiramiento del enlace C-N en el grupo amida (Kong & Shaoning, 2007). Mientras que las señales observadas en la región de  $1200\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ , definidas por la región de la amida III (Erdoğdu et al., 2023).

Por otra parte, el pH de la dispersión de PC (Figura 7.2a) sí presentó efecto sobre las señales de la región de la amida I, de acuerdo con Othmeni et al. (2025), el cambio de pH (neutro a 3) en la proteína de chícharo provoca transiciones en las

estructuras tipo hoja- $\beta$  hacia estructuras tipo giros- $\beta$ , conduciendo a estructuras más ordenadas y compactas, debido a que las interacciones tipo puente de hidrógeno se intensifican, posiblemente por esta razón, las señales en los espectros a pH6 tienden a mostrar señales menos intensas y definidas (Figura 7.2). Estos cambios estructurales también se han descrito como responsables de la obtención de estructuras más flexibles.



(c)

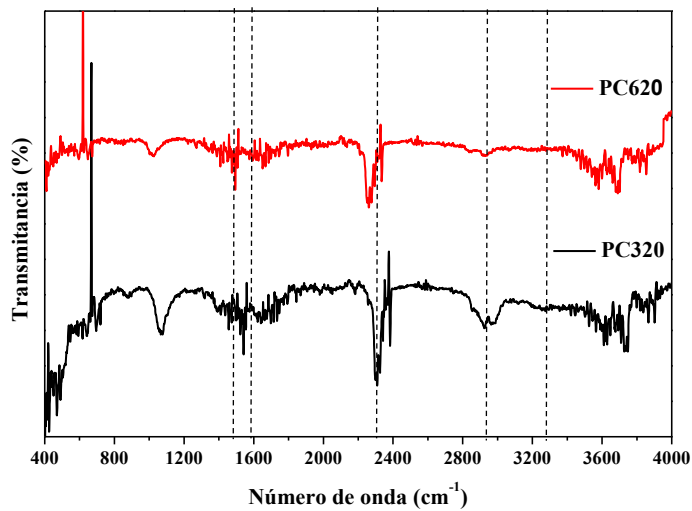


Figura 7.2 Espectros FTIR para las dispersiones de PCH: a) pH3 y b) pH 6 con y sin tratamiento de ultrasonido.

Respecto a la aplicación de ultrasonido en las dispersiones de PCH, en las Figuras 7.2b y 7.2c se muestran los perfiles de FTIR para las dispersiones de PCH pre - acondicionadas para cada pH. En ambos casos, la aplicación de ultrasonido indujo modificaciones en las estructuras secundarias de la proteína, en la región de la amida A ( $3279\text{ cm}^{-1}$ ) asociada con las vibraciones de estiramiento N-H, revelaron que la incidencia de puentes de hidrógeno son más notables en condiciones de pH 3 (Figura 7.3b) respecto a su contraparte pre - acondicionada a pH 6 (Figura 3c), lo cual puede deberse a lo mencionado previamente, acerca de un mayor ordenamiento estructural en la proteína a valores de pH ácidos. Por otra parte, las señales observadas alrededor de  $1000\text{ cm}^{-1}$ ,  $1629\text{ cm}^{-1}$ ,  $2300\text{ cm}^{-1}$  y  $3300\text{ cm}^{-1}$  mostraron cambios significativos en la intensidad de los picos, siendo más intensos en los tratamientos pre - acondicionados a pH 3. De acuerdo con algunos autores, estos cambios de intensidad en las señales pueden deberse a la presencia de fracciones proteicas de bajo peso molecular, las cuales al ser sometidas a cambios de pH y la aplicación de ultrasonido, pueden generar la combinación de picos asociados con vibraciones de estiramiento C-N y deformaciones de las interacciones de la amida (Erdoğdu et al., 2023; Başıyigit et al., 2023).

### 7.2.1 Propiedades reológicas

En la Figura 7.3 se presentan las curvas de flujo para las dispersiones de PCH pre - acondicionadas con ultrasonido a pH 3 (Figura 7.3a) y pH 6 (Figura 7.3b). Para el caso de los tratamientos realizados a pH 3, todos los tratamientos mostraron un comportamiento pseudoplástico, donde la viscosidad disminuyó conforme se incrementó la velocidad de corte. La aplicación de un mayor tiempo de ultrasonido como método de pre - acondicionamiento provocó un incremento en los valores de viscosidad (PC320>PC310>PC30 y PC620>PC610>PC60), siendo las muestras control (PC30 y PC60) las que menor valor de viscosidad aparente exhibieron. Para el caso de los tratamientos a pH 6 (Figura 7.3b), las muestras presentaron también un comportamiento pseudoplástico, sin embargo, la magnitud de la viscosidad aparente en todo el intervalo de velocidad de corte fue significativamente mayor a la observada a pH 3.

Este resultado es similar al reportado por Kang et al. (2024), quienes encontraron que la combinación de un cambio de pH y la aplicación de ultrasonido en proteínas de leguminosas (aislado de proteína de soya), provocó el desdoblamiento de la estructura de la proteína debido a la cavitación generada durante el ultrasonido, produciendo el rompimiento de la molécula de la proteína y obteniendo fracciones de menor tamaño de partícula, provocando que al incrementar el esfuerzo de corte en la dispersión de proteína, la flexibilidad de estas estructuras sea mayor y entonces presente una menor resistencia al flujo , mejorando su movilidad en el seno de la solución.

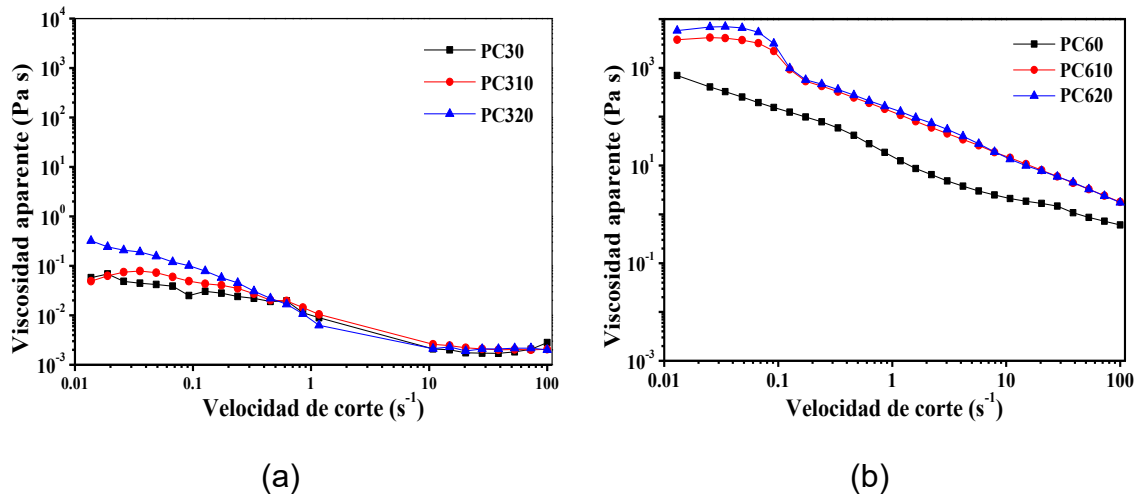


Figura 7.3 Perfil de viscosidad para las dispersiones de PCH pre - acondicionadas con ultrasonido (0 min, 10 min y 20 min) a pH 3 (a) y pH 6 (b).

Las curvas de flujo fueron ajustadas al modelo de Ostwald-de Waele (Ecuación 2) y los parámetros resultantes de dicho ajuste se muestran en la Tabla 7.1, donde el índice de consistencia ( $n$ ) presenta valores menores a 1.0, lo que corresponde a la descripción de un material readelgazante o pseudoplástico.

**Tabla 7.1 Parámetros de modelo de Ostwald-de Waele para dispersiones de PCH pre acondicionadas con ultrasonido.**

Tratamiento	$n$ (adim)	$K$ (Pa*s)	$R^2$
PC30	0.53	0.0085	0.8426
PC310	0.51	0.0105	0.8771
PC320	0.33	0.0142	0.8962
PC60	0.19	17.858	0.9884
PC610	0.26	92.934	0.9541
PC620	0.12	121.94	0.9936

Respecto a las propiedades viscoelásticas, la Figura 7.4 muestra los perfiles obtenidos para los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ), donde los tratamientos PC6 con y sin ultrasonido exhibieron un comportamiento predominantemente elástico tipo sólido ( $G' > G''$ ). Respecto a los tratamientos PC3,

sólo el tratamiento donde no hubo pre - acondicionamiento (PC30) mostró un carácter predominantemente tipo sólido ( $G' > G''$ ). En el caso del tratamiento PC310 se encontró que, en todo el intervalo de frecuencia angular, el módulo de pérdida fue mayor al de almacenamiento ( $G'' > G'$ ), indicando que este tratamiento presentaba un carácter predominantemente viscoso. En el caso de PC320 puede observarse que frecuencias por debajo de  $10 \text{ s}^{-1}$ , la dispersión pre - acondicionada presenta un comportamiento elástico, lo que puede asociarse con el efecto del ultrasonido sobre la obtención de una estructura más firme, pero que, a valores por arriba de esta frecuencia angular, el comportamiento de los módulos se invierte, siendo el módulo de pérdida el que exhibe valores mayores. Lo anterior puede deberse a que, a partir del punto de cruce de los módulos, la estructura formada originalmente después de aplicar 20 min de ultrasonido no posee fuerza suficiente para resistir a la deformación, siendo este punto de cruce el punto máximo que soporta el gel antes de romperse y comportarse como un material fluido.

Respecto a los tratamientos a pH 6, como se mencionó antes, todos mostraron un comportamiento elástico predominante (tipo - sólido) sin exhibir puntos de cruce como en el caso de los tratamientos a pH 3. Por otra parte, el efecto del ultrasonido mostró un incremento en el carácter elástico del sistema, sin mostrar diferencias entre la aplicación de 10 o 20 min de ultrasonido. Debido a que los tratamientos que mejores características de estructuración y propiedades elásticas presentaron fueron obtenidos a pH 6, este pH fue empleado como condición de pre - acondicionamiento de las PCH, mientras que el tiempo de ultrasonido fue de 20 min.

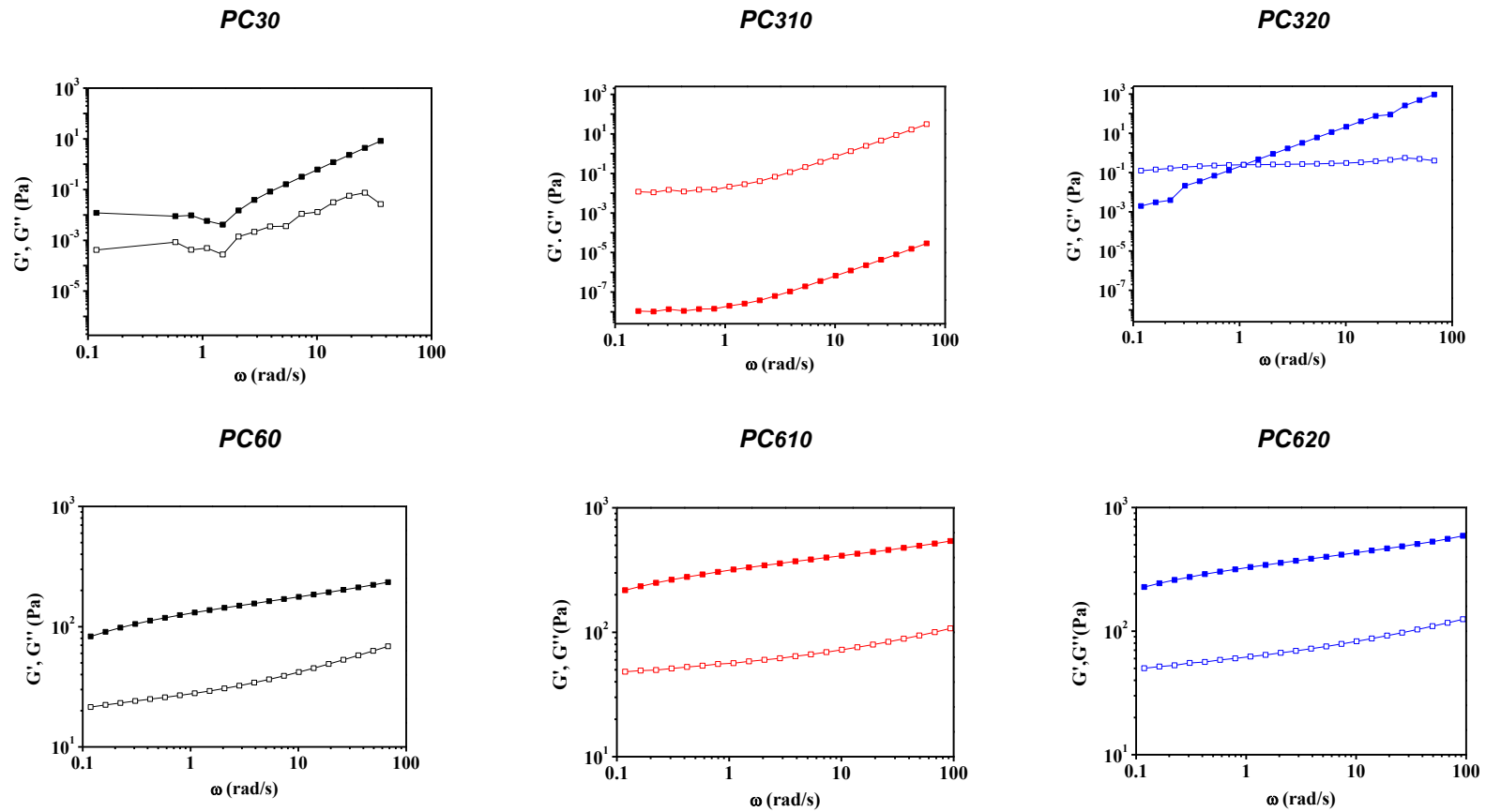


Figura 7.4 Perfiles de módulos de almacenamiento ( $G'$ , símbolos llenos) y de pérdida ( $G''$ , símbolos vacíos) para las dispersiones de PCH pre - acondicionada con ultrasonido (0, 10 y 20 min) a pH 3 y 6.

### 7.3 Pre - acondicionamiento de Inu

Diversos trabajos han reportado que si bien las inulinas ofrecen ventajas nutraceuticas cuando éstas son aplicadas en los alimentos, parte de sus propiedades funcionales y tecnológicas se deben a la capacidad que tienen para actuar como agentes de textura o espesantes (Chiavaro et al., 2007; Piao et al., 2023). En este sentido, Kim et al. (2001) encontró que la aplicación de tratamiento térmico en la inulina produce geles fuertes, lisos y más homogéneos, respecto a aquellos obtenidos sin el tratamiento térmico. La espectroscopia FTIR para los geles de Inu pre - acondicionados con distintas condiciones de tratamiento térmico se muestran en la Figura 7.5.

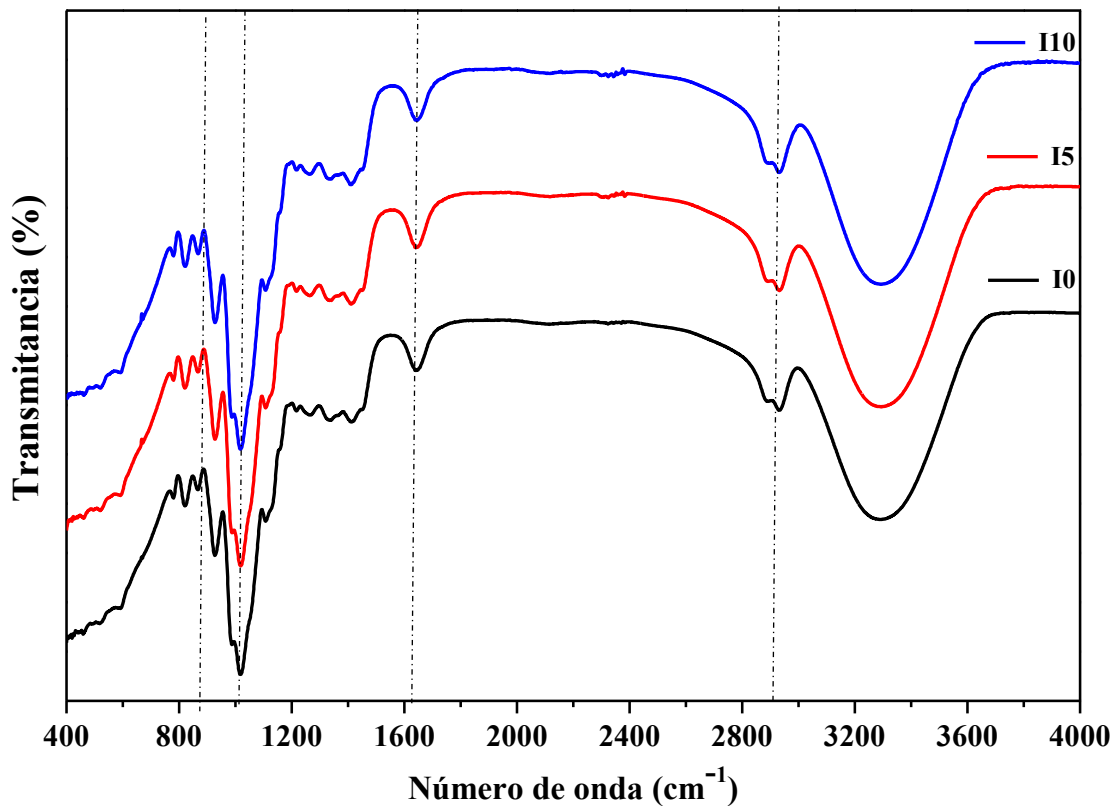


Figura 7.5 Espectro FTIR para Inu sin acondicionamiento (I0) y con pre - acondicionamiento con calentamiento usando dos velocidades de enfriamiento (5 y 10 °C/min; I5 e I10).

De acuerdo con los resultados obtenidos, la aplicación de un tratamiento térmico sobre las dispersiones de inulina no provocó cambios drásticos en la estructura del biopolímero ni en intensidad ni en la localización de las señales. Basado en la literatura, las inulinas presentan picos característicos ubicados en la región de  $1031\text{ cm}^{-1}$  –  $1131\text{ cm}^{-1}$ , representativos de los estiramientos de los enlaces C-C, C-O, y C-O-C de los anillos de fructo - furanosa; las señales ubicadas entre  $827\text{ cm}^{-1}$  y  $874\text{ cm}^{-1}$  asociadas con enlaces 2-ceto en fructo - furanosa, ambas consideradas como señales que definen la existencia de enlaces  $\beta$ -(2→1) glicosídicos (Akram & Garut, 2020; Apolinário et al., 2017; Petkova et al., 2018). La presencia de picos de baja intensidad en el rango de ( $2800 - 3000\text{ cm}^{-1}$ ) representan las vibraciones de estiramiento de los enlaces C-H en los grupos metilo y metileno de la cadena principal de la inulina (Li et al., 2021), así como bandas características de los polisacáridos, observando una banda ancha de alta intensidad aproximadamente a partir de los  $3200\text{ cm}^{-1}$  hasta los  $3500\text{ cm}^{-1}$  que corresponde a las vibraciones de los grupos hidroxilos (-OH), asociadas a la glucosa y fructosa en la estructura de la inulina (Balan et al., 2018).

### 7.3.1 Propiedades reológicas de Inu pre - acondicionada

Las propiedades reológicas de las dispersiones de Inu pre - acondicionadas se muestran en la Figura 7.6. Todas las muestras mostraron un comportamiento pseudoplástico de reo adelgazamiento conforme la velocidad de corte se incrementa (Figura 7.6a), mostrando en todos los casos un *plateau* Newtoniano a velocidades de corte por arriba de  $30\text{ s}^{-1}$ , sin diferencia significativa en la magnitud de la viscosidad aparente. De acuerdo con el ajuste de los datos al modelo de Ostwald-de Waele (Ecuación 2), los parámetros del ajuste se reportan en la Tabla 7.2, con valores del índice de flujo ( $n$ ) entre 0.29 y 0.44, y de 0.008 a 0.010 Pa s para el índice de consistencia ( $K$ ). En el caso particular de Inu, la aplicación de un enfriamiento más rápido (I10) condujo a desarrollar un material con mayor resistencia al flujo para velocidades de corte por debajo de  $1\text{ s}^{-1}$ , seguido de la dispersión control (I0) y de la pre-acondicionada con una velocidad de enfriamiento

a 5 °C/min (I5). Resultados similares fueron reportados por Xu & Kenar (2024), quienes también observaron un comportamiento pseudoplástico en dispersiones de inulina, cuyo comportamiento fue asociado con el reacomodo de las cadenas del biopolímero para alinearse a la dirección del flujo y disminuyendo por tanto su resistencia a fluir.

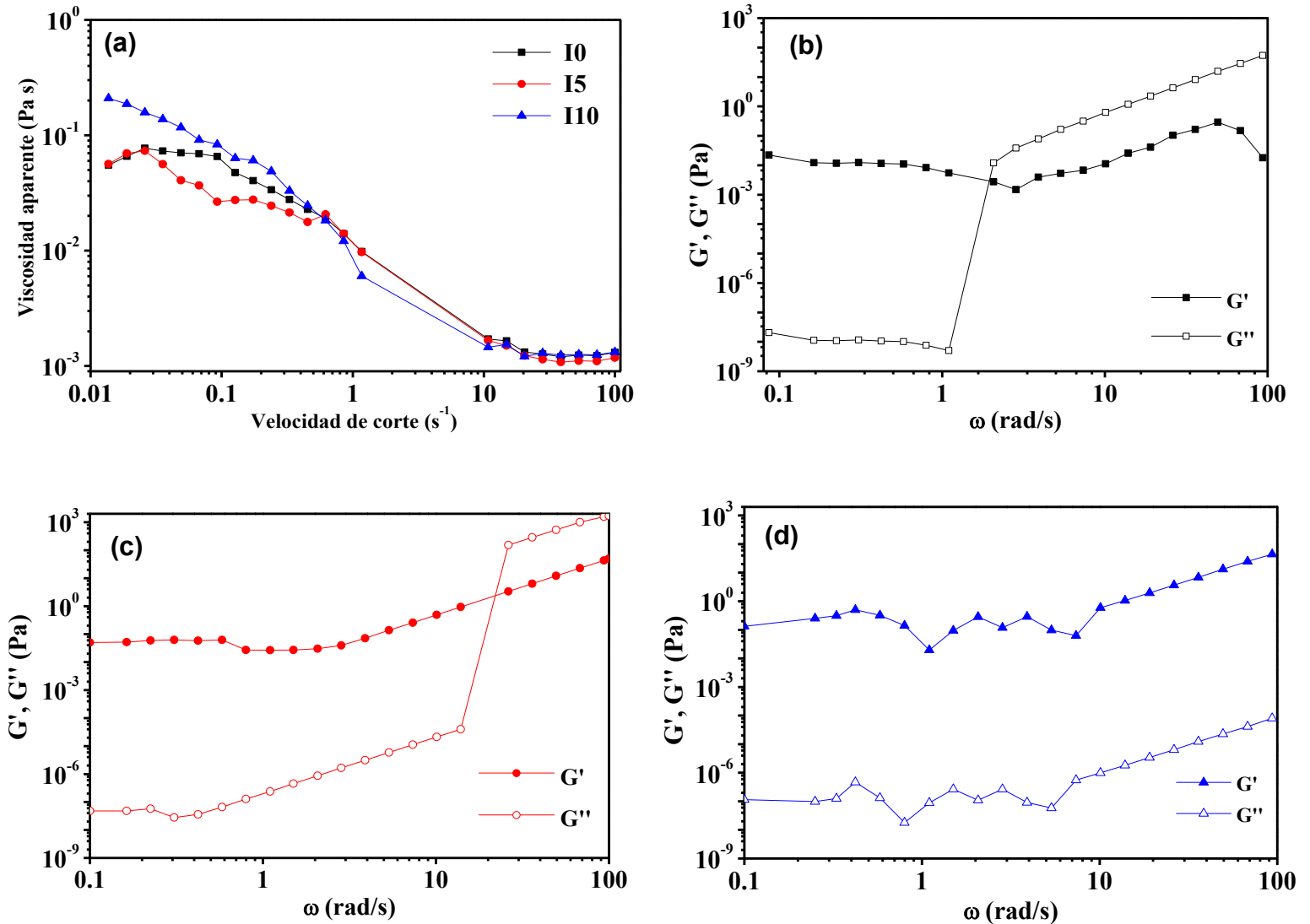


Figura 7.6 (a) Perfil de viscosidad aparente de Inu control (I0) y tratamientos de pre-acondicionamiento térmico (I5 e I10). Módulos viscoelásticos para (b) I0, (c) I5 y (d) I10.

En el caso de las propiedades viscoelásticas, la muestra de Inu sin tratamiento térmico (I0) exhibió un comportamiento predominantemente elástico a frecuencias ( $\omega$ ) por debajo de 1 rad/s, mostrando un cambio de comportamiento ( $G'' > G'$ ) a

valores de  $\omega$  mayores. Un comportamiento semejante fue observado en la Inu tratada térmicamente con una velocidad de enfriamiento de 5 °C/min (I5), sin embargo, en este tratamiento el punto de cruce de los módulos se dio a valores de  $\omega$  por arriba 20 rad/s, mostrando una mejor estructuración y mayor resistencia a la deformación por parte de este gel, aunque aún susceptible de rompimiento a altas frecuencias de deformación. Finalmente, el tratamiento I10 presentó valores de  $G' > G''$  en todo el intervalo de frecuencia, mostrando que la velocidad de enfriamiento durante la estructuración del gel de inulina sí tiene efecto sobre la estructuración y reacomodo de las cadenas poliméricas de este polisacárido, logrando una mayor elasticidad y resistencia e intensidad en las interacciones de las cadenas polisacáridas (Xu & Kenar, 2024).

**Tabla 7.2 Parámetros de flujo para los tratamientos de Inu con y sin pre - acondicionamiento.**

<b>Tratamiento</b>	<b>n(adim)</b>	<b>K(Pa*s)</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
<b>I0</b>	0.38	0.0088	0.8437
<b>I5</b>	0.44	0.0072	0.8677
<b>I10</b>	0.29	0.0104	0.8985

Liu et al. (2019) reportaron que, para lograr una textura firme y estable en productos de panificación o en la formulación de geles y emulgeles, es fundamental seleccionar las concentraciones o el tratamiento térmico de la inulina que proporcionen los mayores valores de  $G'$ . Asimismo, González et al. (2004) evaluaron las propiedades reológicas de alimentos lácteos gelificados, específicamente natillas con presencia de inulina a diferentes concentraciones, y concluyeron que la capacidad de gelificación y la estabilidad de las muestras estaban directamente correlacionadas con un incremento significativo en el módulo  $G'$ , por lo que, considerando los resultados obtenidos, el pre - acondicionamiento térmico con una velocidad de enfriamiento de 10 °C/min para la inulina fue el que mejores características de estructuración del gel presentó, por lo que esta condición fue empleada para la formación y estabilización de los emulgeles.

## 7.4 Caracterización de mezclas binarias PCH - Inu

Basado en los resultados de las secciones anteriores, las mezclas de proteína-polisacárido que actuarán como estabilizantes y formadores de los emulgeles fueron formadas a partir de PC620 e I10, dado que estas condiciones de pre-acondicionamiento fueron las que presentaron mejores características viscoelásticas y estructurales. Por lo que en esta sección se describe el efecto que tiene la relación másica de la mezcla (PC620:I10 = 1:1, 1:2 y 2:1) sobre la formación de la fase gelada. La Figura 7.7 muestra los espectros de FTIR para las mezclas binarias, con la finalidad de poner en evidencia las interacciones que pueden ocurrir al mezclar PCH e Inu.

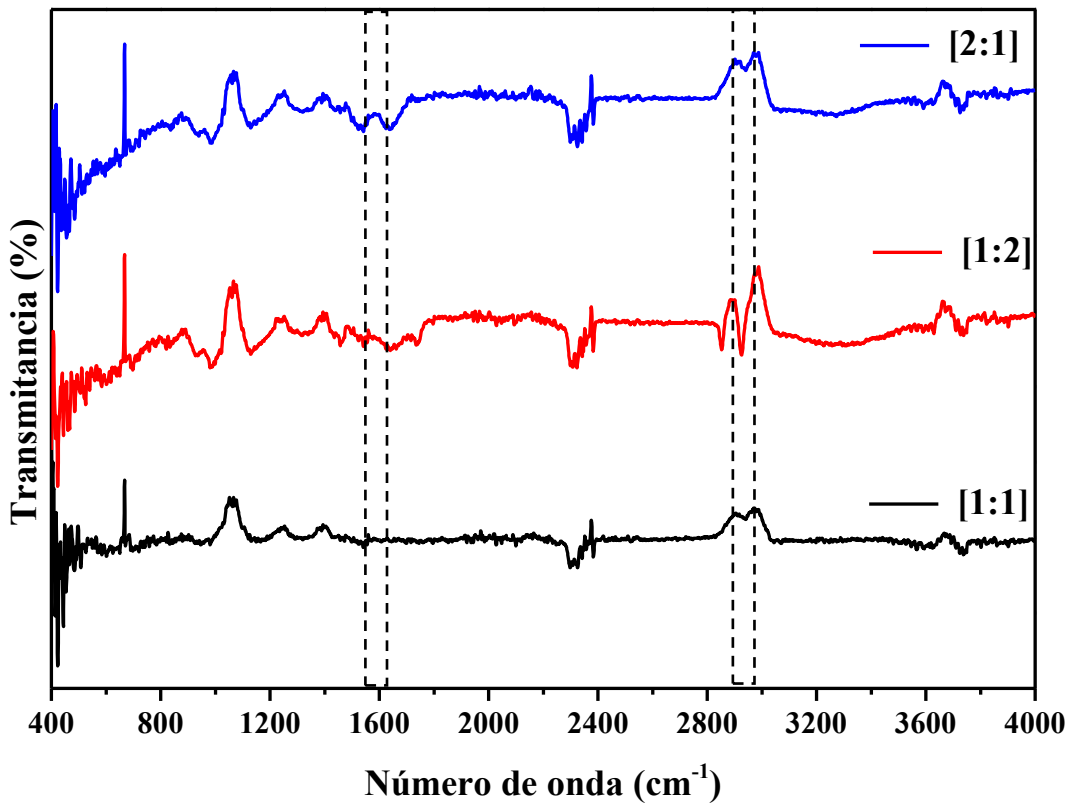


Figura 7.7 Espectros FTIR para mezclas de PCH pre - acondicionada a pH6 y 20 min de ultrasonido (PC620) e Inu pre - acondicionada térmicamente (I10) con diferentes relaciones másicas [PC620:I10]

De acuerdo con los espectros, las señales asociadas a la región de la amida I de PCH mostraron un desplazamiento desde  $1630\text{ cm}^{-1}$  hasta  $1642\text{ cm}^{-1}$ , mientras que las señales asociadas con la amida II cambiaron presentaron un desplazamiento de  $1539\text{ cm}^{-1}$  a  $1543\text{ cm}^{-1}$ . Estos desplazamientos pueden estar asociados con cambios conformacionales en las estructuras de  $\alpha$ -hélice de las proteínas hacia configuraciones tipo hoja- $\beta$  debido a la presencia de Inu (Mousazadeh et al., 2018). Además, se observó una disminución en la intensidad de los picos de la amida II ( $1500\text{-}1544\text{ cm}^{-1}$ ) y amida III ( $1200\text{-}1400\text{ cm}^{-1}$ ) respecto a las dispersiones de PCH pre - acondicionada a pH 6, lo que sugiere una reducción en la disponibilidad de grupos funcionales libres. Por otra parte, las señales alrededor de  $1635\text{ cm}^{-1}$  que se encontraron en los espectros de Inu (Figura 7.5) no se observaron en las mezclas binarias, dando un indicio a la posible interacción entre los biopolímeros (Mousazadeh et al., 2018; Carpentier et al. 2021). Por otra parte, la proporción en la que se encuentra PCH e Inu en las mezclas sí condujo a efecto sobre los grupos funcionales y señales detectadas en los espectros, sobre todo en las bandas alrededor de  $2900\text{-}2980\text{ cm}^{-1}$  y  $1580\text{-}1610\text{ cm}^{-1}$  y aquellas alrededor de  $1200\text{ cm}^{-1}$ .

#### 7.4.1 Propiedades reológicas de PCH-Inu

Para las mezclas de PC620 - I10, la caracterización reológica se muestra en la Figura 7.8. Todos los tratamientos mantuvieron el comportamiento pseudoplástico de los materiales individuales, aunque a velocidades de corte alrededor de  $1\text{ s}^{-1}$ , se presentó una breve meseta en el comportamiento de flujo, para continuar con un descenso de la viscosidad a mayores tasas de corte. Además, las muestras que contenían mayor proporción de proteína fueron las que mostraron una mayor viscosidad respecto a su contraparte con mayor proporción de Inu. Según Hernández-Rodríguez et al. (2017), este comportamiento es característico de materiales que presentan una viscosidad estructural, similar a la que presentan los materiales compuestos como los coacervados, donde la formación y reordenamiento de estructuras tipo red tienden a mostrar cambios en su resistencia al flujo dependientes de su composición y concentración (Wee et al., 2014).

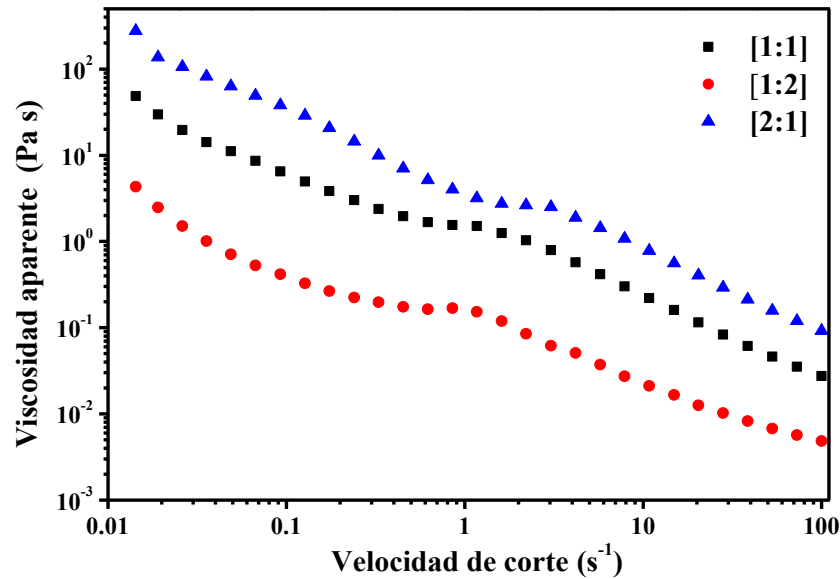


Figura 7.8 Curva de flujo para las mezclas PC620-I10 empleando distintas relaciones másicas [PCH - Inu]

Los parámetros reológicos derivados del ajuste de las curvas de flujo se muestran en la Tabla 7.3.

**Tabla 7.3 Parámetros reológicos del modelo de Ostwald – de Waele para geles de las mezclas binarias PCH - Inu pre - acondicionadas a distintas relaciones másicas.**

	[PC - I]	n(adim)	K (Pa *s)	R <sup>2</sup>
	1:2	0.30	0.1143	0.9828
PC620 - I10	1:1	0.20	1.2603	0.9887
	2:1	0.16	4.8225	0.9940

Respecto a las características viscoelásticas, la Figura 7.9 muestra los perfiles para los módulos de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdida ( $G''$ ). Los tratamientos con mayor contenido de proteína en las mezclas PC620 - I10, que corresponden a  $[2:1] > [1:1]$  mostraron los valores más altos de  $G'$ , con comportamiento predominantemente elástico ( $G' > G''$ ). En el caso de la relación másica donde hay mayor contenido de Inu,  $[1:2]$ , a frecuencias por debajo de 2 rad/s, el gel compuesto se comporta como

un material elástico ( $G' > G''$ ) y por encima de este valor, presentan un cambio de comportamiento a materiales con mayor fluencia ( $G'' > G'$ ). Este comportamiento puede deberse al efecto de estructuración y reacomodo molecular que tienen los biopolímeros cuando son combinados, llevando a mantener o modificar su comportamiento viscoelástico y con ello la dureza, estabilidad y elasticidad de los materiales. Resultados similares se han reportado para mezclas de proteína-polisacárido como aislado de proteína de arroz – goma de linaza (Hasanvand y Rafe, 2019), caseinato de sodio – goma tragacanto (Gorji et al., (2014), aislado de proteína de suero de leche–goma de linaza Liu et al., (2017) y aislado de proteína de canola – goma arábica (Stone et al., 2014).

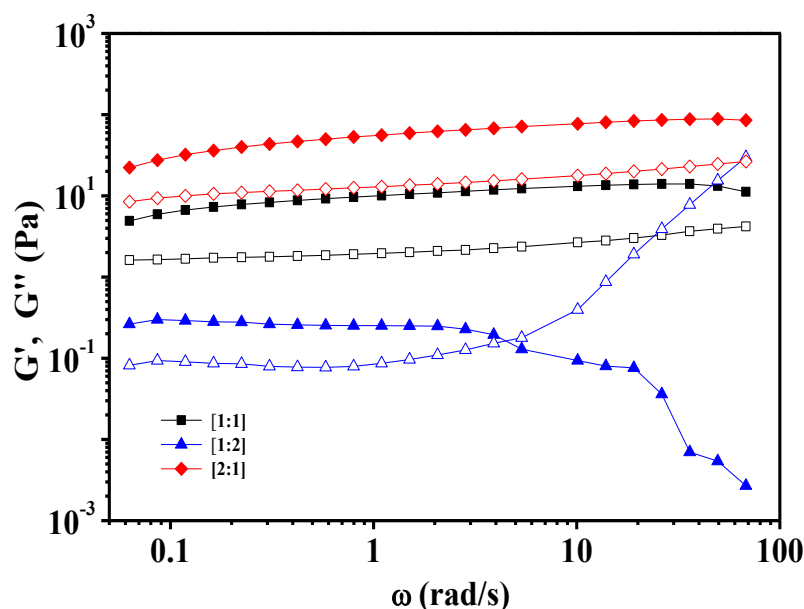


Figura 7.9 Módulos  $G'$  y  $G''$  para las mezclas PC620:I10 a distintas relaciones másicas.

## 7.5 Emulgeles estabilizados con geles de PCH - Inu

De acuerdo con los resultados anteriores, las mezclas de proteína-inulina en las tres relaciones másicas [PC - I] fueron empleadas para formar y estabilizar emulgeles O/W utilizando tres fracciones másicas de fase dispersa ( $\Phi$ ). Los resultados se muestran en la Figura 7.10.

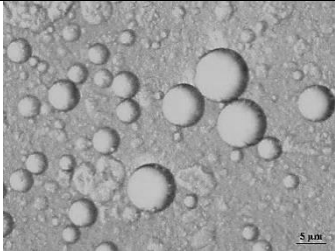
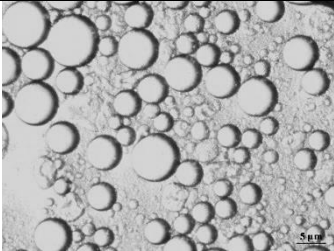
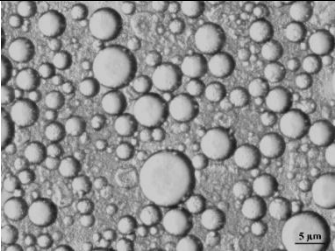
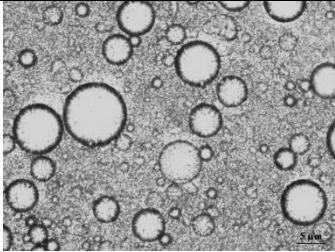
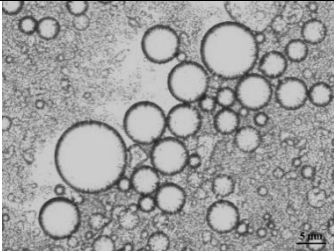
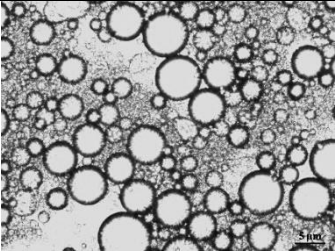
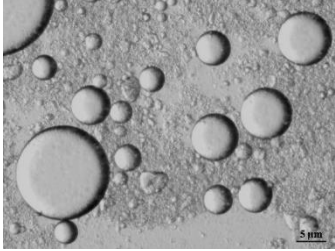
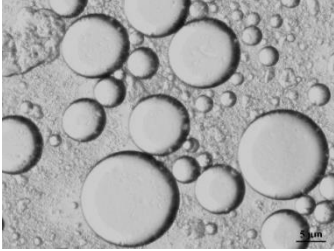
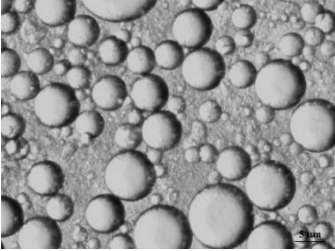
[PC620 - I10]	$\Phi = 0.10$	$\Phi = 0.20$	$\Phi = 0.30$
<b>[2:1]</b>			
<b><math>d_{10}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	$7.20 \pm 1.48^c$	$5.11 \pm 1.27^d$	$4.53 \pm 1.33^d$
<b>EE (%)</b>	$93.72 \pm 0.78^{a,b}$	$93.53 \pm 0.36^{a,b,c}$	$93.30 \pm 0.31^{a,b,c,d}$
<b>[1:1]</b>			
<b><math>d_{10}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	$8.96 \pm 1.54^b$	$7.35 \pm 1.97^c$	$5.44 \pm 1.09^d$
<b>EE (%)</b>	$94.30 \pm 0.06^a$	$93.12 \pm 0.11^{b,c,d}$	$92.20 \pm 0.12^d$
<b>[1:2]</b>			
<b><math>d_{10}</math> (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	$11.06 \pm 2.51^a$	$9.35 \pm 1.54^b$	$7.01 \pm 1.83^c$
<b>EE (%)</b>	$92.40 \pm 0.27^{c,d}$	$90.87 \pm 0.36^e$	$90.52 \pm 0.62^e$

Figura 7.10 Imágenes de los emulgeles estabilizados con las mezclas de PCH-Inu pre - acondicionadas, utilizando distintas relaciones PCH - Inu y tres fracciones de fase dispersa.

Todos los emulgeles presentaron gotas de aceite bien definidas con diámetro de gotas entre 4.53 y 11.03  $\mu\text{m}$  y eficiencias de encapsulación de aceite (EE) superiores al 90%. La distribución de tamaño y diámetro promedio de las gotas ( $d_{10}$ ) resultaron influenciadas tanto por la composición de la mezcla de biopolímeros [PC - I], como por la cantidad de aceite contenido en la fase dispersa. En el caso de los emulgeles estabilizados con la relación de PC - I de [2:1], el diámetro de gota promedio fue menor, seguido de las mezclas con relaciones másicas [1:1] y [1:2]. Este comportamiento puede asociarse con las propiedades superficiales que poseen las proteínas para adsorberse en las interfases aceite-agua y formar películas interfaciales que limitan el movimiento e interacción entre las gotas, siendo los sistemas que poseen mayor contenido de inulina los sistemas que forman gotas de mayor tamaño e incluso con mayor heterogeneidad en la distribución de tamaño. Respecto a la fracción de fase dispersa, cuando  $\Phi = 0.1$  todos los emulgeles, independientemente de la composición de la mezcla de biopolímeros, mostraron tamaños de gota más grandes y con mayor heterogeneidad; conforme la cantidad de aceite incrementó hasta  $\Phi = 0.3$  el valor promedio de  $d_{10}$  se redujo y se mejoró la homogeneidad en el tamaño de gota. Resultados similares han sido reportados por Hadnađev et al. (2012), Liu et al., (2019), y Sun & Gunasekaran (2009) entre otros, quienes atribuyen que la menor polidispersidad y tamaño en glóbulos de una emulsión conforme se incrementa la concentración del biopolímero estabilizante y la concentración de aceite, debido a que se alcanza un equilibrio entre las concentraciones de las fases de aceite y la fase continua.

Por otra parte, la estabilidad a corto plazo de los emulgeles se caracterizó mediante el monitoreo del cambio de diámetro de gota durante el tiempo de almacenamiento. En la Figura 7.11 se muestran los perfiles diámetro de gota respecto al tiempo, donde se observa que los emulgeles estabilizados con la mezcla PC - I con mayor contenido de proteína, [2:1], el crecimiento de las gotas de aceite en los emulgeles fue en menor proporción respecto a las formulaciones donde el contenido de Inu era mayor. De acuerdo con Ruiz-Ramos et al. (2006), este cambio en el tamaño de gota de las emulsiones debido a la coalescencia de las gotas puede describirse mediante una cinética de primer orden, como la que se muestra en la Ecuación 26.

$$\frac{[d_{10}]_{t=0}}{[d_{10}]_{t=t}} = e^{-k_c \cdot t} \quad (26)$$

Donde  $d_{10}$  es el diámetro de gota del emulgel al tiempo inicial y a cada tiempo monitoreado,  $k_c$  es la constante cinética de coalescencia en  $s^{-1}$  y  $t$  el tiempo de almacenamiento. De esta forma, las constantes cinéticas de coalescencia obtenidas para cada emulgel se reportan en la Tabla 7.4.

**Tabla 7.4 Constantes de velocidad de coalescencia para los emulgeles estabilizados con las mezclas PC - I**

[PC - I]	$k_c$ ( $s^{-1}$ )		
	$\Phi = 0.10$	$\Phi = 0.20$	$\Phi = 0.30$
[2:1]	$4.57 \times 10^{-6}$	$6.30 \times 10^{-6}$	$5.96 \times 10^{-6}$
[1:1]	$3.76 \times 10^{-5}$	$3.39 \times 10^{-5}$	$3.50 \times 10^{-5}$
[1:2]	$3.98 \times 10^{-5}$	$4.74 \times 10^{-5}$	$3.39 \times 10^{-5}$

Cabe mencionar que la constante cinética de coalescencia es un indicio de la velocidad con la que las gotas de la emulsión se unen para dar lugar a gotas de mayor tamaño, donde este comportamiento se encuentra influenciado por la concentración de solutos, la viscosidad de la fase continua y la cantidad de fase dispersa.

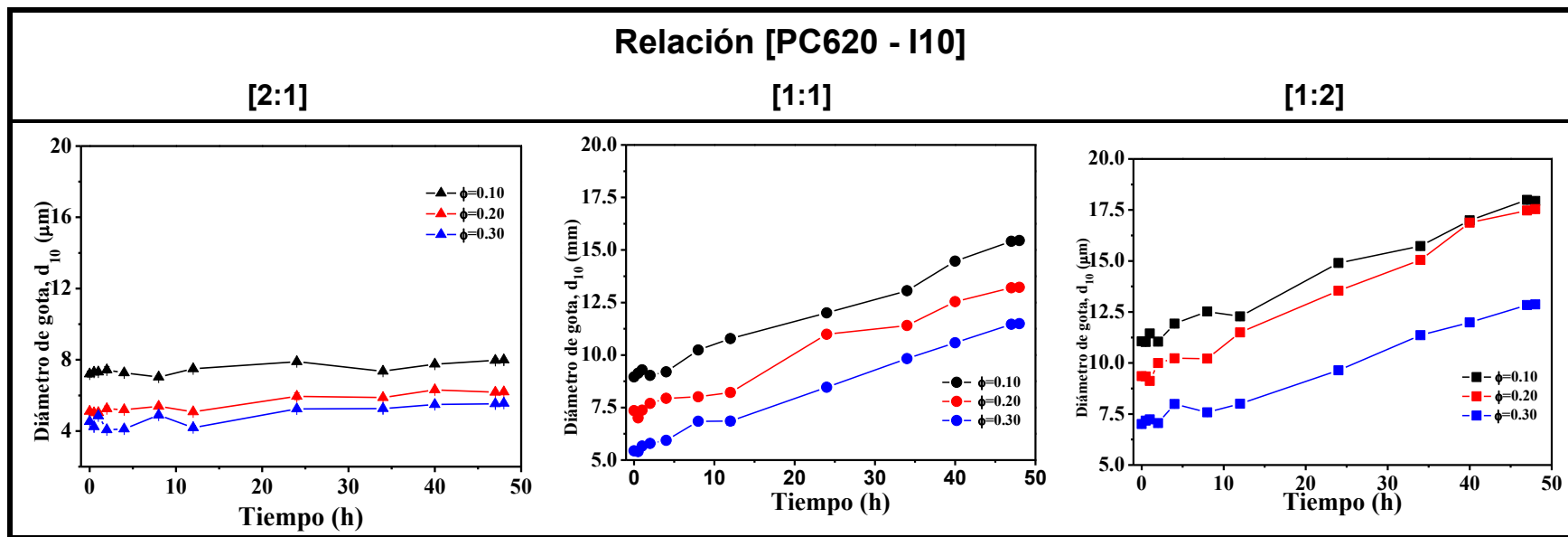


Figura 7.11 Perfil de evolución del diámetro de gota ( $d_{10}$ ) de los emulges durante las primeras 48 h de almacenamiento.

## 7.6 Caracterización de los emulgeles

Los emulgeles fueron caracterizados reológicamente como se muestra en la Figura 7.12. En el caso de las curvas de viscosidad aparente, todos los emulgeles mantuvieron un comportamiento pseudoplástico (Figuras 7.12 a - c) y en el caso de los módulos  $G'$  y  $G''$ , todos los tratamientos mostraron un comportamiento predominantemente elástico, indicando que, a pesar de ser sometido a esfuerzos de cizalla durante la homogeneización con la fase oleosa, las mezclas de biopolímeros sí desarrollaron estructuras con alta viscosidad que les permite el desarrollo de texturas geladas.

Respecto a la relación másica de PC - I, la relación [2:1] mostró mayor viscosidad respecto a las relaciones [1:1] y [1:2], respectivamente. Para los emulgeles estabilizados con PC - I [2:1], los valores del índice de flujo ( $n$ ) oscilaron entre 0.11-0.16 y para el índice de consistencia ( $K$ ) entre 1.59 -3.66 Pa s<sup>n</sup>. En el caso de los emulgeles PC - I [1:1] presentaron valores de  $n$  entre 0.09-0.13 y  $K$  entre 0.66 – 4.98 Pa s<sup>n</sup>. Finalmente, para los emulgeles estabilizados con PC - I [1:2] los valores fueron  $n$  entre 0.13 - 0.19 y  $K$  entre 0.22 - 1.18 Pa s<sup>n</sup>. Donde los valores más grandes de  $K$  corresponden en todos los casos a los emulgeles con una fracción de fase dispersa de  $\Phi = 0.30$  ver (Anexo 1).

De acuerdo con estos resultados, los emulgeles estabilizados con una relación de [2:1] para PC – I presentan interacciones más fuertes entre los biopolímeros que pueden favorecer la formación de estructuras suficientemente resistentes que contribuyen a una mejor estabilidad, similar a la de los geles individuales. En la literatura se han reportados resultados similares en emulgeles O/W basados en coacervados de proteína de suero – alginato – inulina (Ortiz-Deleón et al., 2023).

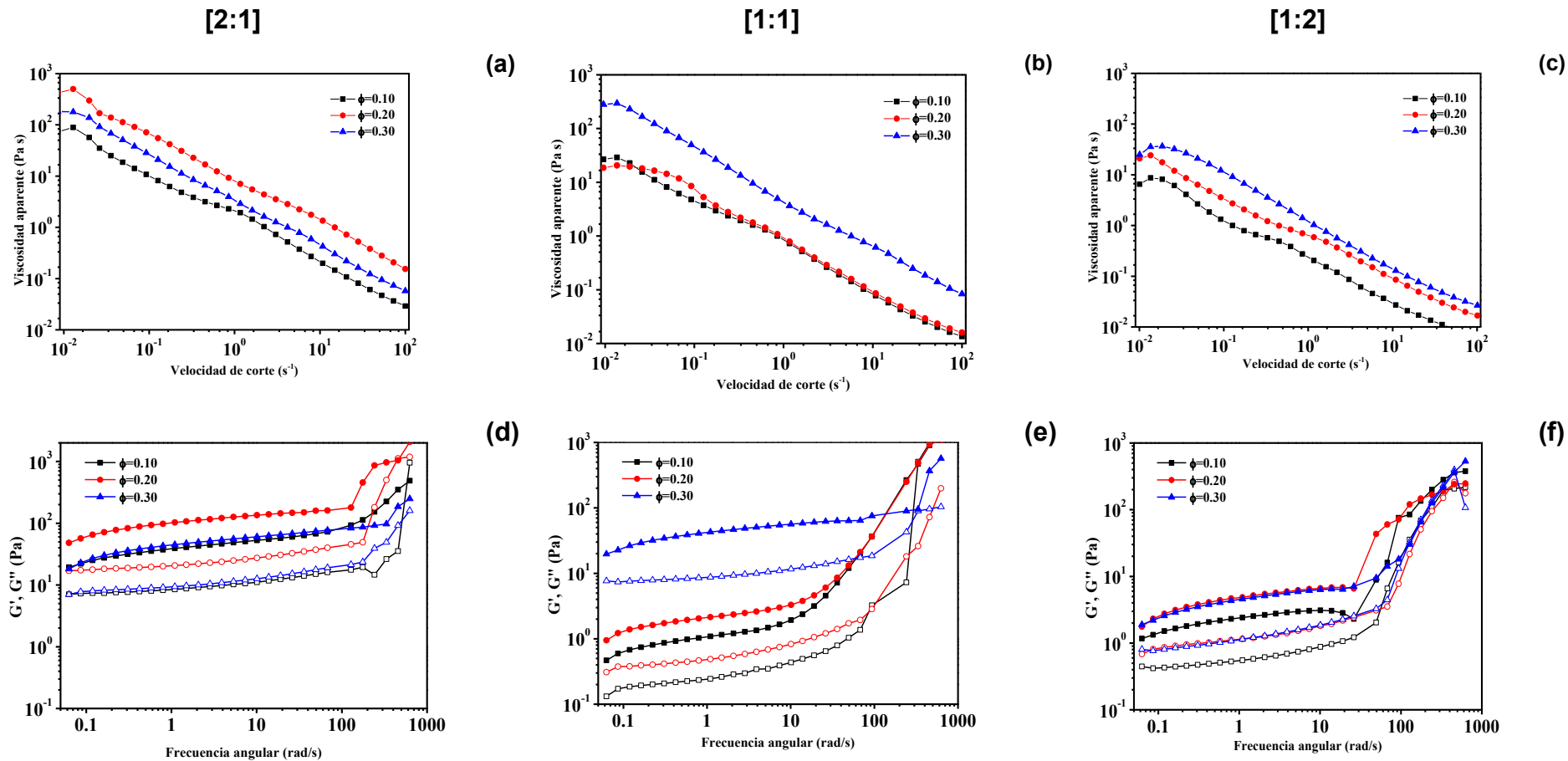


Figura 7.12 Propiedades reológicas (a) curvas de viscosidad aparente y (b) módulos  $G'$  (símbolos llenos) y  $G''$  (símbolos vacíos) para emulsiones estabilizadas con distintas mezclas de PC - I y con tres fracciones de fase dispersa ( $\Phi$ ).

## 7.7 Impacto de la sustitución de grasas saturadas por un emulgel

En las secciones siguientes, se muestran los resultados obtenidos al usar diferentes fracciones del emulgel con  $\Phi = 0.30$  de fase dispersa y estabilizado con una relación de [2:1] para PC – I, como sustituto de mantequilla en la elaboración de las galletas.

### 7.7.1 Reología de las masas para las galletas con diferente % de emulgel

En la figura (7.13), se presenta el comportamiento viscoso de las diferentes masas, el cual está influenciado por la fuerza externa aplicada. Al analizar estos datos, se observa que todas las masas exhiben un comportamiento similar, característico de un fluido pseudoplástico, ya que la viscosidad disminuye al aumentar la cizalla. Sin embargo, a medida que se incrementa la sustitución de mantequilla por emulgel, se evidencia un comportamiento más viscoso, al punto de que, para velocidades de corte cercanas a (0.8 1/s), se supera la viscosidad de la masa control (preparada con ingredientes tradicionales). Adicionalmente, es relevante destacar que las masas exhiben propiedades de fluido viscoelástico, lo que implica que son capaces de almacenar energía durante la deformación, permitiendo que esta energía se utilice para regresar a su estado original una vez que la fuerza externa se reduce (Quintana, 2016).

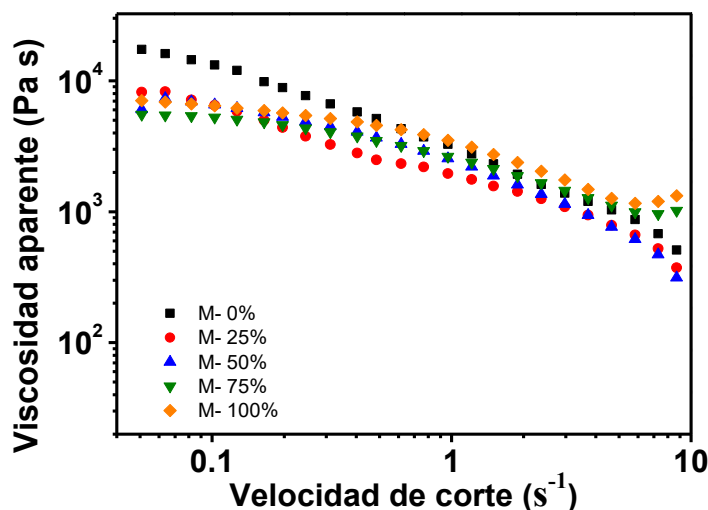


Figura 7.13 Viscosidades de las distintas masas a diferentes composiciones de emulgel.

De acuerdo con el ajuste de los datos al modelo de Ostwald-de-Waele (Ecuación 2), los parámetros del ajuste se reportan en la Tabla 7.5, con valores del índice de flujo ( $n$ ) entre 0.21 y 0.61, y de 2566.50 a 1233.66 Pa s para el índice de consistencia ( $K$ ). Se observa que la consistencia de las muestras tiende a disminuir a medida que aumenta el porcentaje de emulgel. Además, se nota que el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) disminuye con el incremento del emulgel, lo que sugiere una mayor complejidad en la interacción de los componentes del emulgel, sugiriendo que otros factores podrían estar influyendo en la viscosidad, lo que limita la capacidad del modelo para describir adecuadamente el sistema.

**Tabla 7.5 Ajuste de las curvas de viscosidad usando el modelo de Ostwald – de Waele (Ley de potencia).**

<b>Formulación</b>	<b><math>n(adim)</math></b>	<b><math>K (Pa *s)</math></b>	<b><math>R^2</math></b>
<b>M- 0%</b>	0.21	2566.50	0.9842
<b>M- 25 %</b>	0.28	1522.79	0.9659
<b>M- 50 %</b>	0.29	1516.50	0.9268
<b>M- 75 %</b>	0.59	1292.85	0.9204
<b>M- 100 %</b>	0.61	1233.66	0.9260

Las diferentes masas utilizadas en la elaboración de las galletas presentan un comportamiento viscoelástico, lo que se traduce en variaciones en los módulos  $G'$  y  $G''$  en función de la frecuencia angular. El módulo  $G'$ , que representa la elasticidad, refleja la respuesta sólida de la masa, mientras que el módulo  $G''$  indica su comportamiento líquido (Barnes, 2000). En la Figura (7.14), se observa que, en todas las etapas del análisis, se cumple la relación  $G' > G''$ , lo que sugiere que los módulos dinámicos de la masa se encuentran en la meseta de relajación, una característica típica de los fluidos viscoelásticos. En esta región, la predominancia de  $G'$  sobre  $G''$  indica que la respuesta sólida es más significativa que la líquida.

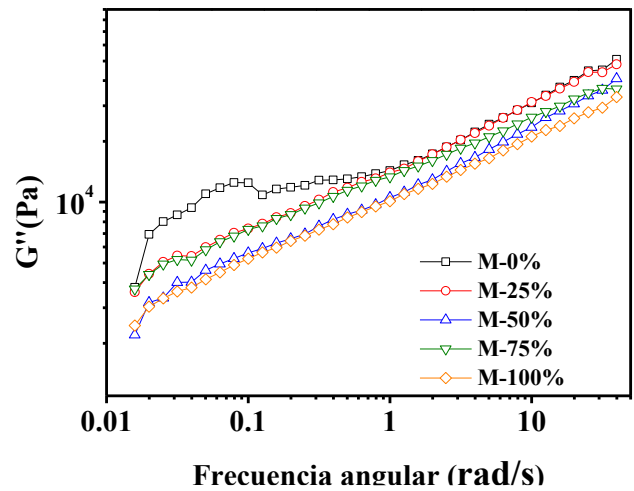
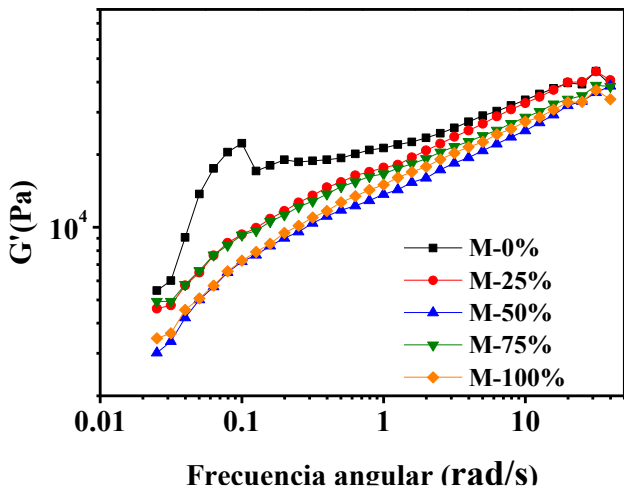


Figura 7.14 Módulos  $G'$  y  $G''$  de la masa de la galleta a diferentes composiciones de emulgel.

La variación en el comportamiento de las diferentes muestras de masa se atribuye al incremento en la porosidad de la estructura a medida que se sustituye la mantequilla por el emulgel. Este cambio provoca que los niveles de  $G'$  sean inferiores en comparación con la masa de control, lo que sugiere un debilitamiento de la masa. Es importante señalar que, durante la fase de esponjado, la agitación desempeña un papel crucial, ya que facilita la remoción de la capa exterior de las partículas de harina una vez que estas han sido hidratadas, exponiendo así una nueva superficie que también será hidratada (Quintana Calderón, 2016). Por lo tanto, al utilizar emulgel, que permite una rápida hidratación de las partículas, la masa resulta ser más viscosa (líquida), lo que también afecta el comportamiento de los módulos y reduciendo así la diferencia entre los módulos elásticos y viscosos.

### 7.7.2 Propiedades texturales de la masa para la galleta

En la Tabla 7.6, se presentan los resultados de la prueba de textura aplicada a masas elaboradas con harina de trigo, a las cuales se les incorporaron diferentes proporciones de emulgel, en comparación con una masa control que utiliza ingredientes tradicionales, como la mantequilla. Los datos indican que la dureza de las masas disminuye conforme aumenta la cantidad de emulgel. Este hallazgo

sugiere que la incorporación de emulgel podría estar modificando la estructura de la red de gluten, resultando en una masa más suave y elástica, como se menciona en el trabajo de Nindjin et al. (2011). Particularmente, la masa que presenta un 100 % de sustitución de mantequilla por emulgel muestra una reducción de la dureza de hasta cuatro veces en comparación con la masa control. Este cambio significativo en la textura puede influir en la calidad final de las galletas, ya que una menor dureza suele estar asociada con productos más agradables al paladar y con mejor aceptación por los consumidores. Además, el aumento en la cohesividad, tal como lo reportan Hager et al. (2013), respalda la idea de que la adición de emulgel contribuye a una mejor integración de los componentes de la masa, lo cual puede ser beneficioso para la producción de galletas con texturas deseables.

Por otro lado, se observa que la cohesividad y la elasticidad de las masas aumentan con la adición de emulgel, lo que contrasta con la tendencia de la dureza. Esto indica que, aunque la masa se vuelve más blanda, su capacidad para retener la forma y la integridad estructural mejora. En cuanto a la adhesividad, este parámetro disminuye con el incremento del porcentaje de emulgel, lo que sugiere que la interacción entre el emulgel y la harina de trigo puede estar afectando la absorción de agua, resultando en una masa menos pegajosa.

**Tabla 7.6 Dureza, adhesividad, resiliencia, cohesividad, elasticidad, índice de elasticidad, gomosidad, masticabilidad para cada muestra de masa para las galletas.**

Composiciones	Dureza (N)	Adhesividad (mJ)	Resiliencia	Cohesividad	Elasticidad (mm)	Gomosidad (N)	Masticabilidad (mJ)
M- 0%	34.18 ± 5.46 <sup>b</sup>	1.17 ± 0.31 <sup>b</sup>	0.11 ± 0.04 <sup>a</sup>	0.22 ± 0.12 <sup>a,b</sup>	8.84 ± 0.17 <sup>b</sup>	10.70 ± 2.36 <sup>b</sup>	94.42 ± 18.98 <sup>b</sup>
M- 25%	32.11 ± 9.94 <sup>b</sup>	1.11 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.08 ± 0.05 <sup>a</sup>	0.24 ± 0.10 <sup>a</sup>	8.84 ± 0.01 <sup>b</sup>	7.24 ± 1.08 <sup>a,b</sup>	64.75 ± 9.54 <sup>a,b</sup>
M- 50%	16.89 ± 2.69 <sup>a,b</sup>	0.25 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.06 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.27 ± 0.08 <sup>a</sup>	8.89 ± 0.09 <sup>b</sup>	4.44 ± 0.74 <sup>a</sup>	39.51 ± 7.08 <sup>a</sup>
M- 75%	18.38 ± 0.79 <sup>a,b</sup>	0.15 ± 0.07 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.61 ± 0.02 <sup>b,c</sup>	8.96 ± 0.01 <sup>b</sup>	11.23 ± 0.11 <sup>b</sup>	100.65 ± 0.91 <sup>b</sup>
M- 100%	7.63 ± 0.40 <sup>a</sup>	0.00 ± 0.00 <sup>a</sup>	0.17 ± 0.02 <sup>a</sup>	0.73 ± 0.01 <sup>c</sup>	9.89 ± 0.07 <sup>a</sup>	5.57 ± 0.23 <sup>a</sup>	32.85 ± 0.91 <sup>a</sup>

*Diferentes letras en la misma columna significan diferencias significativas entre los valores a ( $p < 0.05$ ).*

### 7.7.3 Características de la galleta

Tras el horneado de las galletas, se llevó a cabo una evaluación detallada del color, cuyos resultados se muestran en la Tabla 7.7. En esta tabla se presentan los parámetros de color correspondientes a diferentes formulaciones de galletas elaboradas con emulgel de  $\Phi = 0.30$  de fase dispersa y estabilizado con una relación de [2:1] para PC – I. Se observó un incremento significativo en el valor de luminosidad ( $L^*$ ) a medida que aumentaba la concentración de emulgel. Para las galletas tradicionales (G - 0%), se registró un valor de  $5.91 \pm 2.78$ , mientras que para las galletas compuestas en su totalidad por emulgel (G - 100%), el valor que se alcanzó fue de  $11.72 \pm 3.40$ . Esta variación en la luminosidad puede atribuirse al aumento en la proporción de emulgel, el cual no presenta birrefringencia, lo que provoca una reducción en la reflectancia. Este comportamiento es consistente con los hallazgos de Barragán-Martínez et al. (2022), quienes señalaron un efecto similar en geles híbridos que combinan cera de candelilla, aceite de canola, almidón de maíz y agua.

El parámetro  $a^*$  proporciona información sobre la tonalidad de la muestra, indicando una transición desde valores negativos (zona verdosa) hasta valores positivos (zona rojiza). En el caso de las galletas estudiadas, se observó una tendencia hacia tonalidades rojizas. Para la galleta control (G - 0%), se obtuvo un valor de  $a^*$  de  $38.88 \pm 3.42$ , el cual disminuyó a  $35.92 \pm 4.35$  en la galleta completamente elaborada con emulgel (G - 100%). Esta disminución puede ser atribuida al color café-amarronado del emulgel, que tiende a enmascarar el tono rojizo original.

En cuanto al parámetro  $b^*$ , se evidenció una tendencia inversa en comparación con  $a^*$ . La galleta con sustitución total de mantequilla (G - 100%) mostró un valor de  $b^*$  de  $16.77 \pm 2.01$ , indicando una tonalidad más amarillenta. Por el contrario, la galleta elaborada de manera tradicional (G - 0%) presentó un valor de  $b^*$  de  $11.18 \pm 0.97$ , lo que refleja una menor tonalidad amarillenta y una tendencia más hacia el color café. Este fenómeno es consistente con los resultados de Álvarez-Ramírez et al. (2018), quienes encontraron que la combinación de lípidos y almidones en productos alimenticios genera tonalidades amarillentas, probablemente debido a las

reacciones de Maillard que intensifican el color en alimentos con un alto contenido de grasas. Además, la caracterización reveló que el parámetro C\* aumentó en intensidad de color conforme aumentó el porcentaje de emulgel. Por otro lado, el parámetro h\* mostró un leve cambio en el tono de la galleta; se observó que, a mayor claridad de la galleta, mayores eran los valores de este parámetro. En conclusión, se puede afirmar que el incremento en la sustitución de emulgel por mantequilla tiene un impacto significativo en la tonalidad de las galletas. Aunque a bajos porcentajes de sustitución estos cambios pueden ser sutiles y difíciles de detectar visualmente, la sustitución completa de la grasa resulta en un cambio perceptible en la tonalidad del producto final.

**Tabla 7.7 Parámetros de color obtenidos a diferentes formulaciones de emulgel en las galletas.**

Formulación	L*	a*	b*	C*	h*	PI	$\Delta E$
G- 0%	5.91 $\pm$ 2.78 <sup>a</sup>	38.88 $\pm$ 3.42 <sup>a</sup>	11.18 $\pm$ 0.97 <sup>a</sup>	40.47 $\pm$ 3.52 <sup>a</sup>	16.04 $\pm$ 0.39 <sup>a</sup>	802.28 $\pm$ 410.19 <sup>a</sup>	0,00 $\pm$ 0.00
G- 25 %	7.98 $\pm$ 2.74 <sup>a,b,c</sup>	37.48 $\pm$ 2.67 <sup>a</sup>	12.03 $\pm$ 1.73 <sup>a,b</sup>	43.22 $\pm$ 2.68 <sup>a</sup>	16.18 $\pm$ 2.33 <sup>a</sup>	466.33 $\pm$ 150.33 <sup>a,b</sup>	4.89 $\pm$ 1.28 <sup>b</sup>
G- 50 %	6.46 $\pm$ 3.19 <sup>a,b</sup>	36.39 $\pm$ 3.44 <sup>a</sup>	14.95 $\pm$ 2.55 <sup>a</sup>	46.70 $\pm$ 6.79 <sup>a</sup>	17.59 $\pm$ 1.46 <sup>a</sup>	473.39 $\pm$ 253.12 <sup>a,b</sup>	4.49 $\pm$ 3.05 <sup>a,b</sup>
G- 75 %	13.53 $\pm$ 2.77 <sup>c</sup>	36.23 $\pm$ 4.28 <sup>a</sup>	15.62 $\pm$ 1.16 <sup>b,c</sup>	49.51 $\pm$ 3.57 <sup>a</sup>	23.5 $\pm$ 3.83 <sup>b</sup>	355.06 $\pm$ 69.15 <sup>b</sup>	10.92 $\pm$ 3.76 <sup>a,b</sup>
G- 100 %	11.72 $\pm$ 3.40 <sup>b,c</sup>	35.92 $\pm$ 4.35 <sup>a</sup>	16.77 $\pm$ 2.01 <sup>c</sup>	53.41 $\pm$ 3.30 <sup>a</sup>	23.16 $\pm$ 4.72 <sup>b</sup>	802.28 $\pm$ 410.19 <sup>a,b</sup>	9.65 $\pm$ 3.16 <sup>a</sup>

*Estos datos representan la media  $\pm$  desviación estándar para (n = 5). Las medias seguidas de letras fueron diferentes a valores de (p<0.05).*

Los resultados obtenidos al medir el peso, diámetro y espesor de las galletas en función de la sustitución de la mantequilla se observan en la tabla 7.8. Estos resultados ofrecen una información valiosa sobre cómo estas variables afectan las propiedades físicas del producto final. El peso de las galletas horneadas aumenta a medida que se incrementa el porcentaje de sustitución de la mantequilla por el emulgel. Este fenómeno puede explicarse por la capacidad del emulgel para retener agua y otros ingredientes en la masa, lo que contribuye a un mayor contenido de humedad y, por ende, a un aumento en el peso final de las galletas. La incorporación de emulgeles puede mejorar la retención de humedad, lo que es crucial para la textura y frescura del producto.

En cuanto al diámetro, se observa que no hay cambios significativos en las primeras etapas de sustitución (0% a 75%). Sin embargo, al llegar a una sustitución del 100%, se nota una ligera disminución en el diámetro. Este comportamiento puede atribuirse a la estructura del emulgel, que, al ser más ligero y menos denso que la mantequilla, puede no proporcionar la misma estabilidad estructural durante el horneado. La mantequilla, al ser un componente graso, contribuye a la expansión y a la formación de una red estructural que puede verse comprometida al sustituirla completamente por un emulgel lo cual no puede ofrecer el mismo efecto expansivo resultando en una reducción del diámetro.

El espesor de las galletas muestra un incremento significativo con el aumento del porcentaje de emulgel en la formulación, variando de ( $0.83 \pm 0.07$  cm) en galletas sin emulgel (G – 0%) a ( $1.17 \pm 0.08$  cm) en aquellas con una sustitución total de la grasa por emulgel (G – 100%). La habilidad del emulgel para formar estructuras densas y gelatinosas sugiere una posible interacción sinérgica con el almidón presente en la harina de trigo, lo que facilita la expansión vertical de la masa durante el proceso de horneado. Esta expansión se traduce en un mayor espesor, evidenciando que el emulgel no solo actúa como un sustituto de grasa, sino que también modifica la estructura textural de las galletas.

**Tabla 7.8 Parámetros de las galletas elaboradas a diferentes por cientos de emulgel.**

<i>Formulación</i>	<i>Masa (g)</i>	<i>Diámetro (cm)</i>	<i>Espesor (cm)</i>
G- 0%	$3.41 \pm 0.32^a$	$4.66 \pm 0.13^c$	$0.83 \pm 0.07^a$
G- 25 %	$3.11 \pm 0.14^{a,b}$	$4.68 \pm 0.14^c$	$0.86 \pm 0.05^{a,b}$
G- 50 %	$3.48 \pm 0.25^{a,b}$	$4.65 \pm 0.17^c$	$0.95 \pm 0.05^b$
G- 75 %	$3.84 \pm 0.30^a$	$4.68 \pm 0.15^b$	$1.00 \pm 0.07^b$
G- 100 %	$4.90 \pm 0.56^b$	$4.28 \pm 0.13^a$	$1.17 \pm 0.08^c$

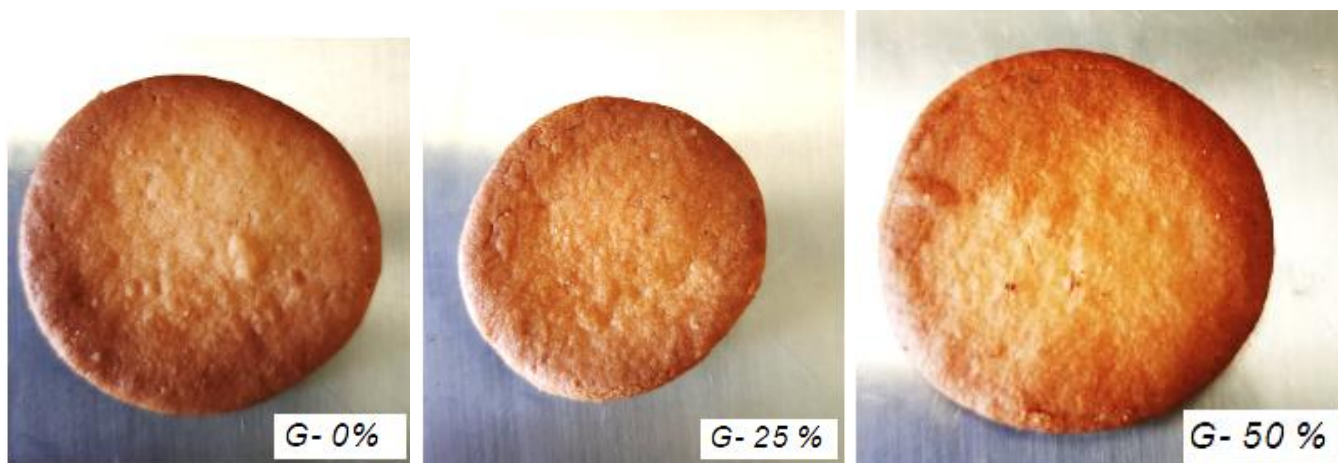
*Estos datos representan la media  $\pm$  desviación estándar para (n = 5). Las medias seguidas de letras fueron diferentes a valores de (p<0.05).*

En la figura 7.15 se ilustran los cambios morfológicos observados en las galletas en función del porcentaje de emulgel utilizado como sustituto de la mantequilla y en la tabla 7.9 se representa cuanto peso pierden las galletas luego de ser horneadas. Cabe señalar que todas las formulaciones presentaron predominantemente una morfología ovoide/circular, evidenciando además la presencia de pequeños poros en su superficie. El color característico de las galletas fue el amarillo; sin embargo, se observaron matices rojizos en aquellas elaboradas con un contenido de emulgel que oscilaba entre el 0% y el 75%.

**Tabla 7.9 Pérdida de peso de las galletas luego del horneado.**

<b>Formulación</b>	<b>PPH (%)</b>
<b>M- 0%</b>	22.77 ± 1.64 <sup>a</sup>
<b>M- 25 %</b>	26.21 ± 5.65 <sup>c</sup>
<b>M- 50 %</b>	22.35 ± 1.27 <sup>a</sup>
<b>M- 75 %</b>	22.37 ± 4.72 <sup>a</sup>
<b>M- 100 %</b>	13.04 ± 10.76 <sup>a,b</sup>

Estos datos representan la media ± desviación estándar para (n = 10). Las medias seguidas de letras fueron diferentes a valores de (p<0.05).



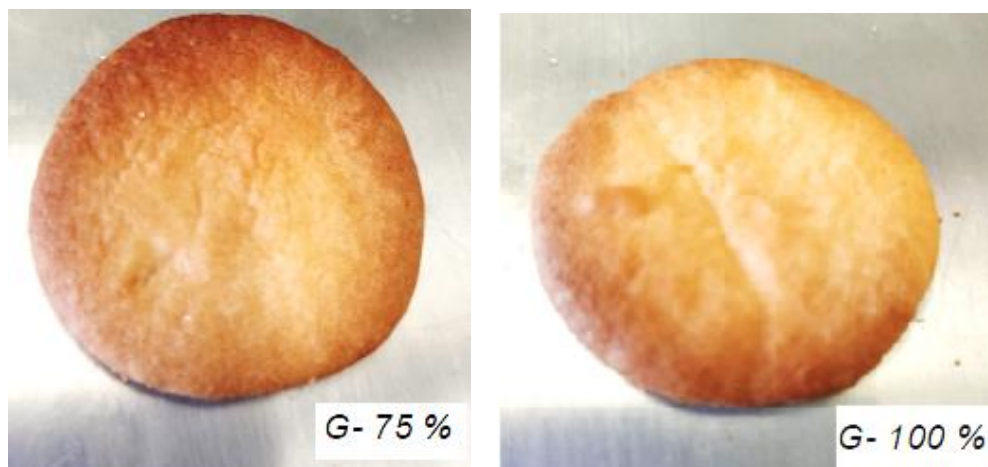


Figura 7.15 Galletas a diferente composición de emulgel

#### 7.7.4 Propiedades texturales de las galletas

En la tabla (7.10), se presentan los resultados de la prueba de ruptura realizada en galletas elaboradas con diferentes composiciones de emulgel. Al analizar la fracturabilidad, que se define como la distancia recorrida por la sonda antes de que ocurra la deformación o ruptura de la galleta (Rodríguez Carbajo, 2015), se observan valores generalmente similares en todas las muestras, destacando especialmente la galleta con un 25% de emulgel, que muestra el mayor valor de  $6.83 \pm 0.02$  (N).

Es fundamental controlar la dureza de las galletas, ya que, según Sze et al. (2022), los productos más suaves tienden a ser consumidos más rápidamente por los consumidores. De manera similar, Zoulias et al. (2002) encontraron que la sustitución de grasas por carbohidratos también tiende a generar productos más duros. En nuestro estudio, se observa un comportamiento análogo, ya que el incremento del emulgel, estabilizado por un complejo que incluye proteína de chícharo e inulina de achicoria, resulta en un aumento en la dureza de las galletas.

**Tabla 7.10 Parámetros Textura de las galletas a diferentes formulaciones de emulgel.**

Composiciones	Dureza (N)	% Deformación según dureza	Fracturabilidad (N)	Deformación por fractura (mm)
G- 0%	$4.92 \pm 0.03^e$	$10.45 \pm 0.07^d$	$4.90 \pm 0.00^c$	$0.58 \pm 0.02^b$

G- 25%	6.78 ± 0.04 <sup>d</sup>	10.30 ± 0.00 <sup>d</sup>	6.83 ± 0.02 <sup>b</sup>	0.53 ± 0.02 <sup>b</sup>
G- 50%	17.29 ± 0.34 <sup>b</sup>	50.60 ± 0.14 <sup>a</sup>	5.10 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.46 ± 0.02 <sup>b,c</sup>
G- 75%	25.99 ± 0.32 <sup>a</sup>	71.17 ± 0.17 <sup>c</sup>	4.73 ± 0.08 <sup>a</sup>	0.38 ± 0.00 <sup>c</sup>
G- 100%	37.75 ± 0.14 <sup>c</sup>	57.72 ± 0.74 <sup>b</sup>	3.25 ± 0.27 <sup>d</sup>	0.83 ± 0.02 <sup>a</sup>

Estos datos representan la media ± desviación estándar para (n = 4). Las medias seguidas de letras fueron diferentes a valores de (p<0.05).

### 7.7.5 Isotherma de sorción de las galletas

Las isothermas de sorción ( $w_e$  contra  $a_w$ ) en las galletas elaboradas con diferente contenido de emulgel se construyeron a diferentes temperaturas (5,20,30 y 45 °C), utilizando una de las técnicas más empleadas (el método gravimétrico), el cual se basa en la determinación del contenido de humedad en la muestra después de que esta ha alcanzado el equilibrio con un aire de humedad relativa conocida. Esta técnica se desarrolló usando un método estático ya que son los más sencillos de aplicar (Talens Oliag, 2017). Es importante destacar que se determina la humedad inicial ( $X_{wi}$ ) de las galletas elaboradas con diferente contenido de emulgel introducida en los desecadores herméticos, y se controla el peso inicial y peso final hasta que las galletas se quedan en equilibrio con la humedad relativa generada por cada una de las sales. Como se comentó en la sección 6.21, para establecer las isothermas del producto bastará con aplicar la Ecuación (8) a los datos experimentales y representar los valores obtenidos. La tabla 7.11 muestra los valores obtenidos para las distintas galletas almacenadas a las correspondientes humedades relativas en el equilibrio a una temperatura de 20 °C el resto de los datos a las temperaturas (5,30 y 45 °C) se muestran en el (Anexo 2).

**Tabla 7.11 Valores de peso inicial, peso final, humedad inicial en base humedad y humedad de equilibrio en base seca para las distintas galletas almacenadas a distintas  $a_w$  a 20 °C.**

G – 0% T= 20 °C					
Sal	$a_w$	$m_0$ (g)	$m_f$ (g)	$X_{wi}$ (g H2O/g galleta)	$w_e$ (g H2O/g SS)
LiCl	0.114	3.7	3.76	0.015	0.031
Na2SO4	0.243	3.3	3.38	0.015	0.039

CH3COOK	0.423	3.53	3.68	0.015	0.058
Mg (NO3)2	0.479	3	3.18	0.015	0.076
CuCl	0.652	3.11	3.41	0.015	0.113
K2CO3	0.658	3.53	3.9	0.015	0.121
NaCl	0.689	3.29	3.67	0.015	0.132
KCl	0.731	3.97	4.48	0.015	0.145

**G - 25% T= 20 °C**

Sal	$a_w$	$m_o$ (g)	$m_f$ (g)	$Xw_i$ (g H2O/g galleta)	$W_e$ (g H2O/g SS)
LiCl	0.113	2.93	2.98	0.014	0.031
Na2SO4	0.254	3.06	3.18	0.014	0.054
CH3COOK	0.448	3.09	3.28	0.014	0.076
Mg (NO3)2	0.481	3.17	3.42	0.014	0.094
CuCl	0.672	3.12	3.55	0.014	0.154
K2CO3	0.642	3.08	3.45	0.014	0.136
NaCl	0.686	3.01	3.46	0.014	0.166
KCl	0.759	3.15	3.77	0.014	0.214

**G - 50% T= 20 °C**

Sal	$a_w$	$m_o$ (g)	$m_f$ (g)	$Xw_i$ (g H2O/g galleta)	$W_e$ (g H2O/g SS)
LiCl	0.125	3.79	3.98	0.009	0.059
Na2SO4	0.257	3.63	3.85	0.009	0.070
CH3COOK	0.455	3.3	3.68	0.009	0.125
Mg (NO3)2	0.498	3.57	4.12	0.009	0.164
CuCl	0.658	3.54	4.25	0.009	0.211
K2CO3	0.678	3.84	4.67	0.009	0.227
NaCl	0.694	3.1	3.88	0.009	0.263

KCl	0.762	3.35	4.68	0.009	0.409
<b>G - 75% T= 20 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>0</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.113	4.53	4.57	0.006	0.014
Na2SO4	0.265	3.73	3.92	0.006	0.057
CH3COOK	0.445	3.52	3.75	0.006	0.071
Mg (NO3)2	0.485	3.95	4.25	0.006	0.082
CuCl	0.685	3.73	4.18	0.006	0.127
K2CO3	0.682	3.95	4.52	0.006	0.151
NaCl	0.678	4.27	4.79	0.006	0.128
KCl	0.766	4.33	5.18	0.006	0.203
<b>G - 100% T= 20 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>0</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.112	4.53	4.54	0.028	0.031
Na2SO4	0.265	5.16	5.26	0.028	0.048
CH3COOK	0.446	4.48	4.76	0.028	0.093
Mg (NO3)2	0.486	4.77	5.14	0.028	0.108
CuCl	0.686	4.56	5.35	0.028	0.207
K2CO3	0.651	4.88	5.64	0.028	0.189
NaCl	0.685	4.77	5.55	0.028	0.197
KCl	0.764	4.33	5.18	0.028	0.230

Las isothermas de adsorción de agua de las galletas elaboradas con emulgel de  $\Phi = 0.30$  de fase dispersa y estabilizado con una relación de [2:1] para PC – I a (5, 20, 30 y 45 °C) se representan en la figura 7.16. Las isothermas de adsorción exhibieron una forma J-cóncava ascendente tipo III según la clasificación BET, que es característica de las matrices alimentarias ricas en componentes solubles.

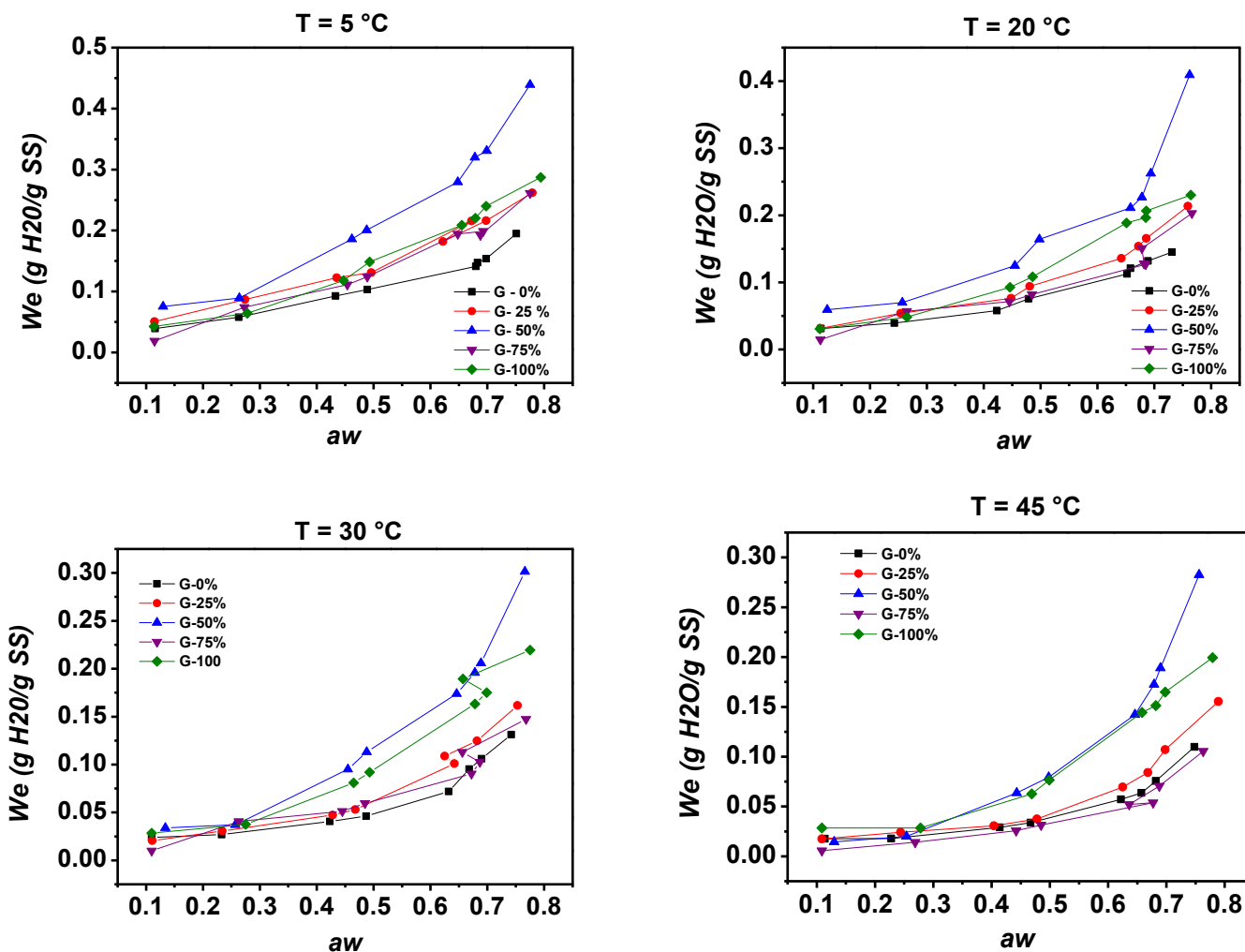
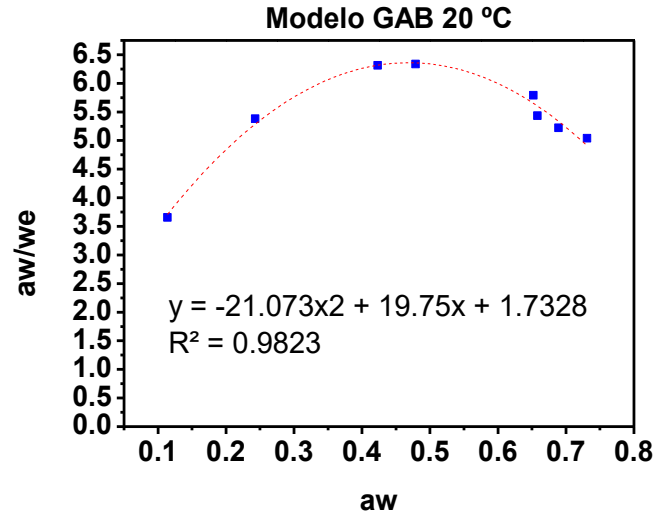
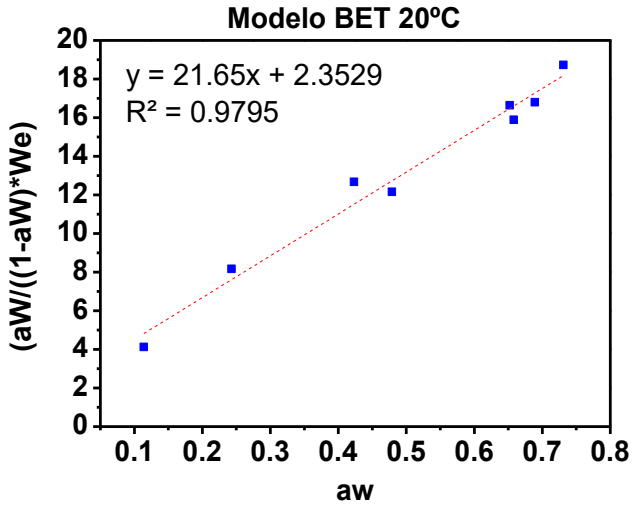


Figura 7.16 Isotermas de sorción de las distintas galletas almacenadas a diferente temperatura.

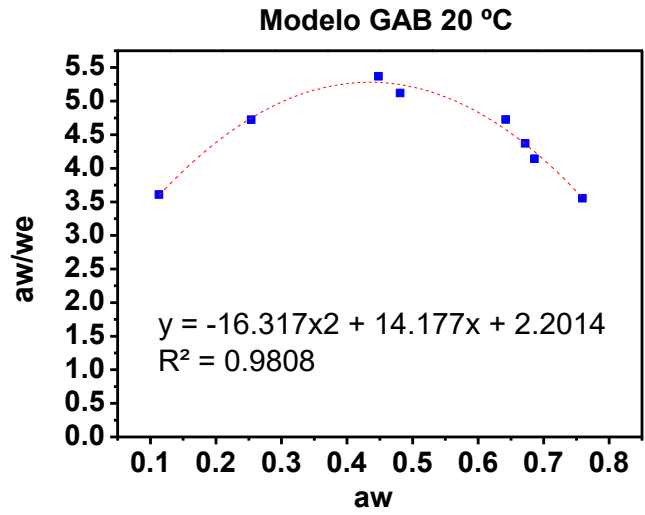
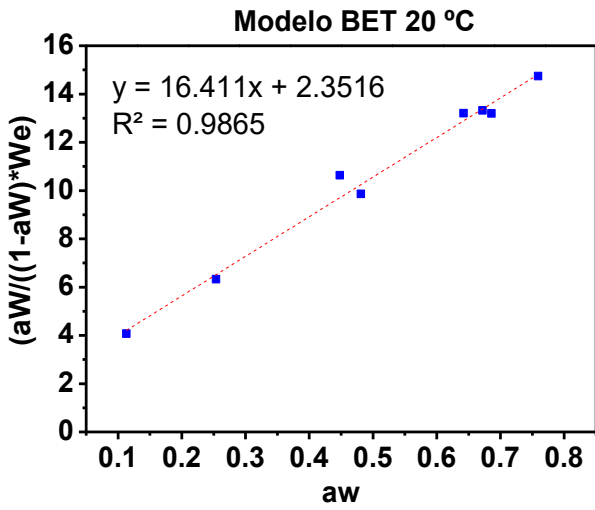
### 7.7.6 Ajuste de los modelos BET y GAB a las isotermas de sorción de las galletas

A partir de la figura 7.16 y aplicando las ecuaciones linealizadas del modelo de BET y del modelo de GAB (ecuación 10), se pueden obtener los parámetros de ambos modelos. La figura 7.20 muestran el ajuste lineal y polinómico para los modelos de BET y de GAB, respectivamente. Cabe señalar que se representan los ajustes obtenidos para las diferentes galletas a la temperatura de 20 °C, el resto de los ajustes se pueden ver en el (Anexo 3).

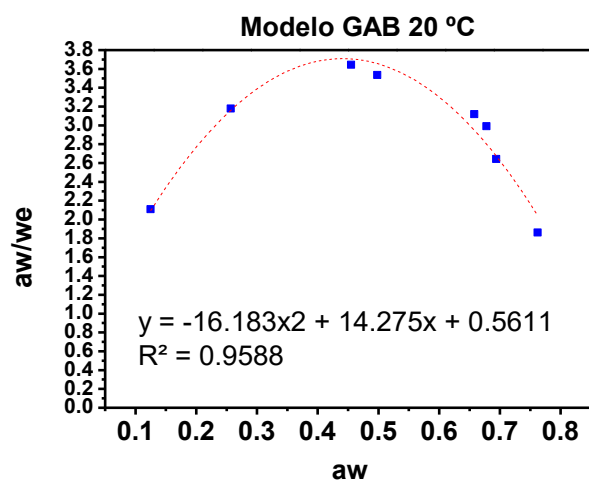
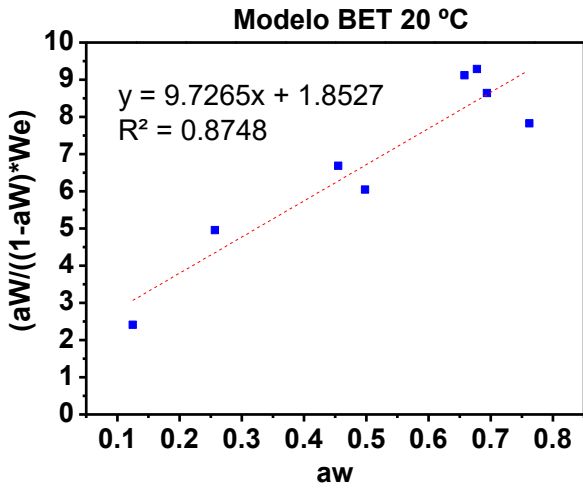
**G - 0%**



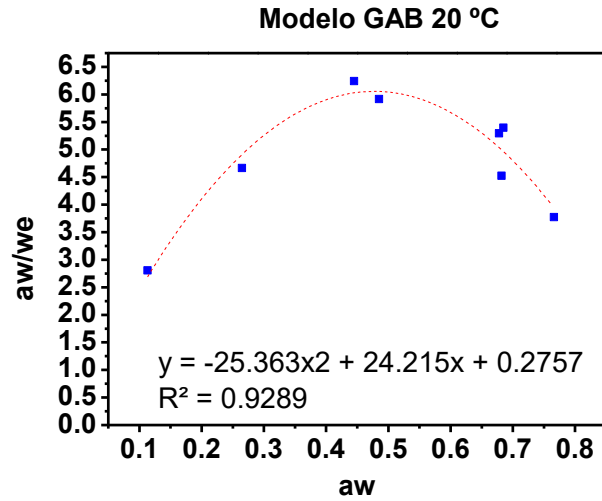
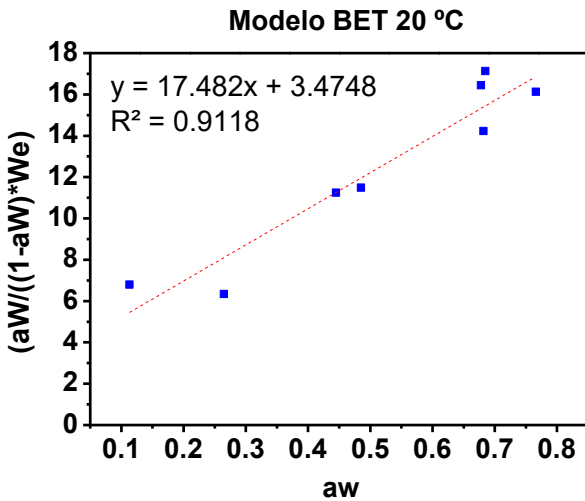
**G - 25%**



**G - 50%**



**G - 75%**



**G - 100%**

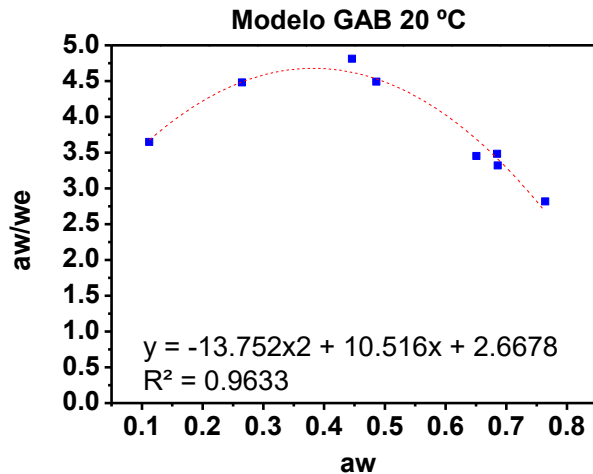
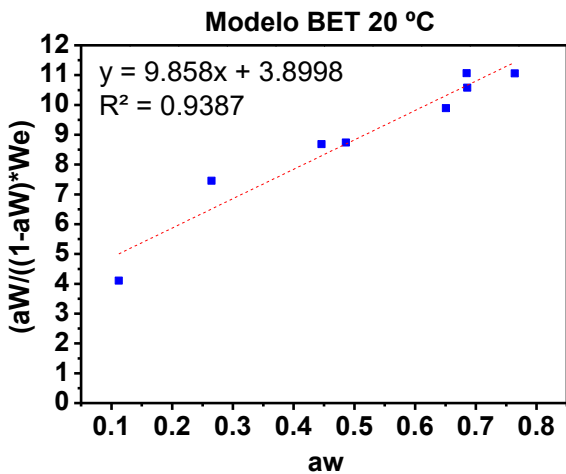


Figura 7.17 Ajuste lineal y polinómico de los datos experimentales modelo de BET y GAB.

A partir de dichos ajustes se obtienen los parámetros de BET (tabla 7.12) y los parámetros de GAB para cada galleta tabla (7.13). El modelo de GAB se ajustó satisfactoriamente a los datos experimentales, el módulo de desviación relativo promedio fue menor del 5% a 5, 20, 30 y 45 °C. Es de interés particular el valor de la monocapa ( $W_0$ ) que indica qué cantidad de agua está fuertemente adsorbida en sitios específicos, y es considerada como el valor óptimo para que un alimento sea más estable. La constante C para el modelo de GAB disminuye con el aumento de la temperatura, pero disminuye al aumentar el grado de sustitución de mantequilla por emulgel a excepción de la G – 75 % a (5 y 45 °C). Para el modelo de BET dicha constante disminuyó a medida que aumentaba la temperatura y aumentaba la sustitución de emulgel por mantequilla. Se considera que, cuanto mayor sea el valor

de C, la interacción entre el adsorbato y el adsorbente se incrementa, lo que generalmente sucede al disminuir la temperatura, por ser un proceso exotérmico. Iglesias & Chirife (1982) al estudiar varios alimentos y obtener que 74% de los mismos no se incrementaba el valor de la constante C al disminuir la temperatura. Estos autores mencionan que cuando sucede este fenómeno puede deberse a cambios irreversibles que ocurren con el aumento de la temperatura, tales como oscurecimiento por reacciones enzimáticas y desnaturalización de proteínas.

El valor de K supone que las moléculas de agua en las multicapas tienen interacción con el adsorbente en el intervalo de energía de las moléculas de monocapa y las del agua líquida. Cuando ( $K = 1$ ), las multicapas del adsorbente tienen propiedades del agua en estado líquido. Un valor bajo de K indica un estado estructurado mucho menor que el del adsorbato en las capas contiguas a la monocapa, también llamadas capas de GAB (Timmermann et al., 2001). Los valores de K para el modelo GAB se encontraron entre (0.87 - 0.99).

**Tabla 7.12 Valores de los parámetros del modelo BET a diferentes temperaturas y para las distintas galletas.**

Muestra	Parámetros	5 °C	20 °C	30 °C	45 °C
G-0%	C	45.26	10.20	6.21	4.82
	W <sub>0</sub>	0.048	0.041	0.032	0.025
G-25%	C	39.09	7.97	4.08	3.70
	W <sub>0</sub>	0.065	0.053	0.042	0.031
G-50%	C	8.52	6.25	2.97	2.96
	W <sub>0</sub>	0.10	0.086	0.074	0.060
G-75%	C	6.78	6.03	3.53	2.03
	W <sub>0</sub>	0.066	0.047	0.038	0.024
G-100%	C	9.08	3.52	1.98	2.34
	W <sub>0</sub>	0.074	0.072	0.069	0.057

**Tabla 7.13 Valores de los parámetros del modelo GAB a diferentes temperaturas y para las distintas galletas.**

Muestra	Parámetros	5 °C	20 °C	30 °C	45 °C
G-0%	C	8.10	4.50	2.05	1.30
	W <sub>0</sub>	0.060	0.057	0.040	0.034
	K	0.94	0.89	0.99	0.98
G-25%	C	8.10	5.90	3.32	1.30
	W <sub>0</sub>	0.090	0.059	0.048	0.039
	K	0.88	0.97	0.97	0.99
G-50%	C	9.80	4.60	3.42	1.10

<b>G-75%</b>	<i>Wo</i>	0.110	0.098	0.078	0.083
	<i>K</i>	0.98	0.99	0.97	0.99
	<i>C</i>	7.10	5.60	3.98	0.80
<b>G-100%</b>	<i>Wo</i>	0.078	0.051	0.038	0.039
	<i>K</i>	0.92	0.99	0.99	0.94
	<i>C</i>	9.97	8.30	5.88	2.80
	<i>Wo</i>	0.074	0.065	0.070	0.077
	<i>K</i>	0.98	0.96	0.91	0.87

Luego de tener los valores de los parámetros (*C*, *K* y *Wo*), correspondiente al modelo GAB y usando las ecuaciones (12 y 13) se puede determinar los valores de los calores de adsorción de agua de la monocapa ( $H_m$ ) y multicapa ( $H_n$ ) ( $\text{kJ mol}^{-1}$ ), tabla 7.14. Cabe señalar que a medida que aumenta la temperatura tanto ( $H_m$ ) como ( $H_n$ ) disminuye, esto se puede atribuir a un aumento de la energía cinética de las moléculas, interacciones moleculares más débiles y el desplazamiento del equilibrio de adsorción hacia la fase gaseosa (Viganó et al. 2012).

**Tabla 7.14 Valores de los calores adsorción de agua para la monocapa ( $H_m$ ) y multicapa ( $H_n$ ) para las diferentes galletas.**

Muestra	Temperatura (°C)	( $H_m$ ) (KJ/mol)	( $H_n$ ) (KJ/mol)
<b>G-0%</b>	5	22.71	57.68
	20	11.35	46.77
	30	8.72	43.37
	45	5.31	40.47
<b>G-25%</b>	5	22.90	56.20
	20	10.89	45.21
	30	7.70	41.75
	45	5.52	38.77
<b>G-50%</b>	5	19.04	57.67
	20	7.90	46.77
	30	3.91	43.36
	45	2.06	40.47
<b>G-75%</b>	5	18.86	56.53
	20	6.44	45.56
	30	2.52	42.12
	45	1.84	39.16
<b>G-100%</b>	5	32.96	55.71
	20	21.16	44.70
	30	17.75	41.23
	45	15.55	38.22

En la tabla 7.15 se muestra los valores obtenidos del área superficial de adsorción  $S_A$ , ( $\text{m}^2/\text{g}$ , b.s), para cada galleta utilizando la ecuación (14), también a través de la ecuación (16 y 18), se determinaron los valores tanto del poro crítico

como el tamaño del poro de adsorción. Se observa que a medida que aumenta la sustitución de emulgel por mantequilla en las galletas el área superficial de adsorción disminuye lo que conlleva a que se encuentre un aumento en el tamaño del poro crítico y el tamaño del poro efectivo. Esto se debe a la menor densidad de sitios de adsorción y a la modificación de la estructura porosa del material (Al-Muhtaseb et al., 2010). Resultados similares se encontraron en galletas de Achira (Collazos-Escobar et al., 2023).

**Tabla 7.15 Área superficial de adsorción, tamaño crítico del poro y tamaño del poro efectivo de adsorción para cada galleta a diferentes formulaciones de emulgel.**

<b>Muestras</b>	<b><math>S_A</math> (<math>m^2/g</math>, b.s)</b>	<b><math>r_c</math> (nm)</b>	<b><math>r_p</math> (nm)</b>
G- 0%	354.38 ± 67.7	7.33 ± 4.90	8.05 ± 5.10
G- 25%	314.31 ± 118.4	7.34 ± 5.62	8.16 ± 5.82
G- 50%	291.45 ± 77.6	7.58 ± 5.57	8.31 ± 5.77
G- 75%	274.36 ± 99.2	7.65 ± 5.62	8.38 ± 5.84
G- 100%	254.38 ± 67.7	7.92 ± 6.24	8.66 ± 6.46

En estos datos no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0.05$ ).

### 7.7.7 Propiedades termodinámicas diferenciales

Las propiedades diferenciales  $\Delta H dif$ ,  $\Delta S dif$  y  $\Delta G$  se calcularon utilizando las ecuaciones (19, 20 y 21), en el rango de contenido de agua en equilibrio de 0 a 30 (%). La entalpía diferencial, la entropía diferencial y la energía libre de Gibbs para las galletas con cero por ciento de emulgel (G – 0%) se muestran en la Fig. 7.18 respectivamente. Las propiedades diferenciales para el resto de las galletas (G – 25 %, G- 50 %, G- 75% y G – 100%), se muestran en el Anexo 4.

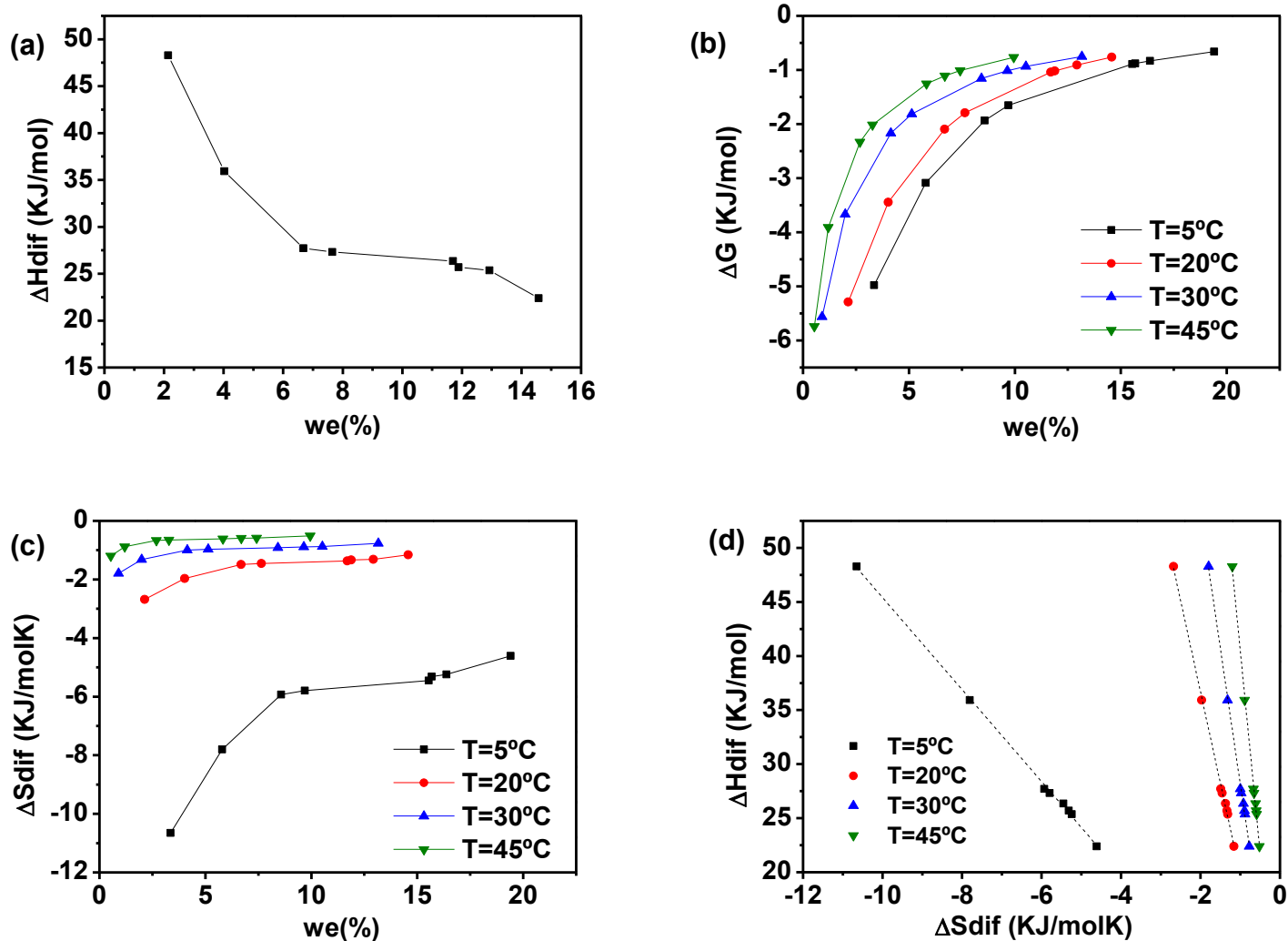


Figura 7.18 (a) Entalpia diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d) Teoría de compensación a diferentes temperaturas.

El cambio de entalpia diferencial ( $\Delta H_{dif}$ ), mostró una disminución conforme aumentaba el contenido de humedad de equilibrio. Esta tendencia puede explicarse cuantitativamente, ya que a bajos niveles de humedad, la adsorción ocurre en los sitios más activos disponibles, lo que genera una alta energía de interacción (Mulet et al., 2002). Los valores iniciales del calor de adsorción pueden estar relacionados con la quimisorción en grupos polares. La notable variación en  $\Delta H_{dif}$  en función del contenido de agua, observada en la Fig. 7.18 (a), sugiere que las interacciones entre las moléculas de agua son más heterogéneas en este rango de bajo contenido

de agua. Esto nos permite anticipar que las galletas serán significativamente influenciadas por cambios en la actividad del agua (Viganó et al., 2012). Resultados similares han sido reportados en el análisis de productos a base de almidón, como las galletas de avena (McMinn et al., 2007), en galletas de achira (Collazos-Escobar et al., 2023) y el pastel de madeira horneado (Al-Muhtaseb et al., 2010).

Los valores negativos de la energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ ) indican una alta afinidad de las moléculas de agua hacia la matriz adsorbente, lo que sugiere que el proceso de adsorción es espontáneo y exotérmico. Esto implica que, para que la adsorción de las galletas ocurra, no se necesita energía adicional del entorno. Se observó que el efecto de la temperatura sobre el  $\Delta G$  es más pronunciado a bajos niveles de humedad en las galletas Fig. 7.18 (b). A una temperatura de 5 °C, el  $\Delta G$  fue significativamente menor, lo que sugiere una mayor espontaneidad en el proceso y, por ende, una mayor capacidad higroscópica del material.

La Figura 7.18 (c) muestra las variaciones promedio en  $\Delta S_{dif}$  en función de  $W_e$ . De acuerdo con Gonelli et al. (2013), la cantidad de sitios de sorción disponibles a un nivel energético específico es directamente proporcional a la entropía diferencial, la cual refleja el grado de desorden y la aleatoriedad en el movimiento de las moléculas de agua. Los valores máximos de  $\Delta S_{dif}$  se registraron, en su mayoría, a una temperatura de 45 °C. En las demás temperaturas, las curvas de  $\Delta S_{dif}$  mostraron un comportamiento similar, destacando que los datos seguían el orden ( $T=5 < T=25 < T=30$  °C). Para las demás formulaciones de galletas que contenían emulgel en lugar de mantequilla, se observaron distintos valores de  $\Delta S_{dif}$ , lo que sugiere que cada formulación podría haber generado un número variable de sitios de adsorción a un valor específico de  $W_e$ , permitiendo diversas configuraciones de las moléculas de agua absorbidas.

La ley de compensación diferencial de entalpía **vs** entropía a diferentes temperaturas experimentales fue válida, manifestada por el patrón lineal encontrado Fig. 7.18 (d) entre las cifras diferenciales de  $\Delta H_{dif}$  y  $\Delta S_{dif}$ . El valor de ( $T_{hm}$ ) determinado usando la ecuación (23) resultó de 297.28 K y los valores de  $T_\beta$  para cada formulación de galletas se presentan en la tabla 7.16. Debido al hecho de que ( $T_{hm}$ ) es mayor y así diferente a  $T_\beta$  para cada formulación de galletas, la teoría de

compensación es validada e indica que el proceso de adsorción de las galletas utilizando emulgel como sustituto de mantequilla fue impulsado por la entropía. También al ser negativos los valores de la intersección del ajuste lineal ( $\Delta G_{\beta}$ ) ecuación (22) confirma la espontaneidad del proceso de adsorción. Resultados similares al estudiar alimentos con bajo contenido de humedad fueron reportados por Viganó et al. (2012) y Silva et al. (2014).

**Tabla 7.16 Valores de la temperatura isocinética ( $T_{\beta}$ ) para cada formulación de galletas a diferente temperatura.**

Muestra	Parámetro	°K	°K	°K	°K
G-0%	$T_{\beta}$	268.74	256.14	247.95	235.61
G-25%	$T_{\beta}$	272.36	270.63	269.61	268.20
G-50%	$T_{\beta}$	272.66	271.77	271.15	270.40
G-75%	$T_{\beta}$	272.88	272.55	272.35	272.07
G-100%	$T_{\beta}$	272.95	272.71	272.59	272.41

### 7.7.8 Propiedades termodinámicas integrales

La entalpía integral ( $\Delta H_{int}$ ) y la entropía integral ( $\Delta S_{int}$ ), se calcularon utilizando las ecuaciones (24 y 25), los resultados obtenidos para las galletas con cero por ciento de emulgel (G – 0%) se muestran en la Fig. 7.19 respectivamente. Las propiedades integrales para el resto de las galletas (G – 25 %, G- 50 %, G- 75% y G – 100%), se muestran en el Anexo 5. El  $\Delta H_{int}$  como función de la actividad de agua disminuyó a medida que aumentaba el por ciento del contenido de humedad en equilibrio siendo estas las cifras superiores o más altas en comparación con las obtenidas para el  $\Delta H_{dif}$  esto puede estar sucediendo por el hecho de que la entalpía diferencial, según, Domínguez et al. (2007), es la energía promedio de todas las moléculas de agua ya unidas al sólido en un nivel de hidratación particular, en otras palabras, se calcula la energía ligada a la unión agua-sólido.

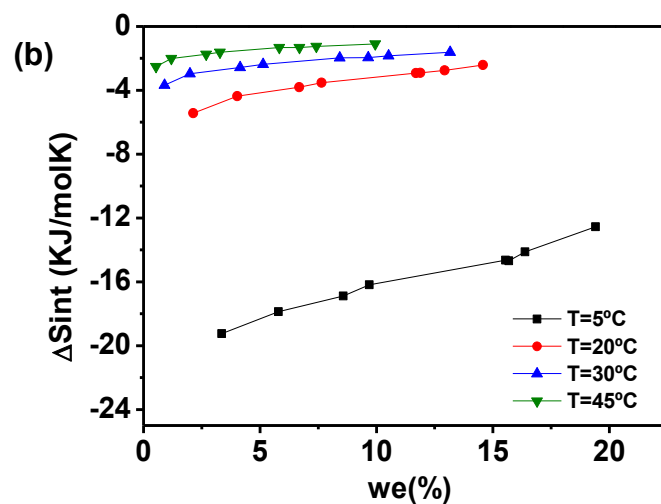
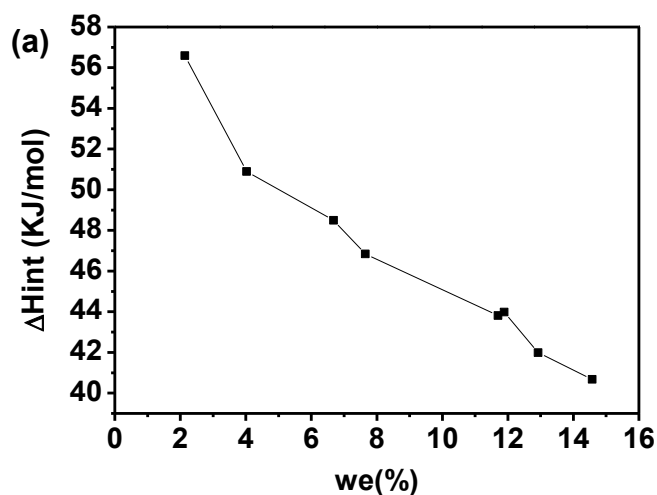


Figura 7.19 (a) Entalpia integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua.

La entropía integral,  $\Delta S_{int}$  la cual que puede interpretarse cualitativamente en términos del orden - desorden de las moléculas adsorbidas (Rizvi, 2005) mostró un aumento progresivo a medida que aumentaba la adsorción, es de importancia tener presente los valores mínimos para el rango (1 – 4%) del contenido de humedad en equilibrio esto implica que a esas condiciones las moléculas de agua están más organizadas y menos disponibles para participar en reacciones de deterioro (Gonelli et al. 2013), por lo que puede considerarse como la mejor condición para asegurar la estabilidad de las galletas durante el almacenamiento.

## Capítulo 8: Conclusiones

Las condiciones de pre - acondicionamiento de los biopolímeros se establecieron de manera efectiva, destacando que, independientemente de los tratamientos aplicados, todas las muestras exhibieron un comportamiento de fluido pseudoplástico. En el caso del pre - acondicionamiento (PC), se observó que un mayor tiempo de ultrasonido incrementó los valores de viscosidad (PC320 > PC310 > PC30 y PC620 > PC610 > PC60). Además, la viscosidad aparente fue significativamente mayor a un pH de 6 en comparación con un pH de 3. En cuanto a las propiedades viscoelásticas, los tratamientos PC6, tanto con como sin ultrasonido, mostraron un comportamiento predominantemente elástico, mientras que en los tratamientos a pH 3, solo el tratamiento sin pre - acondicionamiento (PC30) presentó características similares. Para los tratamientos PC310 y PC320, se observó que el módulo de pérdida superó al de almacenamiento ( $G'' > G'$ ), indicando un carácter viscoso predominante.

Respecto a la inulina (Inu), se encontró que un enfriamiento más rápido (I10) generó un material con mayor resistencia al flujo en comparación con el control de dispersión (I0) y el tratamiento de pre - acondicionamiento (I5). En términos de propiedades viscoelásticas, la muestra de Inu sin tratamiento térmico (I0) mostró un comportamiento mayormente elástico, similar a lo observado en I5, aunque este último presentó un cruce de módulos a frecuencias superiores a 20 rad/s. El tratamiento I10 mantuvo valores de  $G' > G''$  en todo el rango de frecuencias analizado.

Para las mezclas de PC620 - I10, todos los tratamientos conservaron el comportamiento pseudoplástico característico de los materiales individuales, con muestras que contenían mayor proporción de proteína mostrando una viscosidad más alta. En cuanto a las propiedades viscoelásticas, las mezclas con mayor contenido proteico ([2:1] > [1:1]) exhibieron los valores más altos de  $G'$ , indicando un comportamiento predominantemente elástico.

Las condiciones para la formación del emulgel O/W fueron establecidas con éxito. Los estudios reológicos, que variaron las composiciones de emulgel (relación PC-I

de 1:1, 1:2 y 2:1) y la fase dispersa (0.10, 0.20 y 0.30), revelaron que las mezclas estabilizadas con una relación de [2:1] mostraron interacciones más robustas entre los biopolímeros, favoreciendo la formación de estructuras resistentes que contribuyen a una mayor estabilidad. El análisis microscópico indicó que todas las emulsiones presentaron gotas de aceite bien definidas, con diámetros entre 4.53 y 11.03  $\mu\text{m}$  y eficiencias de encapsulación de aceite (EE) superiores al 90%. El tamaño y la distribución del diámetro de las gotas se vieron afectados por la composición de la mezcla de biopolímeros y la cantidad de aceite en la fase dispersa, siendo el diámetro promedio menor en las emulsiones con relación PC-I de [2:1], seguido por las mezclas [1:1] y [1:2].

El uso del emulgel estabilizado con la relación PC-I de [2:1] como sustituto de la mantequilla en la elaboración de galletas se presenta como una alternativa viable para desarrollar un producto más saludable. Las galletas elaboradas con el emulgel mostraron mejoras estructurales en dureza y firmeza en comparación con aquellas hechas con mantequilla, lo que les confiere mayor resistencia a fuerzas externas. Aunque la adición de emulgel alteró el color de las galletas, este cambio no fue significativo, manteniendo un tono amarillo característico, aunque algunas presentaron matices rojizos al variar el contenido de emulgel entre 0% y 75%. Todas las formulaciones mostraron predominantemente una morfología ovoide/circular, evidenciando la presencia de pequeños poros en su superficie.

## Capítulo 9: Perspectivas

Partiendo de los resultados obtenidos en el presente proyecto, surgen nuevas preguntas e ideas las cuales podrían desarrollarse en futuras investigaciones para completar el estudio y fortalecer la viabilidad comercial del producto. A partir de este tema de trabajo se puede realizar un análisis de digestión in vitro de las galletas elaboradas con el emulgel. La implementación de este análisis permitiría no solo validar las propiedades nutricionales del producto final, sino también establecer comparaciones con galletas tradicionales que contienen grasas saturadas. La digestión in vitro facilitará la comprensión del impacto que tienen las diferentes formulaciones de emulgel sobre la salud intestinal y el metabolismo, contribuyendo así a la justificación del uso de este sustituto de grasa. Asimismo, se considera fundamental llevar a cabo una evaluación sensorial de las galletas elaboradas con las distintas formulaciones de emulgel, esto permitirá determinar la aceptabilidad del producto por parte de los consumidores. A través de paneles de cata, se podrán evaluar atributos como el sabor, la textura, el aroma y la apariencia, aspectos que son determinantes en la aceptación del producto en el mercado. Los resultados de estas pruebas proporcionarán información valiosa que permitirá ajustar la formulación, asegurando que cumpla con las expectativas del consumidor. En un futuro cercano, se pudiera llevar a cabo un estudio económico que evalúe la viabilidad del escalamiento del proceso de producción de las galletas conteniendo emulgel a nivel industrial. Este análisis incluirá la estimación de costos de producción, la evaluación de la rentabilidad y la identificación de posibles mercados objetivo. La escalabilidad del proceso es un aspecto crítico para la implementación comercial de las galletas con presencia de emulgel, y un estudio económico robusto permitirá tomar decisiones sobre la viabilidad del proyecto en un contexto industrial.

## Referencias

- Abdullah, Liu, L., Javed, H.U., Xiao, J. (2022). Engineering emulsion gels as functional colloids emphasizing food applications: A review. *Frontiers in Nutrition*, 9, 890188. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.890188>
- Agrahar-Murugkar, D., Gulati, P., Kotwaliwale, N., Gupta, C. (2014). Evaluation of nutritional, textural and particle size characteristics of dough and biscuits made from composite flours containing sprouted and malted ingredients. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 5129-5137. <https://doi.org/10.1007/s13197-014-1597-y>
- Akiyama, E., Yamamoto, T., Yago, Y., Hotta, H., Ihara, T., Kitsuki, T. (2007). Thickening properties and emulsification mechanisms of new derivatives of polysaccharide in aqueous solution: 2. The effect of the substitution ratio of hydrophobic/hydrophilic moieties. *Journal of Colloid and Interface Science*, 311(2), 438-446. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2007.03.009>
- Akram, W., Garut, N. (2020). Optimization of inulin production process parameters using response surface methodology. *Future Journal of Pharmaceutical Sciences*, 6,68. <https://doi.org/10.1186/s43094-020-00087-1>
- Alsaleem, K.A., Hamouda, M.E. (2024). Optimizing probiotic low-fat yogurt: The benefits of incorporating defatted rice bran for enhanced quality and functionality. *Food Science and Nutrition*, 12, 10242–10254. <https://doi.org/10.1002/fsn3.4558>
- Al-Muhtaseb A.H., Hararah M.A, Megahey E.K, McMinn W.A.M, Magee T.R.A(2010) Moisture adsorption isotherms of microwave-baked Madeira cake LWT - Food Science and Technology, 43 (7) (2010), pp. 1042-1049, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2010.01.003>
- Alvarez-Ramirez, J., Vernon-Carter, E. J., Carrillo- Navas, H., & Meraz, M. (2018). Effects of cooking temperature and time on the color, morphology, crystallinity, thermal properties, starch-lipid complexes formation and rheological properties of roux. *LWT-Food Science and Technology*. 91, 203-212 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2018.01.038>

- Apolinário, A.C., de Carvalho, E.M., de Lima Damasceno, B.P., da Silva, P.C., Converti, A., Pessoa Jr, A., da Silva, J.A. (2017). Extraction, isolation and characterization of inulin from *Agave sisalana* boles. *Industrial Crops and Products*, 108, 355-362. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.06.045>
- Bais H.P., Ravishankar G.A. (2001). *Cichorium intybus* L – cultivation, processing, utility, value addition and biotechnology, with an emphasis on current status and future prospects. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 81, 467-484. <https://doi.org/10.1002/jsfa.817>
- Balan, C., Chis, M.I., Rachisan, A.L., Baia, M. (2018). A vibrational study of inulin by means of experimental and theoretical methods. *Journal of Molecular Structure* 1164, 84-88. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2018.03.047>
- Barragán-Martínez, L.P., Román-Guerrero A., Vernon-Carter, E.J., Alvarez-Ramirez, J. (2022). Impact of fat replacement by a hybrid gel (canola oil/candelilla wax oleogel and gelatinized corn starch hydrogel) on dough viscoelasticity, color, texture, structure, and starch digestibility of sugar-snap cookies. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 29, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2022.100563>
- Barnes H. A Handbook of Elementary Rheology. University of Wales, Institute of Non-Newtonian Fluid. Wirral, Inglaterra, 2000.
- BaŞyigit, B., Görgüç, A., Gençdağ, E., Cansu, Ü., Yilmaz, F.M., Karaaslan, M. (2023). Functional characterization of high-yield plant protein powder valorized from de-oiled sour cherry seed using microwave-assisted enzymatic extraction followed by spray- and freeze-drying. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13, 14657.14671. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03225-2>
- Belton, P.S., Bogracheva, T., Cserhalmi, Z., Czukor, B., Grant, A., Lambert, N., Wellner, N. (1997). NMR and FTIR studies of hydrated pea proteins. *Food Hydrocolloids*, 11(4), 485-491. [https://doi.org/10.1016/s0268-005x\(97\)80047-1](https://doi.org/10.1016/s0268-005x(97)80047-1)
- Bonacucina, G., Cespi, M., Palmieri, G.F. (2009). Characterization and stability of emulsion gel based on acrylamide/sodium acryloyldimethyl taurate copolymer. *AAPS PharmSciTech*, 10(2), 368–375. <https://doi.org/10.1208/s12249-009-9218-1>
- Bogahawaththa, D., Trivedi, J., Dissanayake, M., Vasiljevic, T. (2019). Impact of controlled shearing on solubility and heat stability of pea protein isolate

- dispersed in solutions with adjusted ionic strength. *Food Research International*, 125, 108522. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2019.108522>
- Carbonaro, M., Maselli, P., Nucará, A. (2012). Relationship between digestibility and secondary structure of raw and thermally treated legume proteins: a Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopic study. *Amino Acids*, 43, 911-921. <https://doi.org/10.1007/s00726-011-1151-4>
- Carpentier, J., Conforto, E., Chaigneau, C., Vendeville, J.-E., Maugard, T. (2021), Complex coacervation of pea protein isolate and tragacanth gum: Comparative study with commercial polysaccharides. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 69, 102641. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2021.102641>
- Cen, S., Li, S., Meng, Z. (2024). Advances of protein-based emulsion gels as fat analogues: Systematic classification, formation mechanism, and food application, *Food Research International*, 191, 114703. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2024.114703>
- Chen, W., Ding, Y., Zhao, Y.-M., Ma, H. (2023). Strategies to improve the emulsification properties of rice proteins as a promising source of plant-based emulsifiers: An updated mini-review. *Food Bioscience*, 53, 102697. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102697>
- Chiavaro, E., Vittadini, E., Corradini, C. (2006). Physicochemical characterization and stability of inulin gels. *European Food Research and Technology*, 225, 85-94. <https://doi.org/10.1007/s00217-006-0385-y>
- Červenka, L., Stępień, A., Frühbauerová, M., Velichová, H., & Witczak, M. (2019). Thermodynamic properties and glass transition temperature of roasted and unroasted carob (*Ceratonia siliqua* L.) powder. *Food Chemistry*, 300, 125208. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125208>
- Collazos-Escobar Gentil A, Gutiérrez Guzmán Nelson, A. Váquiro Herrera Henry Bona José , Cárcel Juan, García-Pérez José V. (2023) Model-based investigation of water adsorption in Achira (*Canna edulis* K.) biscuits. LWT Volume 189 <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115472>
- De Los Santos-Trinidad . J, Pérez Alonso .C, Cruz Sosa. F, Román-Guerrero. A (2023) Effect of the use of sweet potato or chayote tuber starch hydrogels on the physical properties of oleogel-in-hydrogel (bigels) systems. *International Journal*

of Food Science & Technology Volume 58, Issue 12 p. 6871-6880.  
<https://doi.org/10.1111/ijfs.16740>

Dickinson, E., Merino, L.M. (2002). Effect of sugars on the rheological properties of acid caseinate-stabilized emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 16(4), 321-331.  
[https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00105-9](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00105-9)

Domínguez, I.L., Azuara, E., Vernon-Carter, E.J., Beristain, C.I., 2007. Thermodynamic analysis of the effect of water activity on the stability of macadamia nut. *J. Food Eng.* 81, 566–571.

Erdoğdu, Ö., Görgüç, A., Yilmaz, F.M. (2023). Functionality enhancement of pea protein powder via high-intensity ultrasound: Screening in-vitro digestion, o/w emulsion properties and testing in gluten-free bread. *Plant Foods for Human Nutrition*, 78, 597-603. <https://doi.org/10.1007/s11130-023-01087-1>

Farshi, P., Mirmohammadali, S.N., Rajpurohit, B., Smith, J.S., Li, Y. (2024). Pea protein and starch: Functional properties and applications in edible films. *Journal of Agriculture and Food Research*, 15, 100927.  
<https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100927>

Flamm, G., Glinsmann, W., Kritchevsky, D., Prosky, L., Roberfroid, M. (2001). Inulin and oligofructose as dietary fiber: A review of the evidence. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 41(5), 353-362. <https://doi.org/10.1080/20014091091841>

Franck A. Inulin. En: *Food Polysaccharides and Their Applications*. Stephen A. (Editor). Segunda Edición. Nueva York, USA: Marcel Dekker; 2006. 733 pp.

Ge, J., Sun, C., Chang, Y., Sun, M., Zhang, Y., & Fang, Y. (2022). Heat-induced pea protein isolate gels reinforced by panda bean protein amyloid fibrils: Gelling properties and formation mechanism. *Food Research International*, 162, 112053. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2022.112053>

Geremias-Andrade, I. M., Souki, N. P. B. G., Moraes, I. C. F., Pinho, S. C. (2016). Rheology of emulsion-filled gels applied to the development of food materials. *Gels*, 2(3), 22. <https://doi.org/10.3390/gels2030022>

Gorji, S. G., Gorji, E. G., Mohammadifar, M. A., y Zargaraan, A. (2014).  
Complexation of sodium caseinate with gum tragacanth: Effect of various

species and rheology of coacervates. *International Journal of Biological Macromolecules*, 67, 503–511. [doi: 10.1016/j.ijbiomac.2014.02.037](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.02.037)

Gonelli, A.L.D., Corrêa, P.C., Oliveira, G.H.H., Afonso-Júnior, P.C., 2013. Water sorption properties of coffee fruits, pulped and green coffee. *LWT – Food Sci. Technol.* 50, 386–391.

Glusac, J., Davidesco-Vardi, I., Isaschar-Ovdat, S., Kukavica, B., Fishman, A. (2018). Gel-like emulsions stabilized by tyrosinase-crosslinked potato and zein proteins. *Food Hydrocolloids*, 82, 53–63. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.03.046>.

Guerra-Oliveira, P., Belorio, M., Gomez, M. (2021). Waste bread as main ingredient for cookie elaboration. *Foods*, 10, 1759. <https://doi.org/10.3390/foods10081759>

Guldiken, B., Saffon, M., Nickerson, M.T., Ghosh, S. (2023). Improving physical stability of pea protein-based emulsions near the isoelectric point via polysaccharide complexation. *Food Hydrocolloids*, 145, 109029. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109029>

González-Tomás L., Tárrega A., Costell E, (2004), INFLUENCIA DE LA INULINA EN LA VISCOELASTICIDAD Y EN LA TEXTURA DE NATILLAS DE VAINILLA. Instituto de Agroquímica y Tecnología de Alimentos (CSIC). Apdo. correos 73. 46100 Burjassot (Valencia)

Hadnađev, T.D., Hadnađev, M., Pojić, M., Rakita, S., Krstonošić, V. (2015), Functionality of OSA starch stabilized emulsions as fat replacers in cookies, *Journal of Food Engineering*, 167 (Part B), 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2015.02.002>

Hadnađev, T.D., Dokić, P., Krstonošić, V., HadnađevM. (2012). Influence of oil phase concentration on droplet size distribution and stability of oil-in-water emulsions. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 115(3), 313-321. <https://doi.org/10.1002/ejlt.201100321>

- Hasanvand, E., Rafe, A., y Emadzadeh, B. (2018). Phase separation behavior of flaxseed gum and rice bran protein complex coacervates. *Food Hydrocolloids*, 82, 412–423. doi: [10.1016/j.foodhyd.2018.04.015](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.04.015)
- Hernández-Rodríguez, L., Lobato-Calleros, C., Ramírez-Santiago, C., Rodríguez-Huezo, M. E. y Meraz, M. (2017). Microstructure and rheology of yogurt added with protein- *L. plantarum*- polysaccharide coacervate and stevia in substitution of milk-fat and sucrose. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 16(1), 77-89
- Hager A. Arendt E. (2013). Influencia de hidroxipropilmetilcelulosa (HPMC), goma xantana y su combinación en el volumen específico del pan, la dureza de la miga y características del grano de miga de pan sin gluten a base de arroz, maíz, tef y trigo sarraceno. *Food Hydrocolloids*. 32 (1) 195-203.
- Iglesias H.A. y Chirife J. (1982). *Handbook of Food Isotherms*. Academic Press. Nueva York, EUA.
- Jo, M., Park, M., Choi, Y.J. (2024). Citrus peel pectin and alginate-based emulgel particles for small intestine-targeted oral delivery of curcumin. *Food Research International*, 176, 113847. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2023.113847>
- Jiang Z-Q, Wang, J., Stoddard, F., Salovaara, H., Sontag-Strohm, T. (2020). Preparation and characterization of emulsion gels from whole faba bean flour. *Foods*. 9(6), 755. <https://doi.org/10.3390/foods9060755>
- Karaca, A.C., Tan, C., Assadpour, E., Jafari, S.M. (2025). Recent advances in the plant protein-polyphenol interactions for the stabilization of emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 335, 103339. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103339>
- Kang, Z., Zhang, S., Kong, Y., Wu, Z., Li, Y., Liu, T., Xie, F. (2024). Modification of soybean protein isolate by pH-shifting combined with ultrasonic treatment: Structural, viscosity, and functional properties. *Food Structure*, 42, 100383. <https://doi.org/10.1016/j.foostr.2024.100383>
- Kim, K.-H., Renkema, J.M.S., van Vliet, T. (2001a). Rheological properties of soybean protein isolate gels containing emulsion droplets. *Food Hydrocolloids*, 15(3), 295-302. [https://doi.org/10.1016/S0268-005X\(01\)00028-5](https://doi.org/10.1016/S0268-005X(01)00028-5)

- Kim, M.S., Nattress, L., Simons, C.T. (2025). Investigating the effect of protein type and protein concentration on texture and mouthfeel sensory properties of plant and animal-based beverages. *Food Quality and Preference*, 126, 105399. <https://doi.org/20.2026/j.foodqual.2024.105399>
- Kim, Y., Faqih, M., Wang, S.S. (2001). Factors affecting gel formation of inulin. *Carbohydrate Polymers*, 46(2), 135-145. [https://doi.org/10.1016/S0144-8617\(00\)00296-4](https://doi.org/10.1016/S0144-8617(00)00296-4)
- Kip, P., Meyer, D., Jellema, R. (2006). Inulin improve sensoric and textural properties of low-fat yogurts. *International Dairy Journal*, 16(9), 1098- 1103. <https://doi.org/10.1016/j.idairyj.2005.10.011>
- Knudsen, J.C., Øgøndal, L.H., Skibsted, L.H. (2008). Droplet surface properties and rheology of concentrated oil in water emulsions stabilized by heat-modified  $\beta$ -lactoglobulin B. *Langmuir*, 24(6), 2603-2610. <https://doi.org/10.1021/la703810g>
- Kong, J., Shaoning, Y. (2007). Fourier transform infrared spectroscopic analysis of protein secondary structures. *Acta Biochimica et Biophysica Sinica*, 39(8), 549-559. <https://doi.org/10.1111/j.1745-7270.2007.00320.x>
- Le, X.T., Rioux, L.E., Turgeon, S.L. (2017). Formation and functional properties of protein-polysaccharide electrostatic hydrogels in comparison to protein or polysaccharide hydrogels. *Advances in Colloid Interface Science*, 239, 127–35. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2016.04.006>
- Li, S., Lei, D., Zhu, Z., Cai, J., Manzoli, M., Jicsinszky, L., Grillo, G., Cravotto, G. (2021). Complexation of maltodextrin-based inulin and green tea polyphenols via different ultrasonic pretreatment. *Ultrasonics Sonochemistry*, 74, 105568. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105568>
- Lin D, Kelly AL, Miao S. (2020). Preparation, structure-property relationships and applications of different emulsion gels: bulk emulsion gels, emulsion gel particles, and fluid emulsion gels. *Trends in Food Science and Technology*, 102,123–37. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.05.024>
- Liu, W., Gao, H., McClements, D.J., Zhou, L., Wu, J., Zou, L. (2019). Stability, rheology, and  $\beta$ -carotene bioaccessibility of high internal phase emulsion gels. *Food Hydrocolloids*, 88, 210-217. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2018.10.012>

- Liu, J., Shim, Y. Y., Shen, J., Wang, Y., y Reaney, M. J. (2017). Whey protein isolate and flaxseed (*Linum usitatissimum* L.) gum electrostatic coacervates: Turbidity and rheology. *Food Hydrocolloids*, 64, 18–27.  
[doi:10.1016/j.foodhyd.2016.10.006](https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2016.10.006)
- Lorenzo, G., Zaritzky, N., Califano, A. (2013). Rheological analysis of emulsion-filled gels based on high acyl gellan gum. *Food Hydrocolloids*, 30(2), 672-680.  
<https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2012.08.014>
- Martinez, T.F., Moyano, F.J., Diaz, M., Barroso, F.G., Alarcon, F.J. (2004). Ruminal degradation of tannin-treated legume meals. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 84 (14): 1979-1987. <https://doi.org/10.1002/jsfa.1907>
- Mahdieh Zare, Mohamed, Taghi Golmakani, Mehrdad Niakousari, Mohamed, Hadi Eskandari, Fatemeh Ghiasi, Seyed Mohammad Hashem Hosseini (2024) Alginate/whey protein isolate-based emulgel as an alternative margarine replacer in processed cheese: Impact on rheological, mechanical, nutritional, and sensory characteristics, *Journal of Dairy Science*,  
<https://doi.org/10.3168/jds.2024-24140>
- McClements, D.J. (2003). The rheology of emulsion-based food products. En: *Texture in Food*, Eds. Brian M. McKenna. Woodhead Publishing Series in Food Science, Technology and Nutrition, Woodhead Publishing, 3-35.  
<https://doi.org/10.1533/9781855737082.1.3>
- McClements, D.J. (2015). *Food Emulsions: Principles, Practices, and Techniques*, Third Edition (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b18868>
- McMinn W.A.M, McKee D.J., Magee T.R.A (2007) Moisture adsorption behaviour of oatmeal biscuit and oat flakes, *Journal of Food Engineering*, 79 (2) (2007), pp. 481-493, <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.009>
- Moreno, H.M., Domínguez-Timón, F., Díaz M.T., Pedrosa, M.M., Borderías, J.A., Tovar, C.A. (2020). Evaluation of gels made with different commercial pea protein isolate: Rheological, structural and functional properties. *Food Hydrocolloids*, 99, 105375. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2019.105375>

- Mousazadeh, M., Mousavi, M., Askari, G., Kiani, H., Adt, I., & Gharsallaoui, A. (2018). Thermodynamic and physicochemical insights into chickpea protein-Persian gum interactions and environmental effects. *International Journal of Biological Macromolecules*, 119, 1052–1058. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.07.168>
- Mulet, A., García-Pascual, P., Sanjuán, N., García-Reverter, J., 2002. Equilibrium isotherms and isosteric heats of morel (*Morchela esculenta*). *J. Food Eng.* 53, 75–81.
- Nadian, N., Azizi, M.H., Ahangar, H.A., Aarabi, A. (2021). Textural and sensory characteristics of sugar- free biscuit formulated with quinoa flour, isomalt, and maltodextrin. *Food Science and Nutrition*, 9, 6501–6512. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2564>
- Nindjin C., Amani G.N. Y Sindic M. (2011). Effect of blend levels on composite wheat doughs performance made from yam and cassava native starches and bread quality. *Carbohydrate Polymers* 86 1637– 1645
- Olsmats, E., Rennie, A.R. (2024). Pea protein [*Pisum sativum*] as stabilizer for oil/water emulsions. *Advances in Colloid and Interface Science*, 326, 103123. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2024.103123>
- Olsmats, E., Ravindranathan, R.P., Knudsen, K.D., Kohlbrecher, J., Bonn, D., Rennie, A.R. (2025). Emulsions stabilized by pea protein – Hydration and protein distribution. *Food Hydrocolloids*, 162, 110989. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2024.110989>
- Oppong, D., Abdullah, Kaburi, S.A., Lamptey, F.P., Chaijan, M., Panpipat, W., Mussa, N.J., Lyimo, C.M., Bawa, N.M. (2024). Application of emulgel in muscle-based foods: a review. *Discover Food*, 4, 128. <https://doi.org/10.1007/s44187-024-00210-8>
- Organización Panamericana de Salud, OPS (2021). *Ácidos grasos trans*. OPS. Último acceso el 7 de enero 2025. <https://www.paho.org/es/temas/acidograsos-trans>
- Ortiz-Deleon, A.M., Ramírez-Santiago, C., Sandoval-Castilla, O., Roman-Guerrero, A., Aguirre-Mandujano, E. (2023). Evaluation of physicochemical, rheological, textural and thermal properties of Mexican manchego-type cheese

manufactured from goat's milk. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 22, Alim3012, <https://doi.org/10.24275/rmiq/Alim3012>

Ortiz-Deleon, A.M., Roman-Guerrero, A., Sandoval-Castilla, O., Cuevas-Bernardino, J.C. 2024. Characterization of O/W emulgels based on whey protein-alginate-inulin coacervates: Influence of temperature and ultrasound as protein preconditioning process. *International Journal of Biological Macromolecules*, 265, 131260. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131260>

Othmeni, I., Blecker, C., Karoui, R. (2025). pH-dependent emulsifying properties of pea protein isolate: Investigation of the structure- Function relationship. *International Journal of Biological Macromolecules*, 290, 139105. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.139105>

Patel, A.R., Dumlu, P., Vermeir, L., Lewille, B., Lesaffer, A., Dewettinck, K. (2015). Rheological characterization of gel-in-oil-in-gel type structured emulsions, *Food Hydrocolloids*, 46, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.12.029>

Petkova, N., Sherova, G., Denev, P.P. (2018). Characterization of inulin from dahlia tubers isolated by microwave and ultrasound-assisted extractions. *International Food Research Journal*, 25(5), 1876-1884.

Piazza, L., Benedetti, S. (2010). Investigation on the rheological properties of agar gels and their role on aroma release in agar/limonene solid emulsions. *Food Research International*, 43(1), 269-276. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2009.09.026>

Piao, X., Huang, J., Sun, Y., Zhao, Y., Zheng, B., Zhou, Y., Yu, H., Zhou, R., Cullen, P.J. (2023). Inulin for surimi gel fortification: Performance and molecular weight-dependent effects. *Carbohydrate Polymers*, 305, 120550. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2023.120550>

Quintana Calderón, S.A. Estudio del Comportamiento Reológico de la Masa para Galletas Tipo Cracker con Diferentes Tipos de Agitador. Tesis en Ingeniería Química, Universidad de los Andes. Colombia. 2016.

Rincón-Gallardo Patiño, S., Constantinou, S., Gorlick, C., da Silva Gomes, F. (2022). Evaluating progress and addressing actions to eliminate industrially produced trans-fatty acids in the Americas. *PAN American Journal of Public Health*, 46, 1-6. <https://doi.org/10.26633/RPSP.2022.130>

- Rizvi, S.S.H., 2005. Thermodynamic properties of foods in dehydration. In: Rao, M.A., Rizvi, S.S.H., Datta, A.K. (Eds.), *Engineering Properties of Foods*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, pp. 1–88.
- Rodríguez R., Jiménez A., Fernández J., Guillén R., Heredia A. (2006). Dietary fiber from vegetable products as source of ingredients. *Trends in Food Science and Technology*, 17, 3-15. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2005.10.002>
- Rodriguez Carbajo, P. *Elaboración de galletas sin gluten con mezclas de harina de arroz-almidón-proteína*. [Tesis Máster en Internet]. Universidad de Valladolid, Palencia. 2015.
- Ruíz-Ramos, J. O., Pérez-Orozco, J. P., Báez-González, J. G., Bósquez-Molina, E., Pérez-Alonso, C., & Vernon-Carter, E. J. (2006). Interrelationship between the viscoelastic properties and effective moisture diffusivity of emulsions with the water vapor permeability of edible films stabilized by mesquite gum–chitosan complexes. *Carbohydrate Polymers*, 64(2), 355–363. <https://doi:10.1016/j.carbpol.2005.12.020>
- Sala, G., van de Velde, F., Stuart, M.A.C., van Aken, G.A. (2007). Oil droplet released from emulsion-filled gels in relation to sensory perception. *Food Hydrocolloids*, 21 (5-6), 977-985. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2006.08.009>
- Sánchez-Torres, E. A., Abril, B., Benedito, J., Bon, J., García-Pérez, J. V. (2021). Water desorption isotherms of pork liver and thermodynamic properties. *LWT*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111857>
- Sereti, Kali Vasileia, Kotsiou, Costas G. Biliaderis, Athina Lazaridou, (2023) Emulsion gel enriched with a barley  $\beta$ -glucan concentrate for reducing saturated fat in biscuits, *Food Hydrocolloids*, <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109163>
- . Silva E.K, Fernandes R.V.D.B, Borges S.V. Botrel D.A, Queiroz F. (2014) Water adsorption in rosemary essential oil microparticles: Kinetics, thermodynamics and storage conditions. *Journal of Food Engineering*, 140 (2014), pp. 39-45, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2014.05.003>

- Shanthakumar, P., Klepacka, J., Bains, A., Chawla, P., Dhull, S. B., & Najda, A. (2022). The Current Situation of Pea Protein and Its Application in the Food Industry. *Molecules*, 27(16), 5354. <https://doi.org/10.3390/molecules27165354>
- SzE, P., Ying, A., Ting, A., R, J., Choy, M., McCrickerd, K., & G-Forde, C. (2022). Texture-based differences in eating rate influence energy intake for minimally processed and ultra-processed meals. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 1(116), 244-254. <https://doi.org/10.1093/ajcn/nqac068>
- Sohail, M., Naveed, A., Abdul, R., Gulfishan, Khan, H.M.S., Khan, H. (2018). An approach to enhanced stability: Formulation and characterization of *Solanum lycopersicum* derived lycopene based topical emulgel. *Saudi Pharmaceutical Journal*, 26(8), 1170-1177. <https://doi.org/10.1016/j.jsps.2018.07.005>
- Sormoli, M.E., Langrish, T.A.G. (2015). Moisture sorption isotherms and net isosteric heat of sorption for spray-dried pure orange juice powder. *LWT-Food Science and Technology*, 62, 875-882. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.064>
- Stone, A. K., Teymurova, A., y Nickerson, M. T. (2014). Formation and functional attributes of canola protein isolate—gum arabic electrostatic complexes. *Food Biophysics*, 9(3), 203–12. [doi: 10.1007/s11483-014-9334-7](https://doi.org/10.1007/s11483-014-9334-7)
- Sun, C., Gunasekaran, S. (2009). Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 23, 165-174. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2007.12.006>
- Tan, Z.L.A., Sng, A.X.Y., Nge, C.E., Phoon, P.Y. (2025). New insights into the strengthening of fibre-based emulsion gels by phenolic compounds. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 704, 135476. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135476>
- Tao, Y., Wu, Y., Yang, J., Jiang, N., Wang, Q., Chu, D., Han, Y., Zhou, J. (2018). Thermodynamic sorption properties , water plasticizing effect and particle characteristics of blueberry powders produced from juices , fruits and pomaces. *Powder Technology*, 323, 208–218. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.09.033>

- Talens Oliag, P. (2017). *Determinación de la Isotherma de Sorción de Agua un Alimento*. Departamento de Tecnología de Alimentos. Universidad Politécnica de Valencia.
- Timmermann E.O., Chirife J., Iglesias H.A. (2001). Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters? *Journal Food Engineering* 48:19-31.
- Vergara Herrera C.M. (2013). Comportamiento al flujo y estabilidad de emulsiones alimenticias elaboradas con tragacanto y albumina de huevo, efecto de la fase continua, México [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional de la Universidad Nacional Autónoma de México. [https://repositorio.unam.mx/contenidos/comportamiento-al-flujo-y-estabilidad-de-emulsiones-alimenticias-elaboradas-con-tragacanto-y-albumina-de-huevo-efec-239766?c=4vEyK7&d=false&q=\\*&i=2&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/comportamiento-al-flujo-y-estabilidad-de-emulsiones-alimenticias-elaboradas-con-tragacanto-y-albumina-de-huevo-efec-239766?c=4vEyK7&d=false&q=*&i=2&v=1&t=search_0&as=0)
- Viganó, J., Azuara, E., Telis, V.R.N., Beristain, C.I., Jiménez, M., Telis-Romero, J., 2012. Role of enthalpy and entropy in moisture sorption behavior of pineapple pulp powder produced by different drying methods. *Thermochim. Acta* 528, 63–71.
- Wagner, J., Andreadis, M., Nikolaidis, A., Biliaderis, C.G., Moschakis, T. (2021). Effect of ethanol on the microstructure and rheological properties of whey proteins: Acid-induced cold gelation. *LWT*, 139, 110518, <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2020.110518>
- Watherhouse A. Chatterton N. Glossary of fructans terms. En: *Science and Technology of Fructans*. Suzuki M., Chatterton N. (Editores). Boca Raton,: CRC Press. EE. UU.:1993. 369 pp.
- Wang, J., Rosell, C.M., de Barber, C.B. (2002). Effect of the addition of different fibres on wheat dough performance and bread quality. *Food Chemistry*, 79(2), 221-226. [https://doi.org/10.1016/S0308-8146\(02\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0308-8146(02)00135-8)
- Wee, M. S., Nurhazwani, S., Tan, K. W., Goh, K. K., Sims, I. M., Matia-Merino, L. (2014). Complex coacervation of an arabinogalactan-protein extracted from the *Meryta sinclarii* tree (puka gum) and whey protein isolate. *Food Hydrocolloids*, 42, 130–138. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2014.03.005>
- Wen-qiong, W., Pei-pei, Y., Ji-yang, Z., Zhi-hang, G. (2021). Effect of temperature and pH on the gelation, rheology, texture, and structural properties of whey

protein and sugar gels based on Maillard reaction. *Journal of Food Science*, 86, 1228–1242. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.15659>

Xu, J., Kenar, J.A. (2024). Rheological and micro-rheological properties of chicory inulin gels. *Gels*, 10(3), 171. <https://doi.org/10.3390/gels10030171>

Zoulias, E. I., Oreopoulou, V., & Tzia, C. (2002). Textural properties of low-fat cookies containing carbohydrate-or protein-based fat replacers. *Journal of Food Engineering*, 55, 337–342. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00111-5)

## Anexos

### Anexo1

*Ajuste de las curvas de viscosidad usando el modelo de Ostwald – de Waele (Ley de potencia).*

<i>Tratamiento</i>	<i>n</i>	<i>K(Pa*s)</i>	<i>R<sup>2</sup></i>
<i>E<sub>0.1</sub> 1:1</i>	<i>0.13</i>	<i>0.6683</i>	<i>0.9969</i>
<i>E<sub>0.2</sub> 1:1</i>	<i>0.13</i>	<i>0.7714</i>	<i>0.9906</i>
<i>E<sub>0.3</sub> 1:1</i>	<i>0.09</i>	<i>4.9828</i>	<i>0.9957</i>
<i>E<sub>0.1</sub> 1:2</i>	<i>0.17</i>	<i>0.2230</i>	<i>0.9946</i>
<i>E<sub>0.2</sub> 1:2</i>	<i>0.19</i>	<i>0.5904</i>	<i>0.9973</i>
<i>E<sub>0.3</sub> 1:2</i>	<i>0.13</i>	<i>1.1863</i>	<i>0.9899</i>
<i>E<sub>0.1</sub> 2:1</i>	<i>0.14</i>	<i>1.5971</i>	<i>0.9955</i>
<i>E<sub>0.2</sub> 2:1</i>	<i>0.16</i>	<i>8.3575</i>	<i>0.9957</i>
<i>E<sub>0.3</sub> 2:1</i>	<i>0.11</i>	<i>3.6555</i>	<i>0.9984</i>

*Dureza, adhesividad, resiliencia, cohesividad, índice de elasticidad, gomosidad, masticabilidad para cada muestra de emulgel.*

<i>Muestras</i>	<i>Dureza*(N)</i>	<i>% de deformación*</i>	<i>Adhesividad* (mJ)</i>	<i>Resiliencia*</i>	<i>Cohesividad*</i>	<i>Índice de Elasticidad*</i>	<i>Gomosidad* (N)</i>	<i>Masticabilidad* (mJ)</i>
<i>E0.1-1:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>38.75 ± 1.06</i>	<i>0.01 ± 0.01</i>	<i>0.04 ± 0.02</i>	<i>0.51 ± 0.25</i>	<i>1.88 ± 0.04</i>	<i>0.02 ± 0.00</i>	<i>0.32 ± 0.07</i>
<i>E0.2-1:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>31.80 ± 5.23</i>	<i>0.03 ± 0.02</i>	<i>0.05 ± 0.00</i>	<i>0.52 ± 0.78</i>	<i>2.17 ± 0.15</i>	<i>0.02 ± 0.02</i>	<i>0.33 ± 0.48</i>
<i>E0.3-1:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>39.20 ± 0.70</i>	<i>0.06 ± 0.02</i>	<i>0.02 ± 0.00</i>	<i>0.36 ± 0.46</i>	<i>2.28 ± 0.00</i>	<i>0.01 ± 0.01</i>	<i>0.19 ± 0.24</i>
<i>E0.1-1:2</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>36.95 ± 2.05</i>	<i>0.02 ± 0.03</i>	<i>0.05 ± 0.06</i>	<i>0.56 ± 0.40</i>	<i>1.96 ± 0.06</i>	<i>0.02 ± 0.01</i>	<i>0.40 ± 0.31</i>
<i>E0.2-1:2</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>39.25 ± 0.07</i>	<i>0.11 ± 0.08</i>	<i>0.02 ± 0.00</i>	<i>3.25 ± 5.07</i>	<i>2.06 ± 0.00</i>	<i>0.09 ± 0.09</i>	<i>1.56 ± 2.51</i>
<i>E0.3-1:2</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>36.40 ± 4.80</i>	<i>0.09 ± 0.01</i>	<i>0.08 ± 0.02</i>	<i>0.63 ± 0.07</i>	<i>2.03 ± 0.03</i>	<i>0.02 ± 0.00</i>	<i>0.37 ± 0.07</i>
<i>E0.1-2:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>33.40 ± 5.09</i>	<i>0.01 ± 0.02</i>	<i>0.05 ± 0.04</i>	<i>0.38 ± 0.53</i>	<i>1.02 ± 1.47</i>	<i>0.01 ± 0.01</i>	<i>0.18 ± 0.25</i>
<i>E0.2-2:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>37.75 ± 0.07</i>	<i>0.05 ± 0.00</i>	<i>0.00 ± 0.00</i>	<i>0.21 ± 0.29</i>	<i>2.10 ± 0.06</i>	<i>0.00 ± 0.00</i>	<i>0.10 ± 0.14</i>
<i>E0.3-2:1</i>	<i>0.03 ± 0.00</i>	<i>39.10 ± 0.28</i>	<i>0.07 ± 0.01</i>	<i>0.04 ± 0.03</i>	<i>0.10 ± 0.00</i>	<i>2.17 ± 0.15</i>	<i>0.00 ± 0.00</i>	<i>0.04 ± 0.00</i>

*\*No se encontraron diferencias significativas entre tratamientos a  $p < 0.05$ .*

## Anexo 2:

Valores de peso inicial, peso final, humedad inicial en base humedad y humedad de equilibrio en base seca para las distintas galletas almacenadas a distintas  $a_w$  a (5,30 y 45 °C)

<b>G – 0% T= 5 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b><math>a_w</math></b>	<b><math>m_o</math> (g)</b>	<b><math>m_f</math> (g)</b>	<b><math>Xw_i</math> (g H2O/g galleta)</b>	<b><math>W_e</math> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.116	3.73	3.82	0.015	0.039
Na2SO4	0.263	3.53	3.68	0.015	0.058
CH3COOK	0.433	3.52	3.79	0.015	0.093
Mg(NO3)2	0.489	3.21	3.49	0.015	0.103
CuCl	0.68	3.21	3.61	0.015	0.141
K2CO3	0.683	3.29	3.72	0.015	0.147
NaCl	0.698	3.5	3.98	0.015	0.154
KCl	0.751	3.72	4.38	0.015	0.195
<b>G - 25% T= 5 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b><math>a_w</math></b>	<b><math>m_o</math> (g)</b>	<b><math>m_f</math> (g)</b>	<b><math>Xw_i</math> (g H2O/g galleta)</b>	<b><math>W_e</math> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.115	3.04	3.15	0.014	0.051
Na2SO4	0.274	3.06	3.28	0.014	0.087
CH3COOK	0.435	3.08	3.41	0.014	0.123
Mg(NO3)2	0.496	3.12	3.48	0.014	0.131
CuCl	0.672	3.02	3.62	0.014	0.215
K2CO3	0.622	3.08	3.59	0.014	0.182
NaCl	0.698	3.01	3.61	0.014	0.216
KCl	0.779	3.15	3.92	0.014	0.262
<b>G - 50% T= 5 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b><math>a_w</math></b>	<b><math>m_o</math> (g)</b>	<b><math>m_f</math> (g)</b>	<b><math>Xw_i</math> (g H2O/g galleta)</b>	<b><math>W_e</math> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.13	3.79	4.04	0.009	0.075
Na2SO4	0.264	3.63	3.92	0.009	0.089
CH3COOK	0.462	3.3	3.88	0.009	0.186
Mg(NO3)2	0.488	3.57	4.25	0.009	0.201

CuCl	0.648	3.54	4.49	0.009	0.279
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.678	3.63	4.75	0.009	0.320
NaCl	0.699	3.1	4.09	0.009	0.331
KCl	0.775	3.35	4.78	0.009	0.439
<b>G - 75% T= 5 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub></b> <b>(g)</b>	<b>m<sub>f</sub></b> <b>(g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.115	4.53	4.59	0.006	0.019
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.273	3.52	3.76	0.006	0.074
CH <sub>3</sub> COOK	0.454	3.52	3.89	0.006	0.111
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.489	3.73	4.17	0.006	0.124
CuCl	0.648	3.73	4.43	0.006	0.194
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.693	3.54	4.22	0.006	0.199
NaCl	0.688	4.04	4.79	0.006	0.192
KCl	0.775	4.13	5.18	0.006	0.261
<b>G - 100% T= 5 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub></b> <b>(g)</b>	<b>m<sub>f</sub></b> <b>(g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.114	4.33	4.39	0.028	0.043
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.278	5.16	5.34	0.028	0.064
CH <sub>3</sub> COOK	0.447	4.48	4.87	0.028	0.118
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.493	4.88	5.45	0.028	0.149
CuCl	0.698	4.52	5.45	0.028	0.240
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.655	4.62	5.43	0.028	0.209
NaCl	0.679	4.77	5.66	0.028	0.220
KCl	0.794	4.53	5.67	0.028	0.287
<b>G - 0% T= 30 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub></b> <b>(g)</b>	<b>m<sub>f</sub></b> <b>(g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub></b> <b>(g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.11	3.29	3.32	0.015	0.024
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.233	3.33	3.37	0.015	0.027
CH <sub>3</sub> COOK	0.423	3.53	3.62	0.015	0.041
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.487	3.22	3.32	0.015	0.046
CuCl	0.632	3.2	3.38	0.015	0.072
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.668	3.53	3.81	0.015	0.095

NaCl	0.69	3.33	3.63	0.015	0.106
KCl	0.742	3.57	3.98	0.015	0.131
<b>G - 25% T= 30 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>0</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>X<sub>wi</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.111	3.07	3.09	0.014	0.021
Na2SO4	0.234	3.04	3.09	0.014	0.031
CH3COOK	0.428	3.05	3.15	0.014	0.047
Mg(NO3)2	0.468	3.12	3.24	0.014	0.053
CuCl	0.625	3.1	3.39	0.014	0.109
K2CO3	0.642	3.03	3.29	0.014	0.101
NaCl	0.682	3.02	3.35	0.014	0.125
KCl	0.753	3.02	3.46	0.014	0.162
<b>G - 50% T= 30 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>0</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>X<sub>wi</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.134	3.59	3.68	0.009	0.034
Na2SO4	0.257	3.55	3.65	0.009	0.037
CH3COOK	0.455	3.39	3.68	0.009	0.095
Mg(NO3)2	0.488	3.67	4.05	0.009	0.113
CuCl	0.646	3.54	4.12	0.009	0.174
K2CO3	0.678	3.45	4.09	0.009	0.196
NaCl	0.689	3.53	4.22	0.009	0.206
KCl	0.766	3.55	4.58	0.009	0.301
<b>G - 75% T= 30 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>0</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>X<sub>wi</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.11	4.53	4.55	0.006	0.010
Na2SO4	0.263	3.73	3.86	0.006	0.041
CH3COOK	0.445	3.52	3.68	0.006	0.051
Mg(NO3)2	0.485	3.54	3.73	0.006	0.060
CuCl	0.687	3.56	3.94	0.006	0.113
K2CO3	0.672	3.53	3.87	0.006	0.102
NaCl	0.656	4.27	4.63	0.006	0.090
KCl	0.768	4.33	4.94	0.006	0.147

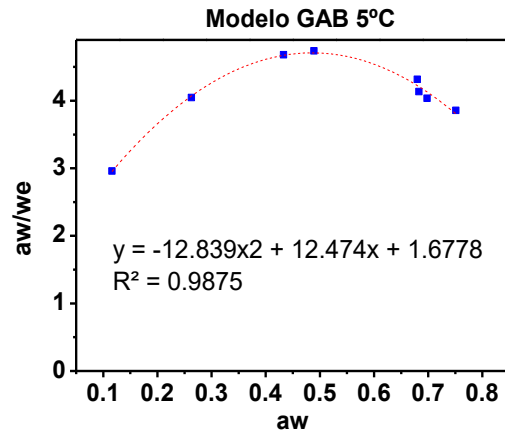
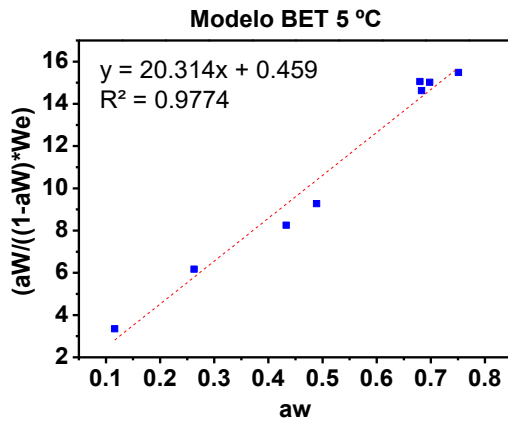
<b>G - 100% T= 30 °C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.11	4.45	4.45	0.028	0.028
Na2SO4	0.275	4.53	4.57	0.028	0.038
CH3COOK	0.465	4.5	4.73	0.028	0.081
Mg(NO3)2	0.493	4.7	4.99	0.028	0.092
CuCl	0.699	5.43	6.28	0.028	0.189
K2CO3	0.657	4.88	5.52	0.028	0.163
NaCl	0.678	4.77	5.45	0.028	0.175
KCl	0.775	4.63	5.49	0.028	0.219
<b>G - 0% T= 45°C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.114	3.5	3.51	0.015	0.018
Na2SO4	0.228	3.32	3.33	0.015	0.018
CH3COOK	0.414	3.53	3.58	0.015	0.029
Mg(NO3)2	0.467	3.2	3.26	0.015	0.034
CuCl	0.622	3.11	3.24	0.015	0.057
K2CO3	0.657	3.53	3.7	0.015	0.064
NaCl	0.682	3.33	3.53	0.015	0.076
KCl	0.748	3.52	3.85	0.015	0.110
<b>G - 25% T= 45°C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H2O/g galleta)</b>	<b>W<sub>e</sub> (g H2O/g SS)</b>
LiCl	0.109	2.98	2.99	0.014	0.017
Na2SO4	0.244	3.02	3.05	0.014	0.024
CH3COOK	0.404	3.07	3.12	0.014	0.031
Mg(NO3)2	0.478	3.02	3.09	0.014	0.038
CuCl	0.625	3.1	3.27	0.014	0.070
K2CO3	0.668	3.04	3.25	0.014	0.084
NaCl	0.698	3.05	3.33	0.014	0.107
KCl	0.789	3.01	3.43	0.014	0.155
<b>G - 50% T= 45°C</b>					

<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub> (g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.13	3.45	3.47	0.009	0.015
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.254	3.55	3.59	0.009	0.020
CH <sub>3</sub> COOK	0.443	3.49	3.68	0.009	0.064
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.498	3.57	3.82	0.009	0.079
CuCl	0.646	3.55	4.02	0.009	0.142
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.679	3.45	4.01	0.009	0.172
NaCl	0.69	3.58	4.22	0.009	0.189
KCl	0.756	3.5	4.45	0.009	0.282
<b>G - 75% T= 45°C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub> (g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.109	4.53	4.53	0.006	0.006
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.269	3.53	3.56	0.006	0.014
CH <sub>3</sub> COOK	0.442	3.5	3.57	0.006	0.026
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.485	3.52	3.61	0.006	0.031
CuCl	0.688	3.56	3.79	0.006	0.071
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.677	3.54	3.71	0.006	0.054
NaCl	0.636	4.34	4.54	0.006	0.052
KCl	0.763	4.33	4.76	0.006	0.105
<b>G - 100% T= 45°C</b>					
<b>Sal</b>	<b>a<sub>w</sub></b>	<b>m<sub>o</sub> (g)</b>	<b>m<sub>f</sub> (g)</b>	<b>Xw<sub>i</sub> (g H<sub>2</sub>O/g galleta)</b>	<b>w<sub>e</sub> (g H<sub>2</sub>O/g SS)</b>
LiCl	0.109	4.45	4.45	0.028	0.028
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.278	4.53	4.53	0.028	0.028
CH <sub>3</sub> COOK	0.469	4.5	4.65	0.028	0.063
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	0.499	4.7	4.92	0.028	0.077
CuCl	0.698	5.43	6.15	0.028	0.165
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	0.658	4.88	5.43	0.028	0.144
NaCl	0.682	4.77	5.34	0.028	0.151
KCl	0.779	4.63	5.4	0.028	0.199

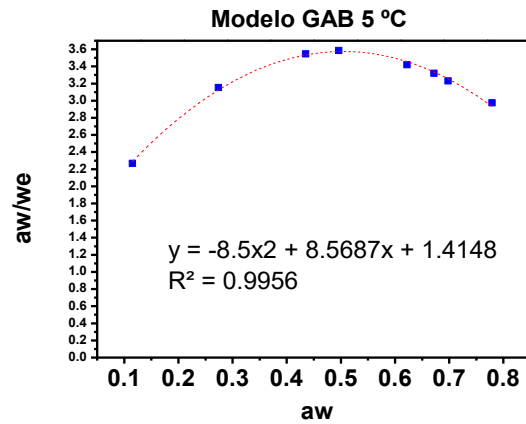
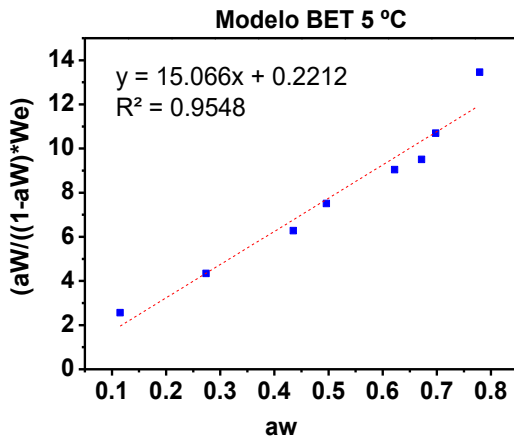
## Anexo 3

Ajustes obtenidos para las diferentes galletas a la temperatura de (5,30 y 45 °C)

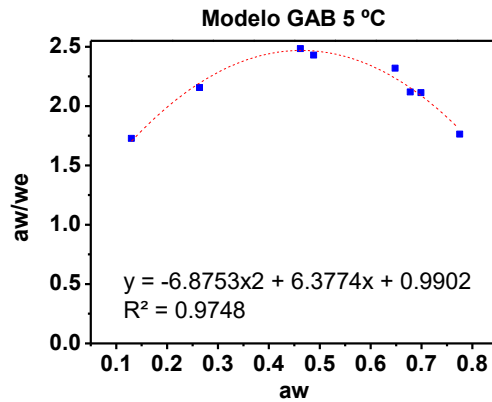
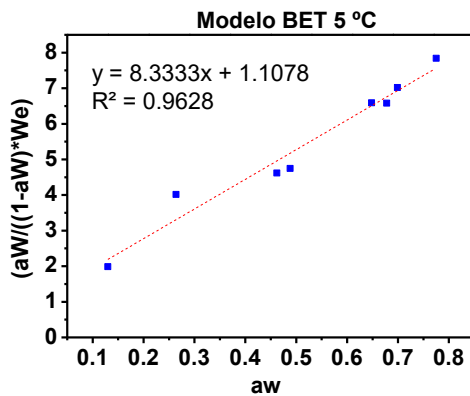
### G - 0%



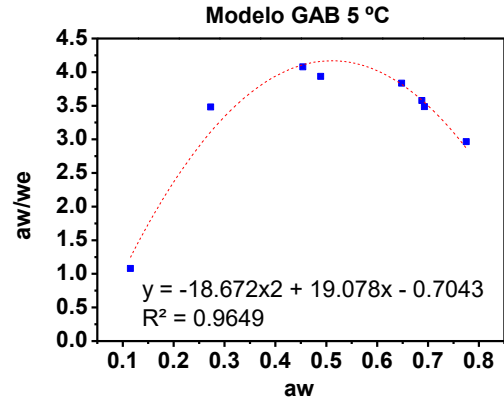
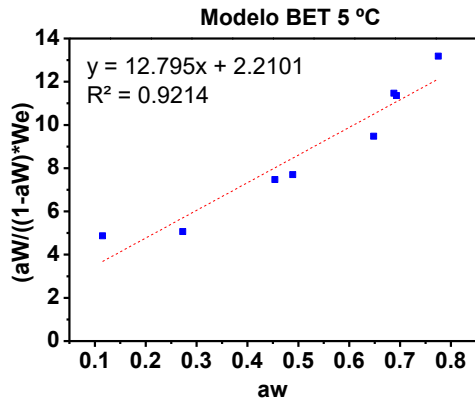
### G - 25%



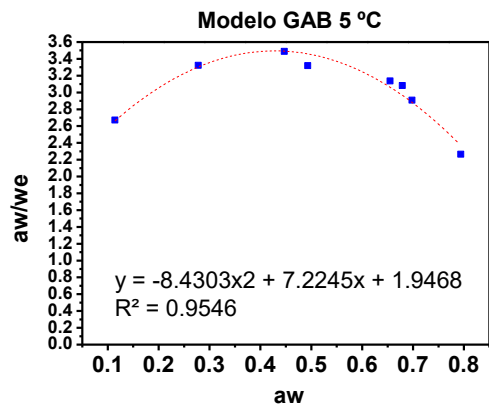
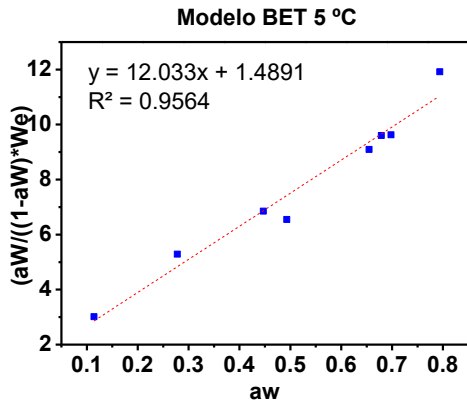
### G - 50%



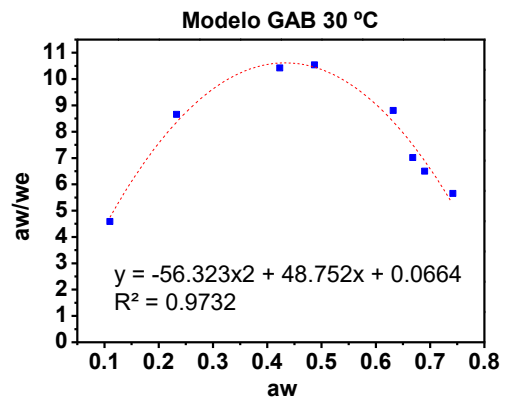
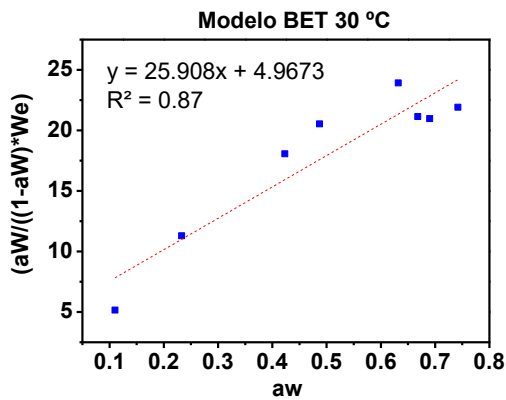
**G - 75%**



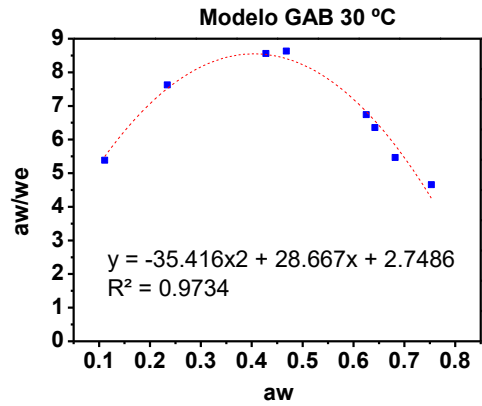
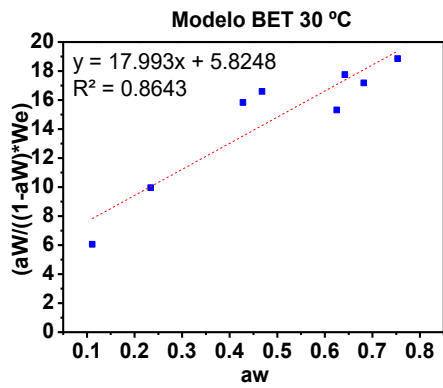
**G - 100%**



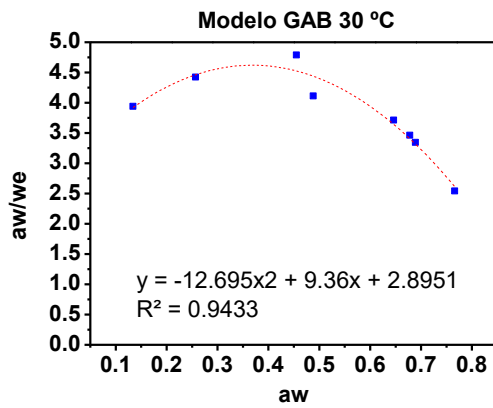
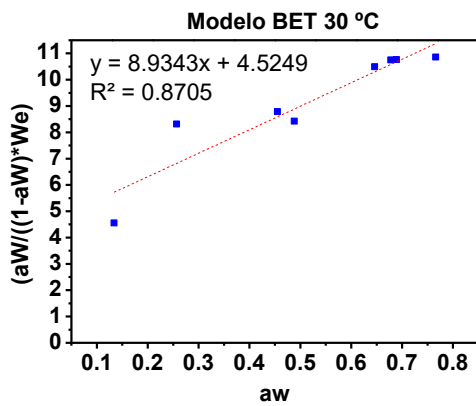
**G - 0%**



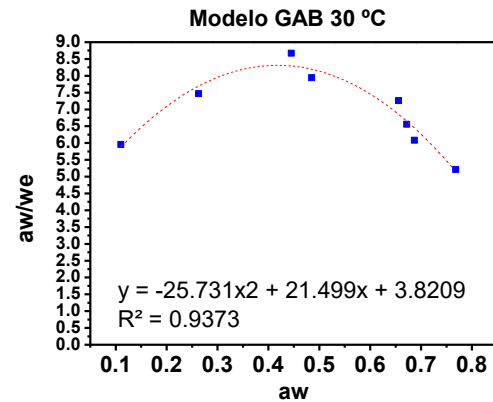
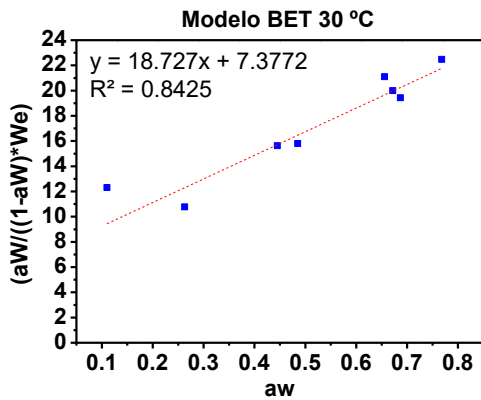
**G - 25%**



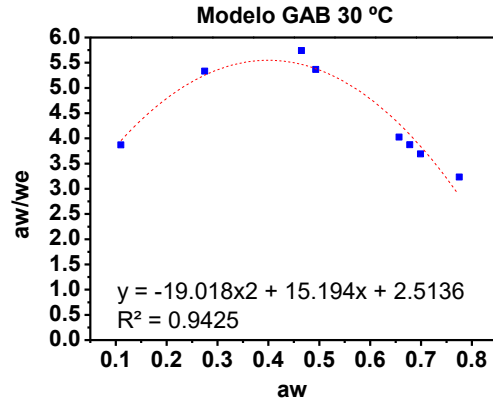
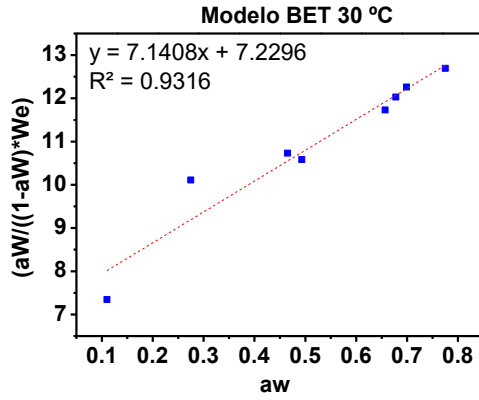
**G - 50%**



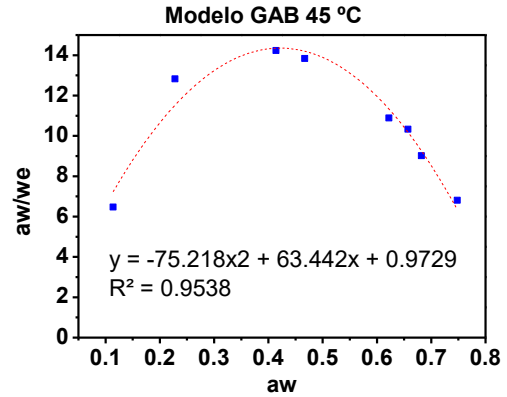
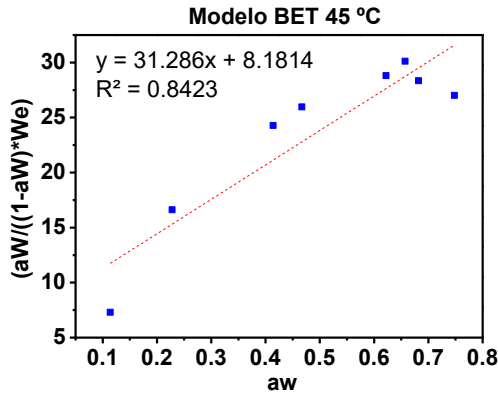
**G - 75%**



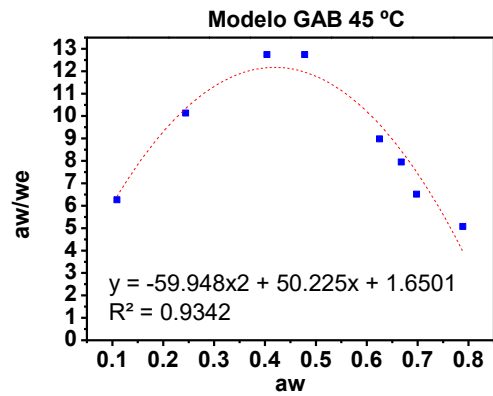
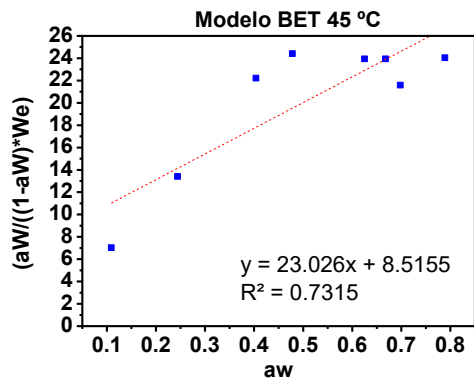
### G - 100%



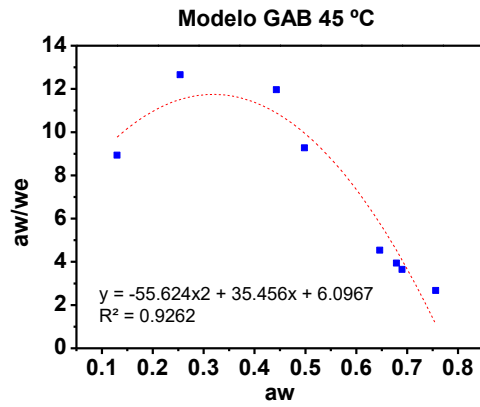
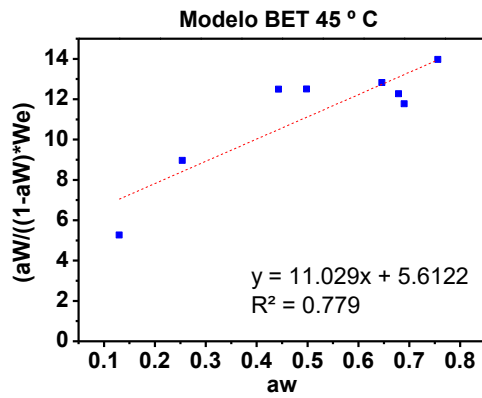
### G - 0%



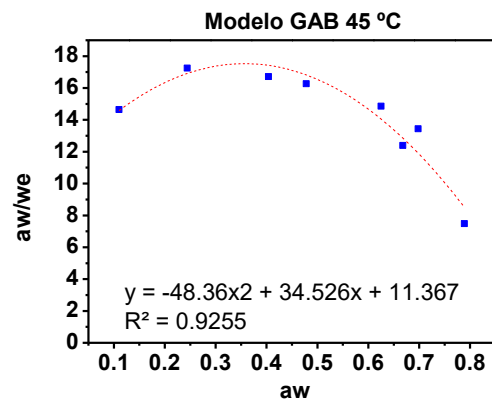
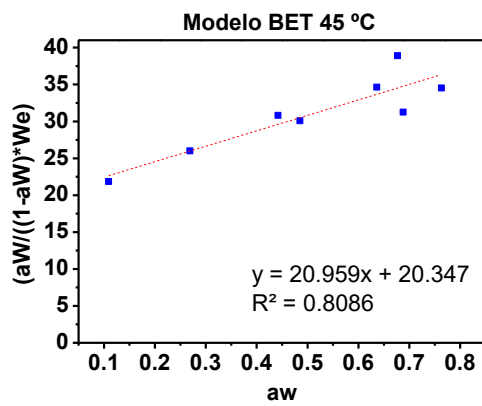
### G - 25%



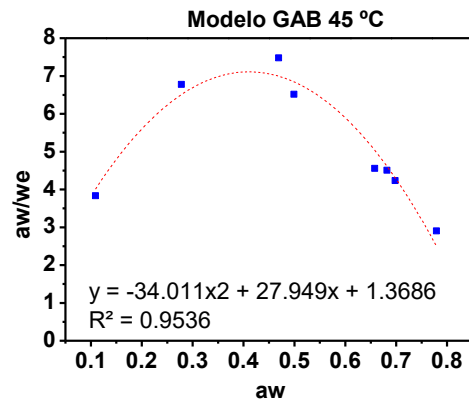
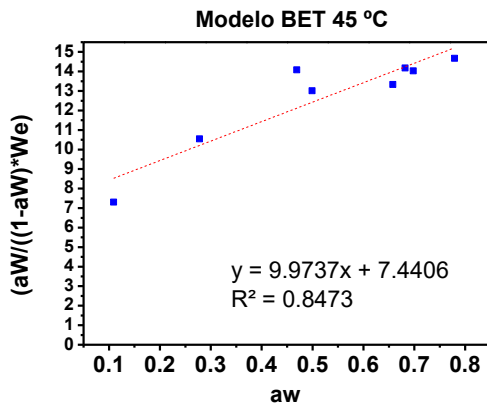
**G - 50%**



**G - 75%**

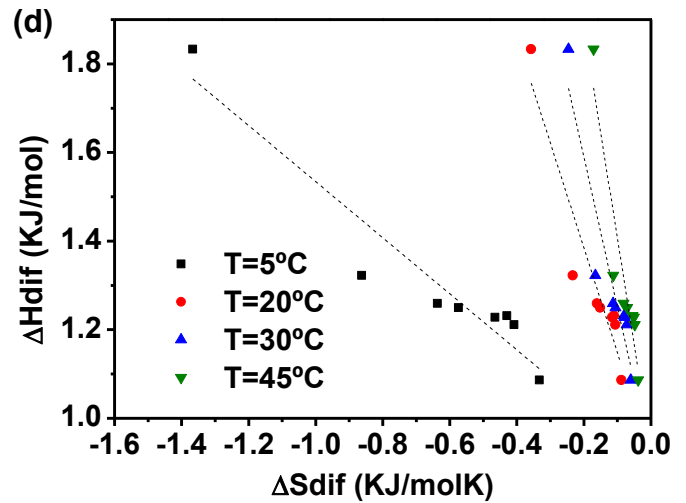
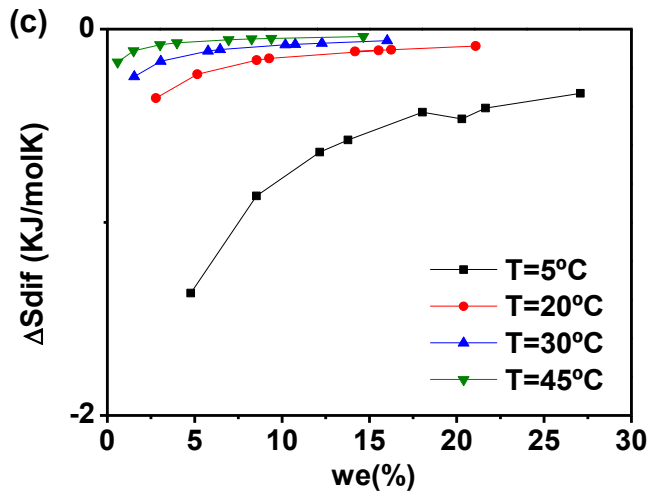
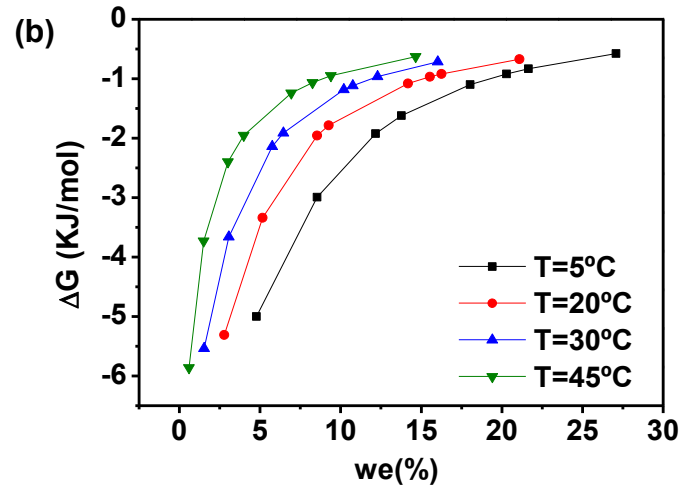
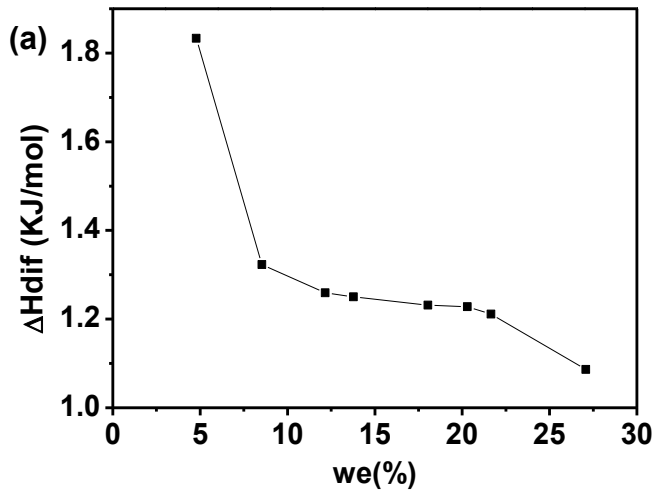


**G - 100%**

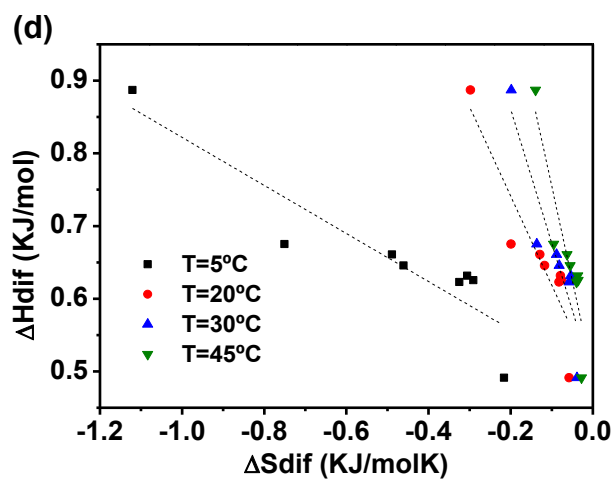
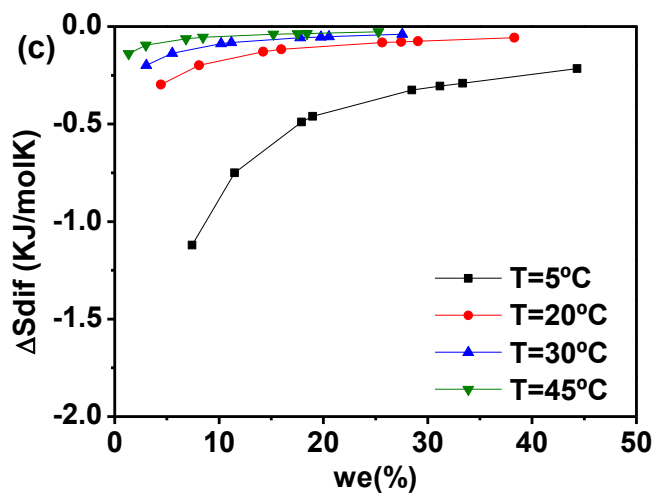
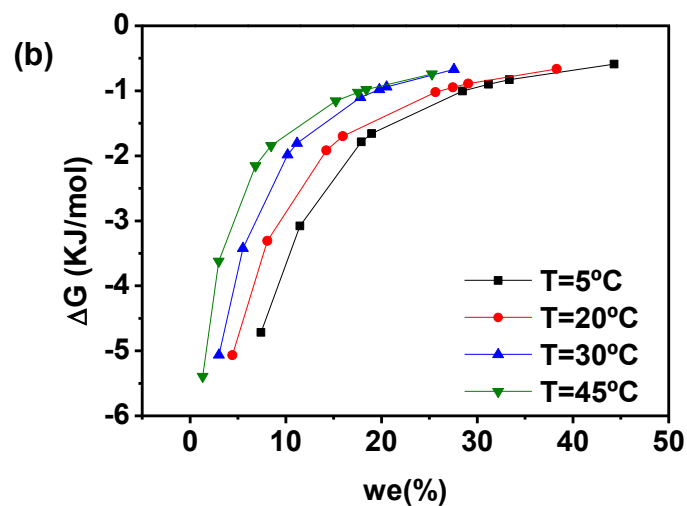
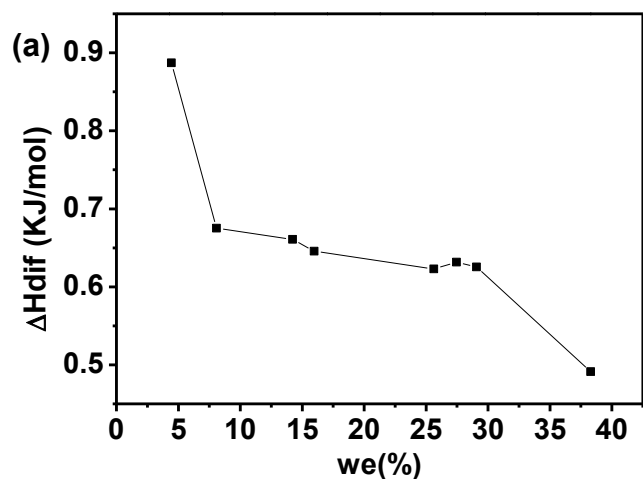


## Anexo 4

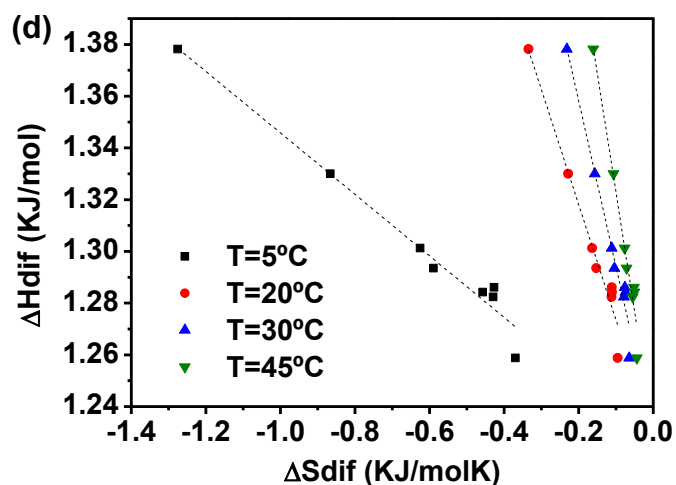
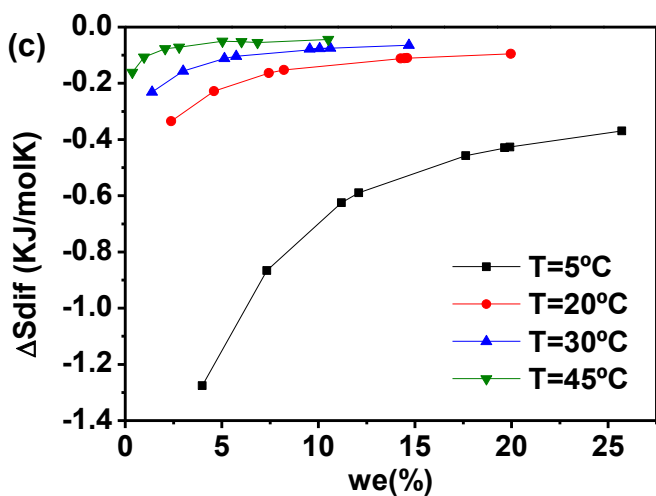
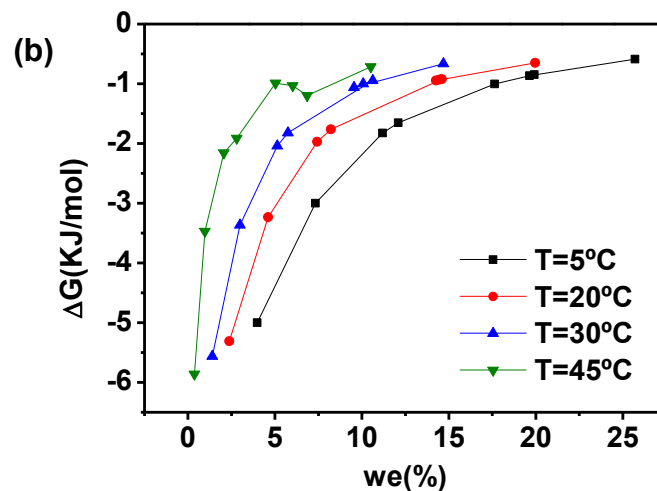
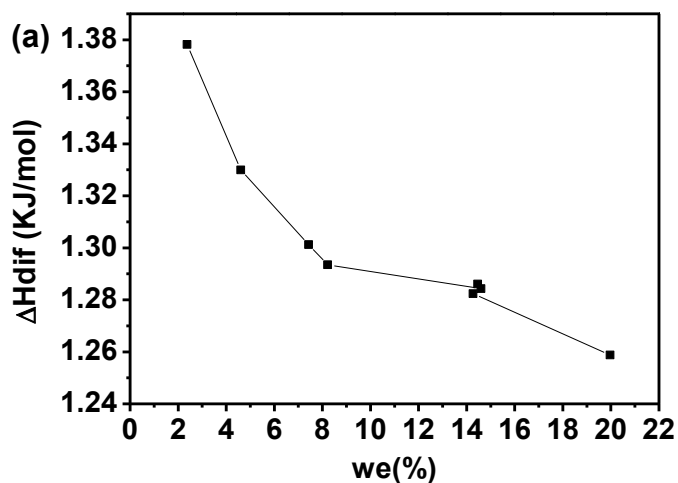
Para la galleta (G – 25%). (a) Entalpia diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d) Teoría de compensación a diferentes temperaturas.



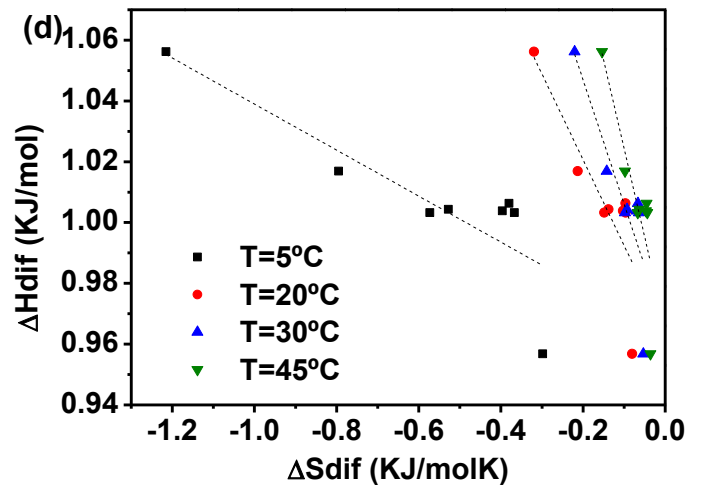
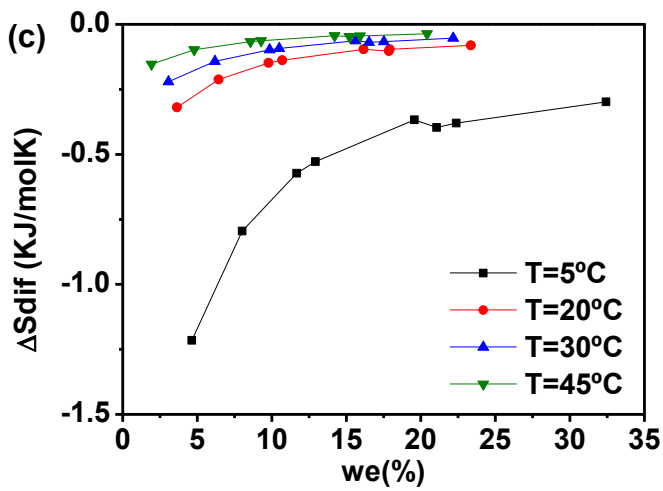
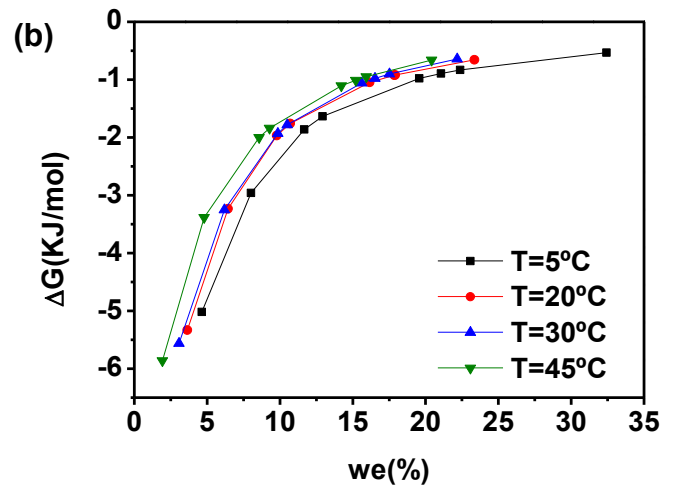
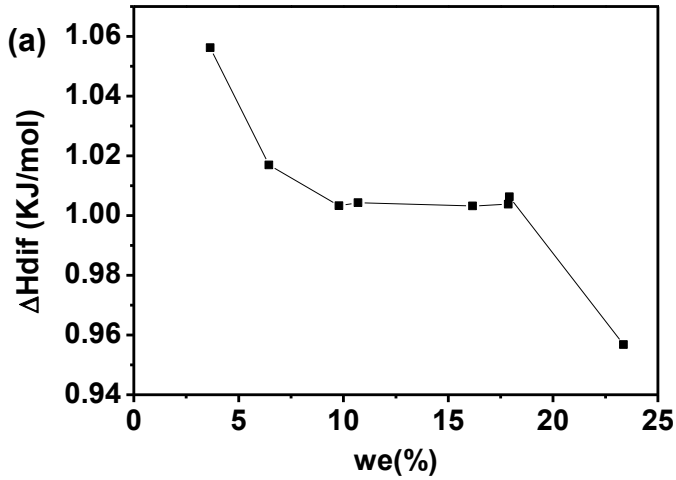
Para la galleta (G – 50%). (a) Entalpia diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d) Teoría de compensación a diferentes temperaturas



Para la galleta (G – 75%). (a) Entalpia diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d) Teoría de compensación a diferentes temperaturas

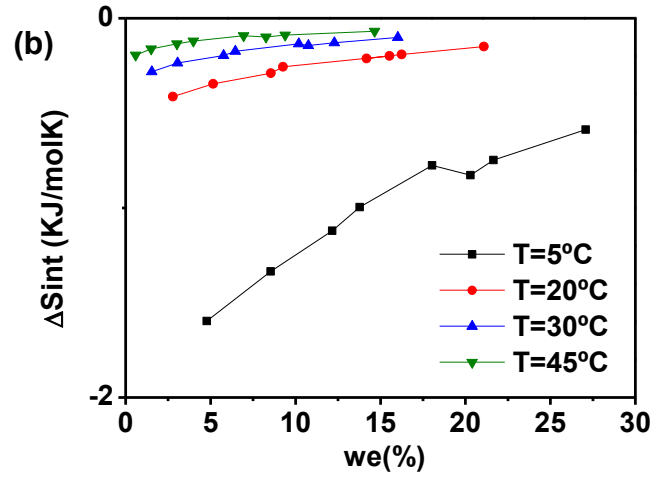
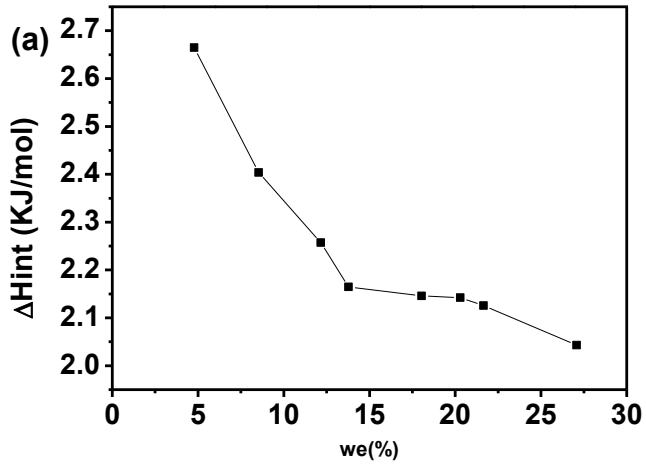


Para la galleta (G – 100%). (a) Entalpia diferencial de la sorción de agua, (b) Energía libre de Gibbs, (c) Entropía diferencial de la sorción de agua y (d) Teoría de compensación a diferentes temperaturas

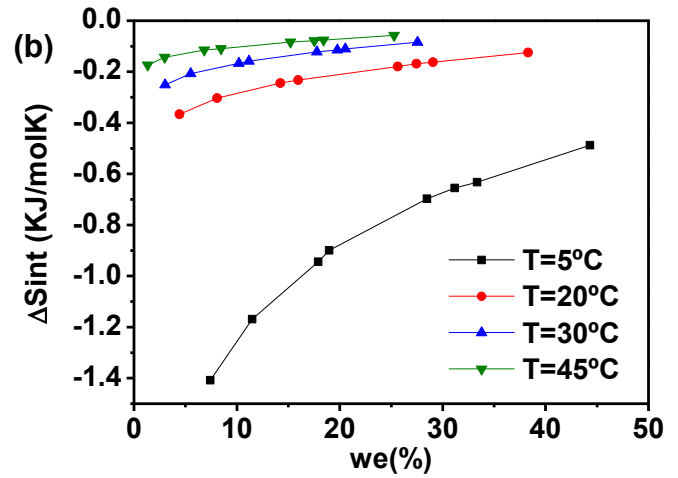
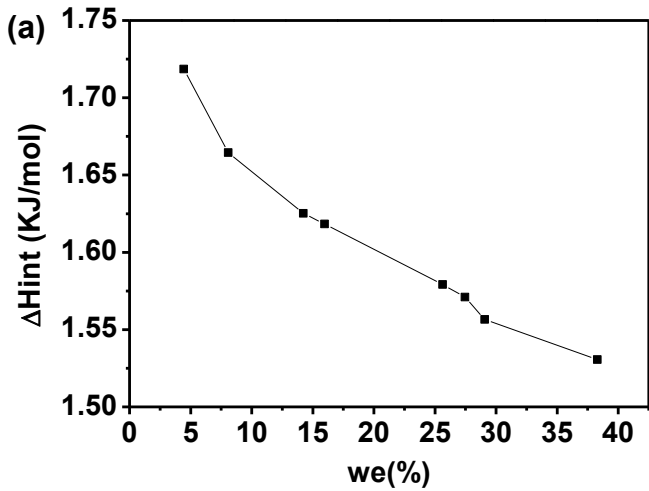


## Anexo 5

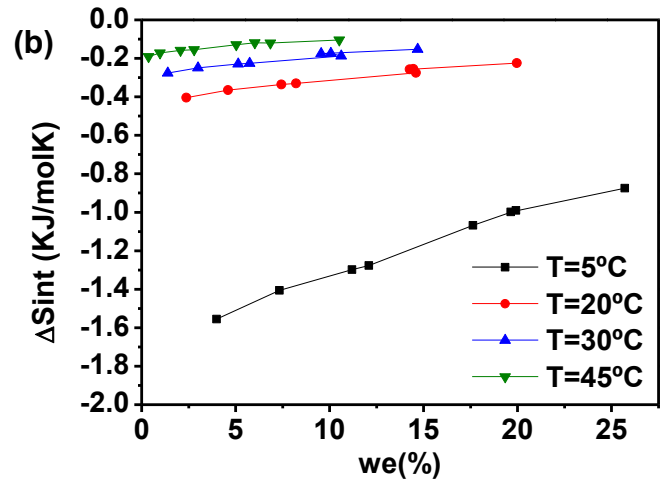
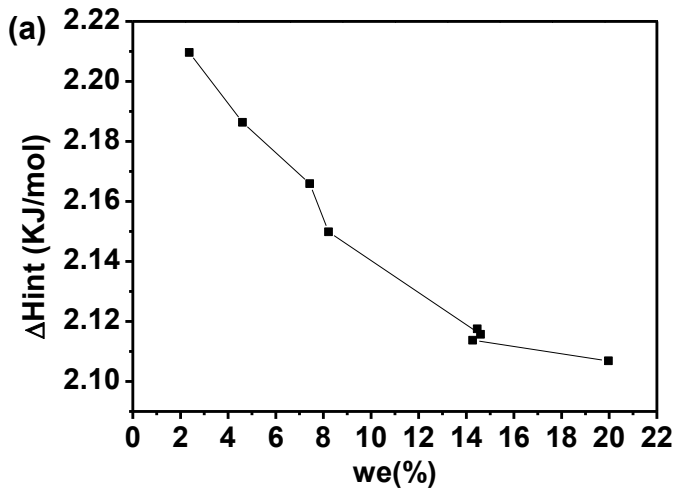
Para la galleta (G – 25%). (a) Entalpia integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua



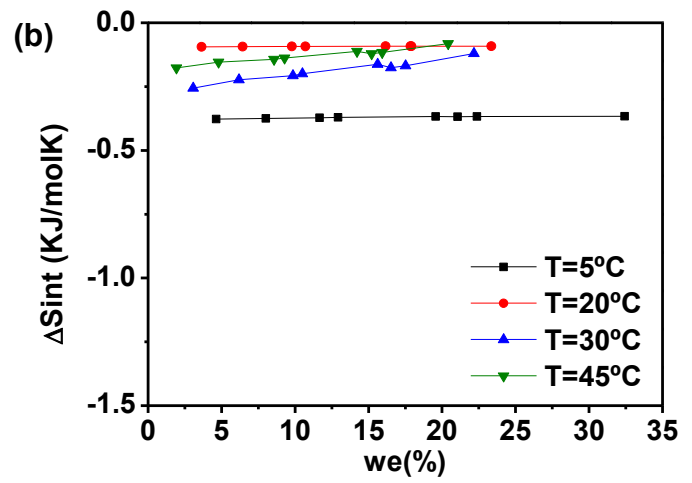
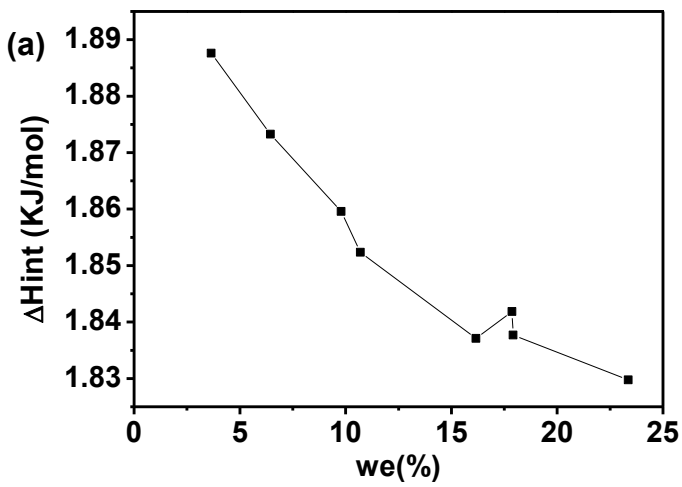
Para la galleta (G – 50%). (a) Entalpia integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua



Para la galleta (G – 75%). (a) Entalpia integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua



Para la galleta (G – 100%). (a) Entalpia integral de la sorción de agua, (b) Entropía integral de la sorción de agua





Casa abierta al tiempo

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

# ACTA DE EXAMEN DE GRADO

No. 00162

Matrícula: 2231801524

Estructuración de un emulgel aceite - en - agua (O/W), estabilizado por mezclas proteína de chicharo - inulina de achicoria con propiedades tecnofuncionales como sustituto de grasa saturada.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 13:00 horas del día 26 del mes de febrero del año 2025 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. JOSE DE JESUS ALVAREZ RAMIREZ  
DR. ALFONSO TOTOSAUS SANCHEZ  
DR. FRANCISCO CRUZ SOSA

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretario el último, se reunieron para proceder al Examen de Grado cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)

DE: DUVIEL BERMUDEZ PEREZ

y de acuerdo con el artículo 78 fracción III del Reglamento de Estudios Superiores de la Universidad Autónoma Metropolitana, los miembros del jurado resolvieron:

**A PROBAR**

Acto continuo, el presidente del jurado comunicó al interesado el resultado de la evaluación y, en caso aprobatorio, le fue tomada la protesta.



DUVIEL BERMUDEZ PEREZ  
ALUMNO

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ  
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBI

  
DR. ROMAN LINARES ROMERO

PRESIDENTE

  
DR. JOSE DE JESUS ALVAREZ RAMIREZ

VOCAL

  
DR. ALFONSO TOTOSAUS SANCHEZ

SECRETARIO

  
DR. FRANCISCO CRUZ SOSA