UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD IZTAPALAPA

DIVISIÓN DE CIENCIAS BIOLÓGICAS Y DE LA SALUD

POSGRADO EN BIOTECNOLOGÍA

"EVALUACION DE LA ADICION DE UN EMULGEL ESTABILIZADO CON COMPLEJOS COACERVADOS, COMO AGENTE DE TEXTURA EN YOGUR TIPO GRIEGO"

T E S I S

para obtener el grado de Doctor en Biotecnología

P R E S E N T A

M. C. Anthony Martín Ortiz Deleón
2203802299
anthonymartin05@hotmail.com

Dirección

Dra. Angélica Román Guerrero

Asesores:

Dra. Ofelia Sandoval Castilla

Dr. Juan Carlos Cuevas Bernardino

Jurado

Presidente: Dr. Francisco Cruz Sosa

Secretaria: Dra. María Aurora Pintor Jardines

Vocal: Dra. Edith Ponce Alquicira

Vocal: Dra. Ofelia Sandoval Castilla

Iztapalapa, Ciudad de México 16 de diciembre de 2024.

El Doctorado en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana está incluido en el Programa Nacional de Posgrados de Calidad (PNPC) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT), con la referencia 001466.

Ciudad de México, a 16 de diciembre de 2024.

El jurado designado por la División de Ciencias Biológicas y de la Salud de la Unidad Iztapalapa aprobó la tesis:

"EVALUACION DE LA ADICION DE UN EMULGEL ESTABILIZADO CON COMPLEJOS COACERVADOS, COMO AGENTE DE TEXTURA EN YOGUR TIPO GRIEGO"

Que presentó

Anthony Martín Ortiz Deleón

Comité tutorial:

Directora:	Dra. Angélica Román Guerrero	_____
Asesor:	Dr. Juan Carlos Cuevas Bernardino	_____
Asesor:	Dra. Ofelia Sandoval Castilla	_____

Jurado:

Presidente:	Dr. Francisco Cruz Sosa	_____
Secretario:	Dra. Aurora Pintor Jardines	_____
Vocal:	Dra. Edith Ponce Alquicira	_____
Vocal:	Dra. Ofelia Sandoval Castilla	_____

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Angélica Román Guerrero por su confianza y apoyo en estos largos 4 años del Doctorado. Aunque no es mi primer mentor, ya la considero como tal.

A la Dra. Ofelia Sandoval Castilla por apoyo incondicional y asesoría constante durante todo este proceso. Usted representó a dos personas en uno (Dr. César siempre estarás en nuestros pensamientos).

Al Dr. Juan Carlos Cuevas Bernardino por su asesoría para la realización de este proyecto.

Al Dr. Eduardo Jaime Vernon Carter, que aunque tuvimos desacuerdos, su peculiar forma de ser permitió que fuera cada día más profesional.

A mis compañeros (laboratorio W-107), que coincidimos en los días de trabajo y en su momento, nos apoyamos con la única finalidad de mejorar nuestras respectivas investigaciones.

Al Posgrado en Biotecnología de la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa por aceptarme en su Programa de Doctorado.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) por la beca de Doctorado otorgada (919646).

DEDICATORIAS

Hace tiempo les prometí que llegaría el día donde las personas me llamarían Doctor; ese día por fin llegó y me siento honrado de decir que les he cumplido. A ti **Blanca Luz Deleón** y **Martín Ortiz**, mis amados padres, les dedico este logro.

Te lo dedico también a ti **Ruby Ortiz**, mi hermana, por tu apoyo y palabras de aliento. Ahora que llegará a nuestras vidas la pequeña Dalia Paulette, sientas lo que yo al tenerte en mi vida.

A mi esposa **Carolina Estudillo Márquez**. Día y noche estuviste a mi lado, tanto en el laboratorio como en nuestro hogar, aguantando mi mal humor y mi perfeccionismo ilógico para realizar nuestras actividades. A pesar de todo ello has sido extremadamente paciente y nunca me has dejado solo, siempre me motivaste a ser mejor. Por eso y mucho más no me cansaré de decir que eres y serás el amor de mi vida. Gracias.

A **Lucas Daniel**, mi hijo, porque mis días de felicidad son más intensas desde que llegaste a nuestras vidas. No puedo prometer que estaré toda la vida para ti, pero te aseguro que cada día haré lo mejor posible para educarte y darte el amor que tu mereces. Cuando puedas leer esto recuerda que… “yo nací el día en que te conocí”. Te amo.

Te dedico a ti **Dr. César Ramírez Santiago**, este logro, porque fuiste tú quien insistió en irme hacer el doctorado a la UAM-I. Hoy sé que tus enseñanzas valieron la pena. Descansa en paz.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras v

Índice de tablas viii

Resumen 2

Abstract 4

1. **Introducción** 6

2. **Antecedentes** 9

2.1. Yogur 9

2.2. Yogur tipo Griego 10

2.3. Sustitutos de grasa 11

2.4. Biopolímeros con propiedades funcionales 12

2.4.1. Polisacáridos 12

2.4.2. Proteínas 14

2.5. Coacervados 15

2.6. Emulgeles 16

2.7. Investigaciones sobre la estabilización de emulsiones o emulgeles con complejos coacervados 20

2.8. Investigaciones sobre la aplicación de sustitutos en yogur 21

3. **Justificación** 23

4. **Objetivos** 25

4.1. Objetivo general 25

4.2. Objetivos particulares 25

5. **Hipótesis** 26

6. **Materiales y métodos** 27

6.1. Materiales 27

6.2. Preacondicionamiento de WPI 27

6.3. Condiciones para la formación de complejos coacervados 28

6.4. Espectroscopia FTIR 29

6.5. Tensión interfacial 29

6.6. Propiedades viscoelásticas 30

6.7. Preparación de emulgeles O/W 30

6.8. Caracterización de emulgeles 31

6.9. Propiedades texturales 31

6.10. Estabilidad física 32

6.11. Propiedades reológicas de emulgeles 32

6.12. Formulación de yogur tipo Griego 32

6.13. Análisis químico proximal y sinéresis 33

6.14. Microestructura (SEM) 34

6.15. Análisis del perfil de textura (TPA) 34

6.16. Reología 34

6.17. Evaluación sensorial 35

6.18. Análisis estadístico 36

7. **Resultados y discusión** 37

7.1. FTIR para WPI preacondicionado 37

7.2. Formación y caracterización de coacervados del complejo WPI-*AI* 39

7.3. Formación y caracterización de emulgeles O/W 46

7.4. Propiedades texturales de emulgeles 49

7.5. Propiedades reológicas de emulgeles 50

7.6. Estabilidad física de emulgeles 53

7.7. Composición proximal de muestras de yogur 55

7.8. Microestructura de muestras de yogur 56

7.9. Análisis textural de muestras de yogur 58

7.10. Comportamiento reológico de muestras de yogur 59

7.11. Características sensoriales de muestras de yogur 61

8. **Conclusiones** 64

9. **Referencias** 66

Anexos 88

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de coacervación compleja. 16

Figura 2. Ilustración referente a las alternativas para formación de emulgeles. 18

Figura 3. Espectros FTIR para WPI preacondicionados con a) temperatura y b) tratamiento con ultrasonido, c) estructura secundaria de WPI estimada a partir de la deconvolución de los espectros de amida I después de los procesos de preacondicionamiento (abundancia basada en el área relativa del pico, %). 38

Figura 4. Perfiles de potencial zeta en función del pH para la mezcla de polisacáridos AI y WPI sin tratar (Control) y tratada con T (a) y US (b) como procesos de preacondicionamiento. 40

Figura 5. Efecto del proceso de preacondicionamiento de WPI y relación WPI-AI en a) sobre el rendimiento porcentual de coacervación (R_{CCT}), y b) turbidez de la fase sobrenadante de CCT a pH_{CC} 3.0. 41

Figura 6. Perfil de tensión interfacial de WPI preacondicionada (T o US, a-b) y sus CCT (c-d). 44

Figura 7. Espectros FTIR de CCT formados con WPI sin tratar (Control), a) con preacondicionamiento de WPI con temperatura (T) o b) ultrasonido (US). 45

Figura 8. Propiedades viscoelásticas de CCT formados con WPI sin tratar (Control), a) con preacondicionamiento de WPI con temperatura (T) o b) ultrasonido (US). G´ (símbolos rellenos) y G´´ (símbolos vacíos). 46

Figura 9. Morfología de los emulgeles EC, ET, EUS empleando (ϕ=0.20, 0.30 y 0.50) obtenidas por microscopía óptica (100×). 48

Figura 10. Comportamiento de flujo (superior), módulos viscoelásticos G´ y G´´ (medio) y estabilidad viscoelástica frente a la temperatura (inferior) para emulgeles estabilizados con

CCT formados con WPI preacondicionado. G´ (símobolos rellenos) y G´´ (símbolos vacíos). 52

Figura 11. Perfiles de transmisión de emulgeles O/W estabilizados con CCT y WPI_{US} a ϕ=0.50. 54

Figura 12. Imágenes SEM de muestras de yogur tipo Griego utilizando distintas concentraciones de emulgel. 57

Figura 13. Características reológicas de yogur tipo Griego a diferentes concentraciones de emulgel. 60

Figura 14. Análisis sensorial de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel en diferentes concentraciones. 62

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especificaciones fisicoquímicas en yogur. 9

Tabla 2. Especificaciones fisicoquímicas en yogur tipo Griego. 10

Tabla 3. Propiedades texturales y estabilidad de formación de crema de emulgels EC, ET y EUS con diferentes fracciones de fase dispersa. 49

Tabla 4. Composición química proximal del yogur tipo Griego bajo en grasa con incorporación de emulgel a diferentes concentraciones. 56

Tabla 5. Parámetros texturales del yogur tipo Griego bajo en grasa con incorporación de emulgel a diferentes concentraciones. 59

Tabla 6. Parámetros reológicos de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel en diferentes concentraciones. 61

Tabla 7. Parámetros sensoriales de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel a distintas concentraciones. 62

Resumen

Las actuales tendencias en la industria alimentaria, así como la creciente popularidad en el consumo de productos lácteos reducidos en grasas, especialmente en yogur, ha generado la búsqueda de alternativas alimenticias para cubrir las necesidades de los consumidores. Aunado a ello, el diseño de sustitutos de grasa a partir de biopolímeros naturales, puede representar una tecnología innovadora para desarrollar alimentos nutracéuticos saludables con características fisicoquímicas, texturales y sensoriales mejoradas. En este sentido, en este trabajo se emplearon dispersiones acuosas de aislado de proteína de lactosuero (WPI) preacondicionadas mediante la aplicación de un procesamiento térmico (calentamiento a 90 °C) o ultrasonido (80% de amplitud), considerando el efecto del tiempo de exposición (15, 20, 25 min). Los resultados mostraron que ambos procesos de preacondicionamiento modificaron las estructuras secundarias e influyeron en el potencial zeta de las proteínas de suero; además, exhibieron propiedades viscoelásticas y capacidad de estructuración mayores en función del tiempo de exposición al procesamiento térmico o ultrasonido para la formación de complejos coacervados. Posteriormente, se formaron complejos coacervados ternarios (CCT) a partir de WPI preacondicionado y una mezcla de alginato-inulina de agave (AI) y se establecieron las condiciones de formación de dichos complejos (WPI-AI) a distintas relaciones másicas (0.5:1, 1:1, 2:1). La formación de CCT fue a pH 3.0. Se obtuvieron rendimientos de coacervación >90% y características reológicas mejoradas en CCT en relación 1:1, donde el preacondicionamiento de temperatura favoreció la resistencia y la estructura del sistema tipo gel. Se formularon emulgeles aceite en agua (O/W) utilizando aceite de canola como fase dispersa a distintas concentraciones (ϕ= 0.2, 0.3 y 0.5) y CCT como fase continua. Los emulgeles presentaron altas eficiencias

de encapsulación (95-99%), módulos viscoelásticos y propiedades texturales favorecidos, así como estructuras homogéneas y estables. Se encontró que la aplicación de temperatura o ultrasonido, respectivamente, tuvo un efecto significativo en la estructura de WPI para la creación de CCT, beneficiando finalmente las propiedades fisicoquímicas de emulgeles O/W.

La última etapa de la presente investigación, consistió en utilizar emulgel O/W a partir de CCT y aceite de canola como sustituto de grasa, a distintas concentraciones (5, 10 y 15 %, p/p) en yogur tipo Griego. También, se prepararon un yogur tipo Griego completo en grasa (FFGSY) y uno reducido en grasa (RFGSY) como controles. A los distintos tratamientos, se les evaluó la composición química, el arreglo microestructural, la textura, el comportamiento reológico y el perfil sensorial. Se obtuvieron yogures más ácidos, con mayor contenido de proteína (35.30-39.64%) y un componente graso regulado desde 68.50% hasta 82.33% en comparación a un yogur completo en grasa, por efecto de la adición de emulgel O/W. También, la textura y las propiedades viscoelásticas se vieron modificadas al mostrar yogures menos duros y viscosos, con buenas interacciones entre la matriz de caseínas y la estructura del emulgel, reflejándose además en una mejora en la cremosidad y mayor aceptabilidad del producto. El uso de emulgeles O/W permitió generar un yogur tipo Griego con un balance nutricio adecuado y mejorado, brindando una alternativa para la formulación de alimentos funcionales y saludables.

Abstract

Current trends in the food industry, as well as the growing popularity of reduced-fat dairy products, especially yogurt, have generated a search for food alternatives to meet consumer needs. In addition, the design of fat substitutes from natural biopolymers can represent an innovative technology to develop healthy nutraceutical foods with improved physicochemical, textural and sensory characteristics. In this sense, in this work, aqueous dispersions of whey protein isolate (WPI) preconditioned by applying thermal processing (heating to 90 °C) or ultrasound (80% amplitude) were used, considering the effect of exposure time (15, 20, 25 min). The results showed that both preconditioning processes modified the secondary structures and influenced the zeta potential of whey proteins; in addition, they exhibited greater viscoelastic properties and structuring capacity as a function of the exposure time to thermal processing or ultrasound for the formation of coacervate complexes. Subsequently, ternary coacervate complexes (CCT) were formed from preconditioned WPI and a mixture of agave alginate-inulin (AI) and the formation conditions of said complexes (WPI-AI) were established at different mass ratios (0.5:1, 1:1, 2:1). CCT formation was at pH 3.0. Coacervation yields >90% and improved rheological characteristics were obtained in CCT in 1:1 ratio, where temperature preconditioning favored the strength and structure of the gel-like system. Oil-in-water (O/W) emulgels were formulated using canola oil as the dispersed phase at different concentrations (ϕ= 0.2, 0.3 and 0.5) and CCT as the continuous phase. The emulgels presented high encapsulation efficiencies (95-99%), favored viscoelastic moduli and textural properties, as well as homogeneous and stable structures. It was found that the application of temperature or

ultrasound, respectively, had a significant effect on the WPI structure for the creation of CCT, ultimately benefiting the physicochemical properties of O/W emulgels.

The last stage of this research consisted of using O/W emulgel from CCT and canola oil as a fat replacer, at different concentrations (5, 10 and 15%, w/w) in Greek-type yogurt. Also, a full-fat (FFGSY) and a reduced-fat (RFGSY) Greek-type yogurt were prepared as controls. The chemical composition, microstructural arrangement, texture, rheological behavior and sensory profile of the different treatments were evaluated. More acidic yogurts were obtained, with higher protein content (35.30-39.64%) and a fat component regulated from 68.50% to 82.33% compared to a FFGSY, due to the addition of O/W emulgel. The texture and viscoelastic properties were also modified, resulting in less hard and viscous yogurts, with good interactions between the casein matrix and the emulgel structure, also reflected in an improvement in the creaminess and greater acceptability of the product. The use of O/W emulgels made it possible to generate a Greek-type yogurt with an adequate and improved nutritional balance, providing an alternative for the formulation of functional and healthy foods.

1. Introducción

Los productos como el yogur han sido de gran importancia económica para la industria láctea a nivel mundial, por lo que constantemente se lanzan nuevas variedades y conceptos de yogur (Jorgensen et al., 2015). A nivel nacional, la fabricación de productos lácteos constituye el tercer lugar en el PIB de la industria alimentaria, con una aportación del 11.6 % del total del sector, donde los derivados lácteos como el queso, crema, y yogur, representaron el 38.8 % del total de la elaboración de productos lácteos (CANILEC, 2019).

De la gran variedad de productos lácteos disponibles en el mercado, el yogur se ha destacado como el alimento lácteo fermentado con mayor preferencia en la población en general, debido a la versatilidad con la que se pueden obtener distintas texturas y sabores, además de sus atributos nutricionales relacionados con sus contenidos de grasa y proteína, calcio y vitaminas, contribuyendo a compensar las necesidades de salud y bienestar de los consumidores. Recientemente, se ha observado un incremento en el consumo de los productos lácteos "concentrados", como el yogur Griego o el *quark*, los cuales son más espesos que un yogur estándar, representando una de las áreas con mayor crecimiento y aceptación a nivel mundial (Shahein et al., 2022; Matos et al., 2021; Vénica et al., 2019; Tetrapack, 2019).

El yogur concentrado o tipo Griego se obtiene por la fermentación de la leche por acción de las bacterias ácido lácticas (BAL) *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*. Posteriormente, el producto es concentrado para incrementar el contenido de proteína a un mínimo de 5.6 % y 0.6 % acidez (Codex Alimentarius, 2022),

conteniendo entre 6-10 % de grasa, cuando en un yogur convencional el contenido oscila normalmente entre 0.5-3.5 % (Jorgensen et al., 2019). Estos productos concentrados se elaboran mediante colado, es decir, se elimina el exceso de suero acuoso, separando la cuajada del yogur fermentado (Kim et al., 2023).

A pesar de los beneficios que representa el consumo de alimentos ricos en proteína sobre la salud, la reducción del contenido de grasa y el incremento de fibra en los alimentos permanece como una demanda creciente en los consumidores. En este sentido, el uso de agentes estabilizantes como las proteínas y/o polisacáridos, ha permitido reducir el contenido de grasa, y desarrollar propiedades de textura semejantes a los productos completos en grasa (Graf et al., 2019; Cheng et al., 2017), debido su influencia sobre la formación del gel que conforma el yogur y sobre las propiedades físicas y sensoriales del alimento.

Se han reportado diversos trabajos donde se propone el uso de emulsiones geladas como sistemas de suministro de compuestos específicos (como ácidos grasos monoinsaturados y poliinsaturados, fibra y minerales) con la finalidad de reducir el contenido de lípidos en productos alimenticios (Paglarini et al., 2019). Por lo tanto, los emulgeles son sistemas potenciales, ya que no sólo permiten que sean utilizados como sustitutos o reemplazos de grasa, sino que además permiten desarrollar ciertas propiedades de textura. Las emulsiones geladas, o emulgeles, se definen como sistemas de emulsión estructurados, los cuales presentan una fase dispersa, regularmente aceite, atrapadas dentro de una red tridimensional (Farjami & Madadlou, 2019), la cual puede formarse a partir de proteínas individuales o en

combinación con otras proteínas o polisacáridos, permitiendo lograr mayor control sobre la forma y estructura resultante del gel (Gao & Wu, 2019).

En este sentido, los emulgeles pueden proveer ciertas propiedades al momento de su aplicación, tales como el mejoramiento de la textura o el control de la velocidad de entrega de componentes activos, entre otros; por lo tanto, el diseño adecuado de emulgeles, pueden llegar a favorecer las características sensoriales y/o funcionales deseadas en un alimento (Bruno et al., 2022).

Debido a lo anterior, el presente trabajo se realizó con la finalidad de establecer las condiciones de formación de emulgeles estabilizados con complejos coacervados, que permitan reducir el contenido de grasa y proveer propiedades texturales y estructurales a un yogur concentrado como el yogur tipo Griego.

2. Antecedentes

2.1. Yogur

De acuerdo a la NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018 el yogur es "el producto obtenido de la fermentación de leche, estandarizada o no, por medio de la acción de microorganismos *Streptococcus thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* subespecie *bulgaricus*, y teniendo como resultado la reducción del pH". Así mismo, este producto posee características fisicoquímicas las cuales se plasman en la misma norma mexicana (Tabla 1).

Tabla 1. Especificaciones fisicoquímicas en yogur

Parámetro	Contenido
Proteína (%, m/m)	Mínimo 3.1 %
Grasa butírica (%, m/m)	Máximo 7.0 %
Acidez titulable (%, m/m)	Mínimo 0.5 %
Sólidos lácteos no grasos	Mínimo 8.25 %

Fuente: NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018.

No obstante, en la actualidad, se pueden encontrar una gama de yogures, los cuales pueden estar diferenciados, principalmente, por su composición, su sabor o por componentes adicionales (vitaminas o minerales); o bien, aquellos yogures a los que son considerados como "light", al estar reducidos en algún componente natural de la leche, los principales, la grasa láctea y la lactosa.

2.2. Yogur tipo Griego

El yogur tipo Griego se define como una leche fermentada semisólida, obtenido a partir de la separación del suero del yogur batido o de la añadidura de complementos lácteos para ajustar sus sólidos (Stefos et al., 2024), posee un cuerpo liso y suave, de color blanquecino con un sabor ligeramente ácido y poca sinéresis (suero en la superficie del gel); puede ser llamado de distintas maneras: concentrado, tenso, Labneh, Skyr, entre otros (Codex Alimentarius, 2022). En la actualidad, el yogur tipo Griego se encuentra como uno de los sectores de mayor crecimiento en la industria láctea (Gyawali et al., 2022).

La composición fisicoquímica de este yogur dependerá del país y sus normas regulatorias, además si es reducido en grasa, o también, de la marca que lo comercialice. En la Tabla 2 se pueden observar las características fisicoquímicas que algunos autores reportan para yogur tipo Griego.

Tabla 2. Especificaciones fisicoquímicas en yogur tipo Griego

Parámetro	Contenido
Proteína láctea (%)	6-10.5 %
Grasa butírica (%)	6-10.7%
Lactosa (%)	4-5 %
Sólidos lácteos no grasos	13-19 %
pH	3.7-4.3

Fuente: Pappa et al. 2024.

El yogur Griego convencional es más denso y cremoso que los yogures normales. Por su parte, la eliminación del suero una vez que se ha obtenido el coágulo, es el proceso que caracteriza al yogur Griego. De esta forma se consigue un coágulo mucho más concentrado y un yogur de mayor consistencia y textura cremosa (Dias et al., 2021).

2.3. Sustitutos de grasa

Las grasas como componentes de los alimentos tienen la capacidad de proveer características mecánico-sensoriales como es el aroma, la textura o el sabor; no obstante, su alto consumo se ha relacionado con enfermedades metabólicas no transmisibles. Es importante resaltar que las grasas pueden ser reemplazadas por diversos compuestos, los cuales semejan en diferentes niveles, las características sensoriales de la grasa en el alimento (Godoy et al., 2020).

Los sustitutos de grasa poseen la capacidad de imitar las propiedades físicas y sensoriales de las grasas; existen algunos estudios que muestran la utilización de polisacáridos en productos lácteos principalmente, por mencionar algunos: almidones modificados, inulina, carragenina, carboximetilcelulosa, pectina y gomas (Gomez-Betancur et al., 2022; Sheidaei et al., 2020; Huang et al., 2020; Say et al., 2020). Además, se han investigado las proteínas de la leche, así como diversos sistemas de encapsulación basados en emulsiones y complejos de biopolímeros solubles, como potenciales sustitutos de grasa (Trujillo-Ramirez et al., 2022; Li et al., 2022a).

No obstante, aunque las emulsiones convencionales pueden ser incorporadas en productos lácteos como el yogur Griego, su aplicación puede generar un producto que no

cumpla con las características de textura deseadas en este tipo de producto. De tal forma, se propone utilizar un complejo coacervado para la formación de emulgeles que debido a su estructura de red en forma de gel y sus propiedades mecánicas, son complejos óptimos en el desarrollo de productos alimenticios y brindan mayor estabilidad en comparación a una emulsión convencional.

2.4. Biopolímeros con propiedades funcionales

Los biopolímeros (proteínas y polisacáridos) son ingredientes funcionales esenciales que determinan la textura y la vida útil de la mayoría de los productos alimenticios. Por su parte, las proteínas pueden funcionar como agentes emulsionantes eficaces; y, al ser polielectrolitos, pueden impartir una excelente estabilidad coloidal a la emulsión mediante la combinación de mecanismos electrostáticos y/o estéricos. Asimismo, al procurar una estabilidad a largo plazo, esto se puede mejorar aún más utilizando polisacáridos para controlar propiedades fisicoquímicas específicas (como la reología o microestructura) de la fase continua, retardando la separación de fases.

2.4.1. Polisacáridos

Los polisacáridos son componentes de almacenamiento y/o soporte de energía y actúan como componentes de señalización de las paredes celulares de plantas, hongos, bacterias y algas. Son componentes alimentarios relevantes como fuente de energía, o bien, como moduladores de la textura en los alimentos (Fernandes & Coimbra, 2023). Los polisacáridos se caracterizan por ser altamente disponibles y relativamente económicos. Tanto polisacáridos como proteínas pueden ser modificados (física, química y enzimática) teniendo en cuenta su potencial aplicación (Yi et al., 2020).

Los polisacáridos difieren uno de otro químicamente en términos del tipo, número, secuencia y enlaces de la unidad de repetición dentro de la cadena de polímero. Estas diferencias químicas permiten diferencias en sus propiedades moleculares, como es grado de ramificación, estructura, peso molecular, flexibilidad y carga eléctrica. Sucesivamente, estas diferencias moleculares permiten diferencias en las propiedades funcionales, como es solubilidad, espesante, gelación, capacidad de ligar agua, actividad superficial, emulsificación y digestibilidad (Xie et al., 2021; Yan & Zhang, 2014).

La inulina, es una fibra dietética soluble, la cual está presente en más de 36 000 especies de plantas como polisacárido de reserva. Exhibe excelentes beneficios para la salud al regular el metabolismo de los lípidos, la pérdida de peso, la reducción del azúcar en sangre, la inhibición de la expresión de factores inflamatorios, la mejora del estreñimiento, entre otros (Qin et al., 2023). Es un polisacárido de almacenamiento, soluble en agua compuesto por unidades de fructosa unidas por enlaces β 1:2, con un grado de polimerización (GP) de 2-60. La configuración β de la inulina evita que sea hidrolizada por enzimas en el tracto gastrointestinal superior de los humanos, lo que le permite ingresar intacta al intestino grueso y ser fermentada selectivamente por bacterias intestinales beneficiosas (Mohammadi et al., 2023), lo que hace que sea altamente reconocida por sus características prebióticas. Desde el punto de vista tecnológico, la inulina presenta diversas propiedades técnicas relevantes que lo hacen apta para su aplicación en la industria alimentaria, dentro de ellos destacan: una alta solubilidad, mejora la viscosidad, brinda estabilidad, favorece los procesos de gelificación y finalmente ayuda en las propiedades texturizantes al utilizarse en un alimento (Anderson-Dekkers et al., 2021).

Por otra parte, se encuentra el alginato, un copolímero lineal constituido por residuos de ácido β-d-manurónico (M) y ácido α-l-gulurónico (G) unidos por enlaces 1→4 y distribuidos aleatoriamente a lo largo de las cadenas del polisacárido. Pueden formar cadenas homogéneas de MM (bloques M), unidades GG (bloques G) o cadenas con bloques alternados de ácido manurónico y ácido gulurónico (bloques MG). La estructura del alginato, definida principalmente por el patrón de secuencia, la longitud del bloque G, la relación M/G y el peso molecular, determina sus propiedades fisicoquímicas y tecnológicas (Bojorges et al., 2023; Makarova et al., 2023). Al ser un biopolímero no tóxico y con alta viscosidad, presenta propiedades tecnológicas de gran interés en la industria alimentaria, en los que se pueden destacar: como agente texturizante gracias a su capacidad espesantes y gelificante, o bien, como emulsionante y sustituto de grasas (Yang et al., 2020; Kang et al., 2020).

Es por ello que, al igual que la inulina, son candidatos ideales para la formación de complejos proteína-polisacáridos como medios de encapsulación de un aceite vegetal, y finalmente ser utilizados como sustitutos grasos en un yogur tipo Griego.

2.4.2. Proteínas

Las proteínas son biopolímeros compuestos de aminoácidos con diferente estructura (fibrosas y globulares), esto se ve influenciado debido a su secuencia de aminoácidos, de las condiciones ambientales prevalecientes, variación de temperatura, presión, solventes, valores de pH y composición iónica. Las proteínas son ampliamente utilizadas como estabilizantes de emulsiones en la industria alimentaria (Grossmann & McClements., 2023).

Las propiedades funcionales de las proteínas dependen directamente de las características específicas de sus moléculas, como la forma, el tamaño, susceptibilidad a la desnaturalización, flexibilidad, composición de aminoácidos, hidrofilicidad e hidrofobicidad, la distribución de carga en la molécula, la naturaleza y número de estructuras, la capacidad de la molécula entera o sus partes constituyentes para adaptarse a condiciones ambientales cambiantes, y la naturaleza de las interrelaciones entre diferentes proteínas y otros componentes alimentarios. Las propiedades funcionales de las proteínas se ven afectadas por factores ambientales importantes en la ubicación de la proteína, como la temperatura, el pH, la fuerza iónica o la presión (Malecki et al., 2021).

Los aislados de proteína de suero (WPI, por sus siglas en inglés) consisten principalmente en β-lactoglobulina, α-lactoalbúmina y albúmina de suero bovino, que representan aproximadamente el 60 %, 20 % y 5.5 %, respectivamente, del total de proteínas de suero. Son un subproducto de la fabricación de queso y caseína. Poseen excelentes propiedades funcionales, como emulsionantes, espumantes, gelificantes, de interacción con nutracéuticos y de unión de agua; por lo tanto, se han utilizado ampliamente como ingredientes en bebidas alimenticias, alimentos funcionales y productos lácteos (Fan et al., 2021).

2.5. Coacervados

La coacervación sigue dos eventos formadores de estructuras inducidos por el pH asociado con la formación de complejos solubles e insolubles durante la acidificación. La combinación de polielectrolitos con cargas opuestas (Figura 1) en un medio acuoso da como resultado una separación de fases asociativa, una fase de sobrenadante pobre en

biopolímeros y una fase de complejo rica en biopolímeros. Dependiendo de las estructuras de las macromoléculas y de los parámetros experimentales, se forma una fase rica en polielectrolitos la cual puede presentar características de un líquido, de un sólido o de una combinación de ambas configuraciones (Agazzi et al., 2023; Neitzel et al., 2021).

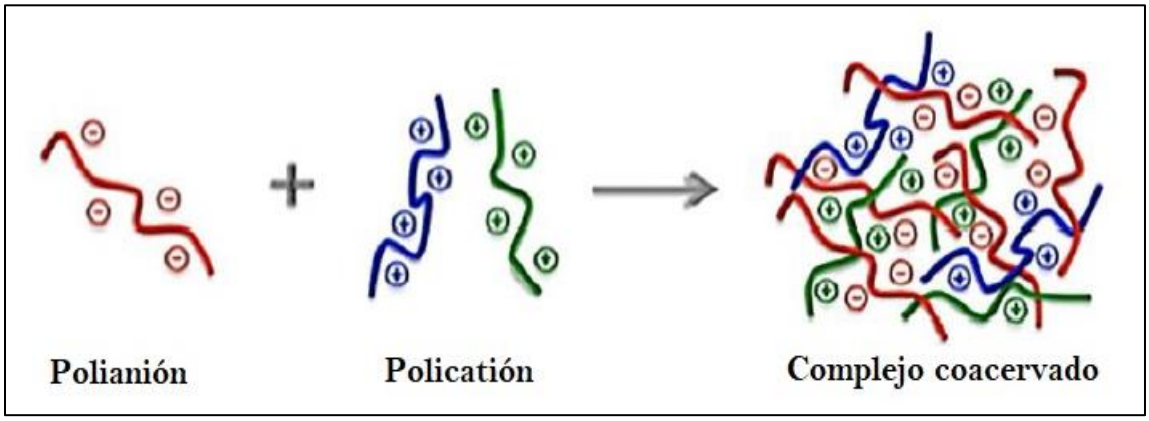


Figura 1. Proceso de coacervación compleja (Mehdipour & Gharachorloo, 2020).

El pH juega un papel importante en la formación de complejos coacervados debido a su efecto sobre el grado de ionización de los grupos funcionales amino y carboxilo unidos a las moléculas de biopolímeros en las proteínas y los polisacáridos. Un complejo coacervado se caracteriza por una mezcla de proteína con carga positiva y polisacárido con carga negativa y suele formar interacciones electrostáticas muy atractivas. Estos complejos formados, no solo se pueden utilizar como miméticos de grasas o portadores de nutrientes, sino que también muestran una capacidad emulsionante mejorada que la utilización de un solo biopolímero (Meng et al., 2024).

La estabilización de emulsiones por complejos proteína-polisacárido puede efectuarse de dos formas: la primera implica la adición de una solución de polisacáridos cargados a una emulsión primaria que ya está estabilizada por la proteína como emulsionante individual, para producir gotas de emulsión con un revestimiento superficial de bicapa de proteína-

polisacárido; y la segunda implica la adición de una solución acuosa que contiene los complejos de proteína-polisacárido como un agente emulsionante seguido de la homogenización y que pueden adsorberse juntos en la interfase (Hernández-Marín et al., 2013).

2.6. Emulgeles

Recientemente, se han estudiado técnicas novedosas para estructurar aceites líquidos, lo que resulta en sistemas de lípidos reformulados con propiedades reológicas y tecnológicas cercanas a las grasas saturadas. El uso de emulgeles presenta un gran potencial en el desarrollo de alimentos más saludables, además promete ser una alternativa como nuevo sistema de administración de ingredientes bioactivos lipofílicos (Pintado et al., 2015; Chen et al., 2016). La conversión del estado líquido al estado sólido blando de las emulsiones basadas en agentes gelificantes, resulta de varios pasos de procesamiento, como el calentamiento, la acidificación o el tratamiento enzimático, entre otros (Dickinson, 2013).

Las emulsiones alimentarias pueden sufrir diferentes mecanismos físicos de desestabilización como es la coalescencia, el cremado o la floculación. Sin embargo, una forma de extender la estabilidad física de dichas emulsiones puede ser mediante la adición de biopolímeros estructurados, lo que da lugar a la aparición de un emulgel (Báez et al., 2019).

El gel de emulsión, o emulgel, se puede definir como una emulsión con una red de tipo gel y propiedades mecánicas sólidas. La formación de un emulgel implica la producción de una emulsión estabilizada con proteínas utilizando agentes emulsionantes y la

incorporación de agentes gelificantes, como hidrocoloides, mediante la agregación de gotas de emulsión o la gelificación de la fase continua (Khan et al., 2020; Dickinson, 2013). Los emulgeles presentan propiedades tanto de emulsión como de gel basados en la emulsión de la fase interna, el cual consiste en una red de gotas de aceite atrapadas dentro de una matriz de algún biopolímero (Chen et al., 2020), o una mezcla de ellos.

Existen dos alternativas, para la formación de emulgeles, en las que una emulsión puede estabilizarse mediante complejos proteína-polisacárido (Figura 2): el método A consiste en preparar una emulsión primaria con la proteína como único emulsionante y luego agregar el polisacárido cargado a la fase acuosa de la emulsión para producir una emulsión secundaria que tienen una capa proteína-polisacárido. Por otro lado, el método B implica preparar primero una solución acuosa a granel del complejo proteína-polisacárido y luego usar el complejo como agente emulsionante durante la homogeneización posterior (Jourdain et al., 2008).

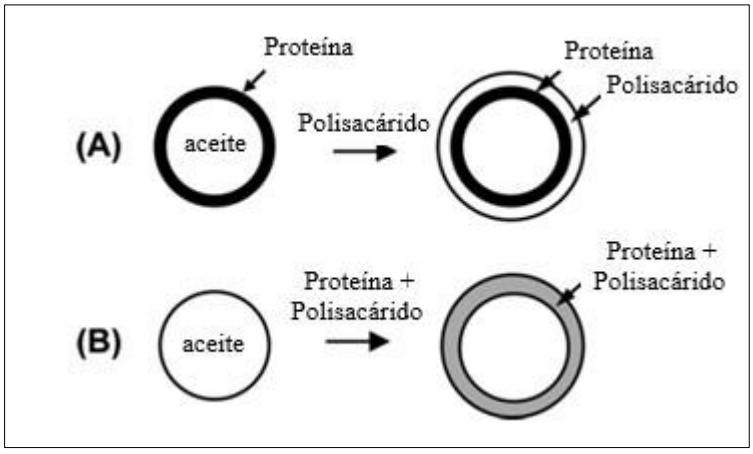


Figura 2. Ilustración referente a las alternativas para formación de emulgeles (Dickinson, 2008).

Un emulgel, es una sustancia similar a un gel que contiene una dispersión de emulsión. Esta estructura tiene una fase continua y una dispersa, creando redes en toda la sustancia y

dándole una textura semisólida. De acuerdo a su tipo de aplicación, los sistemas de administración basados en emulgeles presentan ventajas como una alta estabilidad física, nuevas propiedades reológicas, o bien, propiedades de liberación controlada (Oppong et al., 2024).

Este tipo de material semisólido comestible puede utilizarse para crear nuevos productos alimenticios, mejorar la textura o las características sensoriales de productos ya existentes, como mermelada, queso o yogur (Liang et al., 2020). A su vez, las propiedades fisicoquímicas macroscópicas de los emulgeles (como apariencia, textura y estabilidad), que pueden proporcionarle al alimento, dependerán del tipo, concentración, organización e interacciones de sus elementos estructurales, como gotas de aceite, proteínas y/o polisacáridos (Luo et al., 2019).

La composición de muchas emulsiones alimentarias incluye proteínas y polisacáridos, biopolímeros que de forma conjunta influyen en la textura y consistencia de un producto. En otras palabras, son los responsables de la estructuración de las emulsiones, junto con las gotas de la fase dispersa (Jiang et al., 2020). Por tanto, los complejos proteína-polisacárido al formar enlaces covalentes, pueden ser incorporados al sistema a emulsionar, para actuar como un emulsionante con la capacidad de formar membranas interfaciales robustas, en las que la estructura del polisacárido puede extenderse hacia la fase continua de la emulsión (O/W), brindando estabilidad mediante fuertes repulsiones estéricas. Dichas emulsiones se logran con una menor concentración total de biopolímeros y muestran un mejor comportamiento frente a cambios de presión, pH o temperatura (Ribeiro et al., 2021).

2.7. Investigaciones sobre la estabilización de emulsiones o emulgeles con complejos coacervados

A través de los años el interés por el estudio en la estabilización de emulsiones y/o emulgeles con complejos coacervados ha sido cada vez mayor; esto debido a que su posible aplicación permitirá el diseño de nuevos y mejorados productos alimenticios.

La estabilización de emulsiones y/o emulgeles no es tan sencilla como parece; sin embargo, a continuación se presentan algunos estudios desarrollados por diversos autores, respecto al tema:

Referencias	Investigación	Resultados
Daza et al. (2024)	Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de microcápsulas formadas a partir del complejo coacervado gelatina-alginato y aceite de aguacate hass.	Encontraron que a concentraciones bajas de gelatina-alginato favoreció la formación de coacervados. Además, se obtuvo una alta eficiencia de encapsulación (86.8-92.2%) y buena estabilidad térmica.
Mu et al. (2022)	Evaluación de la formación de complejos coacervados entre quitosano y almidón OSA (anhídrido octenil succínico) y sus propiedades	Obtuvieron complejos coacervados bien estructurados al optimizar los valores de pH y las relaciones de masa entre los biopolímeros utilizados. Dicho

	físicas al encapsular aceite de algas.	complejo exhibió buenas propiedades de encapsulación y una mayor estabilidad durante el almacenamiento.
Zhang et al. (2020)	Evaluación del efecto de la asociación gelatina-goma arábiga en la reología y microestructura de una emulsión O/W utilizando aceite de maíz, para el desarrollo de nano fibras.	La adición de goma arábiga causó una disminución de la viscosidad aparente, conduciendo a un comportamiento más Newtoniano.

2.8. Investigaciones sobre la aplicación de sustitutos en yogur

Por su parte, algunos autores han documentado la aplicación de sustitutos grasos en yogur, proporcionando información interesante sobre el efecto estructurante de estos complejos en el producto final:

Referencias	Investigación	Resultados
Bourouis et al. (2024)	Evaluación de las propiedades fisicoquímicas de yogures de soya a partir de la incorporación de microegeles del complejo aislado de proteína de soya-quitosano (SPI-CS).	La adición de microgeles SPI-CS en yogur de soya, mejoró las propiedades viscoelásticas, incrementó el contenido de proteína (5.07 %) y redujo el contenido graso (1.99%). Los

		parámetros de dureza, elasticidad y capacidad de retención de agua aumentaron.
Li et al. (2021)	Estudio del efecto de la adición del complejo gelificado proteína aislada de lactosuero-grasa de leche (WPI-GL) en yogur bajo en grasa.	Los complejos WPI-GL mejoraron la resistencia del agua y las propiedades texturales. Mostraron también que la incorporación de este complejo mostró que el yogur presente una estructura de red más compacta y poros más pequeños.
Godoy-García et al. (2020)	Evaluación de la Adición de glicomacropéptido (GMP) como sustituto de grasa en yogur griego reducido en azúcar	La adición de hasta un 0.75% de GMP redujo el porcentaje de sinéresis (50 a 10 %), las propiedades viscoelásticas se vieron disminuidas. Hubo una menor aceptación por parte del consumidor.

3. Justificación

Actualmente los productos lácteos representan un sector con alto valor económico, ocupando el tercer lugar a nivel mundial. México se ubica dentro de los cinco países con mayor consumo de yogur tipo Griego, el cual por el tipo de ingredientes utilizados en su formulación aporta mayor contenido calórico disminuyendo su consumo en ciertos sectores de la población preocupados por su salud, o bien, por que sufren de alguna enfermedad crono degenerativa; ante ello, la energía proporcionada por dichas calorías puede ser disminuida a través del uso de aditivos alimenticios como los sustitutos de grasa, los cuales están compuestos por proteínas y/o polisacáridos, principalmente, los cuales brindan textura y estabilidad de tal forma que se vean mínimamente afectadas las propiedades fisicoquímicas y mecánico-sensoriales de este tipo de productos.

Podemos mencionar además que en las últimas décadas, la industria agroalimentaria ha tenido principal interés en investigar nuevas alternativas sobre el desarrollo y formulación de nuevos productos que beneficien la salud de los consumidores, manteniendo o mejorando su balance nutricio y características sensoriales similares a los productos ya existentes en el mercado.

La tendencia en el consumo de los alimentos reducidos en grasa, bajos en sal, bajos en azúcares principalmente, han llevado a los consumidores a exigir productos con mejores balances nutricios, que además aporten beneficios a la salud, con el fin de reducir el riesgo de posibles enfermedades crono degenerativas, como es el caso de los productos lácteos.

Por lo que, la formulación y diseño de nuevas estructuras a partir de complejos proteína-polisacárido pueden ser utilizados como agentes estructurantes o como sustitutos de ingredientes en el desarrollo de nuevos alimentos, mediante el estudio y evaluación de los ingredientes utilizados en la formulación, permitiendo obtener alimentos reducidos en algún ingrediente, como lo es el caso de la grasa en el yogurt tipo Griego, con una estabilidad adecuada, además de emular propiedades mecánico-estructurales y sensoriales similares a los productos convencionales completos en grasa.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

- ✓ Evaluar el efecto de la adición de un emulgel estabilizado con complejos coacervados proteína-polisacárido como agente estructurante en yogur tipo Griego.

4.2. Objetivos particulares

- ✓ Establecer las condiciones de formación de los complejos coacervados de proteína-polisacárido, evaluar su actividad superficial, así como su caracterización.
- ✓ Establecer las condiciones de formación y caracterizar emulgeles tipo aceite-en-agua (O/W) estabilizados con complejos coacervados proteína-polisacárido.
- ✓ Evaluar el efecto de la adición de los emulgeles (O/W) en formulaciones base de yogur tipo Griego, sobre sus propiedades fisicoquímicas, nutricionales, texturales, estructurales y reológicas.
- ✓ Evaluar la estabilidad y características sensoriales de un yogur tipo Griego adicionado con emulgeles.

5. Hipótesis

La sustitución parcial o total del componente graso en yogur tipo Griego mediante la adición de estructuras diseñadas a partir de emulgeles basados en complejos proteína-polisacárido, generará una microestructura distinta en el producto que emulará o mejorará las características mecánico-sensoriales de un yogur tipo Griego convencional, generando un alimento funcional de diseño, con un mejor balance nutricio.

6. Materiales y Métodos

6.1. Materiales

El aislado de proteína de suero (WPI; Hilmar™ 9010, 5.0% de humedad, 90% de proteína, 1.0% de lactosa y 3.0% de ceniza) se obtuvo de Hilmar Cheese Co. (Hilmar, CA, EE. UU.). El alginato de sodio (A; CAS-No. 9005-38 3; Mw= 95 kDa, relación manuronato/guluronato estimada por dicroísmo circular= 1.96) se adquirió de Sigma Aldrich (Toluca, Estado de México, México). Inulina de agave (I; DP promedio: 20–22) adquirida de Vaserco S. de R.L. de C.V. (Jalisco. México). El aceite de canola (Capullo®, ACH Food México) se compró en un mercado local. Todos los reactivos utilizados fueron de grado analítico. En todos los experimentos se utilizó agua desionizada. Se utilizó leche desnatada en polvo (≤1.25% de grasa; ≥34% de proteína; DairyAmerica™, Fresno, CA, EE. UU.) y leche entera (Vaca Blanca®, 3.0% grasa; 3.0% proteína) los cuales se obtuvieron de proveedores locales. Los cultivos de yogur liofilizados de *Lactobacillus delbrueckii* subs. *bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus* (CHOOZIT® MY 800 LYO 5 DCU; Danisco France SAS, Buxières, Francia) fueron proporcionados por Distribuidora Alcatraz S.A. de C.V. (Ciudad de México, México).

6.2. Preacondicionamiento de WPI

Para inducir la modificación de la estructura de la proteína, se prepararon dispersiones acuosas de WPI al 1% (p/p) y se mantuvo en agitación constante durante 1 h dejando reposar a 4ºC para permitir su completa hidratación. Las dispersiones de WPI fueron tratadas por dos métodos: Tratamiento térmico (T) y aplicación de ultrasonido (US). Para el tratamiento T, las dispersiones de WPI se colocaron en un baño de agua a 90 °C durante 15, 20 o 25 min, colocando un recubrimiento plástico sobre el recipiente para evitar la

evaporación del agua durante este tratamiento térmico. Para el tratamiento US, la solución de WPI se sonicó utilizando un dispositivo sonotrodo (Sonics VCX-130, Vibracell, 130W, 20 kHz) a una amplitud constante del 80% durante 15, 20 o 25 min, respectivamente. Los tratamientos resultantes se codificaron según el tipo de tratamiento, Tx o USx, donde x denota el tiempo utilizado para cada tratamiento, las muestras resultantes se almacenaron a 4°C hasta su uso.

6.3. Condiciones para la formación de complejos coacervados

Se prepararon soluciones madre de A e I al 1% en peso, al menos 12 h antes de su uso. Se obtuvo una mezcla binaria de polisacáridos de AI en una relación másica 2:1 mezclando la cantidad adecuada de las soluciones. El pH de máxima interacción entre el WPI y AI se estableció con base en la metodología reportada por Liu et al. (2023). El potencial zeta de las soluciones de biopolímero se determinó en función del pH (2.0-5.0) utilizando un Zetasizer NanoZS (Malvern Instruments Ltd., Worcestershire, Reino Unido). El pH se ajustó usando soluciones de HCl (0.1 N) o NaOH (0.1 N), según se requiriera. El pH donde se encontró la diferencia estequiométrica entre las cargas positivas y negativas de los biopolímeros se consideró como la condición necesaria para la obtención de los CCT (pH_{CC}) en el sistema proteína-polisacáridos (WPI-AI). Se realizaron análisis turbidimétricos para establecer la relación WPI-AI ($R_{WPI:AI}$) que condujo a un mayor rendimiento de coacervación utilizando $R_{WPI:AI}$ de 0.5:1.0, 1.0:1.0 y 2.0:1.0, y la concentración total de biopolímero de 1% en peso. Para ello, las mezclas de WPI-AI se ajustaron a pH_{CCT}, se agitaron suavemente durante 1 h y se dejaron reposar durante 48 h a 4 °C, luego se centrifugaron (Hermle modelo Z36HK, Hermle Labortechnik GmbH, Wehingen, Alemania) a 1,350 rpm durante 30 min para separar la fase sobrenadante. Se registraron los

valores de turbidez de la fase sobrenadante para corroborar la formación del máximo rendimiento de la fase de coacervado (Xiong et al., 2021).

El rendimiento de CCT (R_{CCT}) se calculó siguiendo el método reportado por Gharanjig et al. (2020). Después de la centrifugación de los CCT, las fases de sobrenadante y precipitado se secaron en horno por separado hasta peso constante, el rendimiento se calculó utilizando la ecuación:

$$R_{CCT}(\%) = \frac{m_{CCT}}{m_{CTB}} \times 100$$

Donde m_{CC} es la masa del coacervado o fase precipitada, mientras que m_{CTB} es la masa del contenido total de biopolímero en la solución anterior, ambos expresados en base seca.

6.4. Espectroscopia FTIR

Las dispersiones de WPI con y sin pretratamiento, así como los CCT formados con estas dispersiones fueron analizadas por espectroscopia de infrarrojo FTIR utilizando un equipo Perkin Elmer Frontier FTIR (Perkin Elmer, Waltham, MA, EE. UU.) acoplado a un accesorio ATR. Se usó un espectro de la celda vacía para corregir por efectos de fondo. Para cada muestra, el espectro representó un promedio de 20 escaneos con resolución de 4 cm^{-1} en la región de 800-3600 cm^{-1} (Guo et al., 2021a).

6.5. Tensión interfacial

Se evaluó la tensión interfacial dinámica (TI) a través de la interfaz aceite-agua en WPI no tratado y preacondicionado (Tx o USx), así como sus respectivos CCT. Se utilizó un tensiómetro de gota pendiente OCA 20 (DataPhysics Instruments GmbH, Alemania) y se determinó la TI de acuerdo con el método descrito por Wang et al. (2023), con algunas

modificaciones. Brevemente, se inyectaron 30 μL de muestra como fase acuosa en una celda de vidrio (2 cm x 2 cm x 2 cm) transparente llena de aceite de canola filtrado (0.45 μm). Se utilizó una cámara digital (CCD DXC-151A), acoplada al equipo, para analizar el comportamiento de adsorción dinámica de las gotas colgantes formadas en las diferentes muestras. Cada determinación se registró durante 60 min.

6.6. Propiedades viscoelásticas

Las propiedades viscoelásticas de CCT se evaluaron en un reómetro MCR 300 (Anton Paar, Stuttgart, Alemania) utilizando una geometría de placa cónica (50 mm de diámetro, ángulo de 2°, separación de 0.1 mm). La temperatura se controló a 20 ± 0.05 °C utilizando un elemento Peltier. Se realizaron barridos de frecuencia dinámicos (0.01 a 100 Hz) aplicando una deformación constante (1%) dentro de la región viscoelástica lineal (RVL). Se obtuvieron los módulos de almacenamiento (G´) y pérdida (G´´).

6.7. Preparación de emulgeles O/W

Los CCT formados con WPI preacondicionada (T o US) y sin tratamiento fueron utilizados para estabilizar emulgeles tipo aceite-en-agua (O/W). Para ello, se utilizó aceite de canola como fase oleosa (O) a tres fracciones másicas de fase dispersa (ϕ=0.20, 0.30 y 0.50). La fase O se agregó gota a gota sobre la fase CCT y se homogeneizó a 10,500 rpm con un Ultraturrax T50 (IKA Works Inc. Wilmington, NC, EE. UU.), durante 3 min. Los emulgeles resultantes se codificaron según el tipo de preacondicionamiento de WPI (T o US) y el valor de ϕ, de la siguiente manera $ET_{0.20}$, $ET_{0.30}$, $ET_{0.50}$ y $EUS_{0.20}$, $EUS_{0.30}$ y $EUS_{0.50}$. Se prepararon emulgeles de control (EC) empleando CCT y WPI sin tratar.

6.8. Caracterización de emulgeles

Los emulgeles se observaron en un microscopio óptico Olympus BX45 (Olympus Corp. Japan) con un aumento de 100x. Se obtuvieron micrografías ópticas con una cámara digital Moticam 2300, 3.0 M Pixel (Motic Inc. Ltd. China), se describió la morfología de las gotitas en el emulgel (Taheri et al., 2021).

La eficiencia de encapsulación (EE) de los emulgeles se determinó con base en el método informado por Barbosa et al. (2021). Brevemente, el contenido de aceite superficial (C_{AS}) se determinó como la masa de aceite después de extraerse de 5 g de emulgel en 10 mL de éter de petróleo durante 10 min con ligera agitación y evaporar el solvente (horno de secado 60-80 °C hasta peso constante). El contenido total de aceite (C_{AT}) se determinó después de dispersar 5 g de emulgel en 10 mL de éter de petróleo durante 10 min bajo sonicación (80% de amplitud) para inducir la ruptura de la emulsión y la evaporación del solvente. La eficiencia de encapsulación se calculó utilizando la ecuación:

$$EE(\%) = \frac{C_{AT} - C_{AS}}{C_{AT}} \times 100$$

6.9. Propiedades texturales

Se realizó un análisis de perfil de textura (TPA, por sus siglas en inglés) a los emulgeles utilizando un analizador de textura Brookfield CT3 (Brookfield, Middleboro, EE. UU.), según lo descrito por Glusac et al. (2018) con algunas modificaciones. Se prepararon emulgeles y se vertieron en un recipiente de vidrio (15 mm de diámetro × 20 mm de altura). El ensayo se realizó aplicando una doble compresión con palpador cilíndrico (10 mm de diámetro), considerando una celda de carga de 4,500 g, velocidad de ensayo de

1.0 mm/s y 50% de penetración del palpador. Se determinaron parámetros de textura como dureza, cohesividad, gomosidad y resiliencia.

6.10. Estabilidad física

La estabilidad de los emulgeles se evaluó utilizando un LUMiSizer (L.U.M. GmbH, Alemania) mediante sedimentación centrífuga para acelerar fenómenos de incidencia de inestabilidad como agregación, formación de crema, floculación y sedimentación en sistemas coloidales. Los parámetros instrumentales utilizados fueron volumen de muestra de 2 mL de emulgel, velocidad de centrifugado de 4,000 rpm, tiempo de exposición de 127 min, intervalo de tiempo de registro de 30 s, temperatura de 20 °C. La velocidad de sedimentación se estimó mediante el software SEPView® y se relacionó con la estabilidad de los emulgeles (Gómez-Luria et al., 2019).

6.11. Propiedades reológicas de emulgeles

La viscosidad aparente de los emulgeles se determinó en un reómetro Physica MCR 300 (Anton Paar, Stuttgart, Alemania), utilizando una geometría de placa cónica de 50 mm de diámetro, a 20 °C, con un rango de velocidad de corte entre 0.01 y 100 s^{-1}. Las propiedades viscoelásticas de los emulgeles (G´ y G´´) se determinaron como se describió previamente en la Sección 6.6. Además, se realizaron barridos de temperatura (rampas de calentamiento) a una frecuencia constante de 1 Hz, 0.1% de deformación y un rango de temperatura de 20 a 80 °C con una rampa de calentamiento de 5 °C/min (Zare et al., 2023).

6.12. Formulación de yogur tipo Griego

Las muestras de yogur tipo Griego fueron elaboradas de acuerdo a la metodología descrita por Free-Manjarrez et al. (2022), con algunas modificaciones. Se formuló un yogur

control completo en grasa (FFGSY) a partir de leche entera líquida. Para los tratamientos reducidos en grasa se utilizó leche descremada (130 + 1 g/L de sólidos totales). El yogur tipo Griego se elaboró inoculando el cultivo MY 800 LYO 5 DCU a una concentración del 0.03% (p/p) e incubándose a 42 ± 1 °C durante 18 h en un equipo Suteck Yoghurt Maker Machine®. Luego se enfriaron a 4 ± 01 °C durante 24 h. Posterior a la refrigeración, las muestras de yogur tipo Griego se drenaron por filtración con tela de seda durante 24 h. Se preparó un yogur tipo Griego sin emulgel (RFGSY), así como tres tratamientos más añadidos con emulgel a diferentes concentraciones (10%, 12.5% y 15% en peso, respectivamente) al finalizar la fermentación. Los productos obtenidos se envasaron y almacenaron a 4 ± 1 °C durante 1 día previo a su análisis.

6.13. Análisis químico proximal y sinéresis

Se realizó un análisis de composición a todos los tratamientos para obtener los parámetros de grasa, proteína, cenizas, acidez titulable y pH siguiendo las metodologías descritas por la AOAC (2019).

También, se tomaron 30 g de cada muestra de yogur tipo Griego, se colocaron en tubos graduados de 50 mL y se centrifugaron a 4,000 rpm durante 10 min a 20 ± 1 °C utilizando una centrífuga de alta velocidad HERMLE Z323K (Hermle, Labortechnik, Alemania). La sinéresis se estimó como el porcentaje del suero liberado con respecto al peso inicial de la muestra (Soni et al., 2020).

$$Sinéresis\ (\%) = \frac{peso\ de\ sobrenadante}{peso\ inicial\ de\ la\ muestra} \times 100$$

6.14. Microestructura (SEM)

El arreglo microestructural de las muestras de yogur tipo Griego se analizó mediante la obtención imágenes SEM. Las muestras se fijaron con glutaraldehído (2.50% p/v) durante 24 h. Seguidamente se sumergieron en una solución de tetraóxido de osmio al 1% (p/v) en solución amortiguadora de fosfatos (PBS; 0.1 M, pH 7.2) durante 2 h, para ser lavadas en dos ocasiones con PBS. Las muestras se deshidrataron en soluciones graduales de etanol (30%, 50%, 70%, 90% y etanol absoluto), después fueron montadas en un portamuestras de cobre y recubiertas con oro (Fine Coat Ion Sputter JFC 1100, Jeol Ltd., Akishima, Japón). Finalmente, las muestras se observaron utilizando un microscopio electrónico de barrido (SEM; Jeol, modelo JMS-035, Jeol Ltd.) a voltajes de aceleración de 10 KV a aumentos de 3000× (Huang et al., 2021).

6.15. Análisis de perfil de textura (TPA)

Las propiedades de textura de las muestras de yogur tipo Griego se determinaron utilizando un analizador de textura Brookfield CT3 (Brookfield, Middleboro, USA) de según lo mencionado por Dou et al. (2022), con ligeras modificaciones. Se realizaron dos ciclos de compresión utilizando una sonda cilíndrica plana de 10 mm de diámetro a una velocidad previa a la prueba de 2.0 mm/s y velocidad de prueba 0.50 mm/s con deformación del 40%. Se cuantificaron los valores de dureza, adhesividad, cohesividad y elasticidad.

6.16. Reología

Las características reológicas se obtuvieron en un reómetro Physica MCR 301 (Anton Paar Messtechnik, Stuttgart, Germany), utilizando una geometría cono-plato (50 mm de

diámetro, 2º de ángulo, 1.0 mm gap), según lo mencionado por Costa et al. (2019). Las muestras se colocaron en el plato y se dejaron reposar durante 5 min para la recuperación de la estructura. Para obtener las curvas de flujo, se realizaron escaneos de esfuerzo cortante a un rango de velocidad de corte de 0.01-100 s^{-1}. Las propiedades viscoelásticas (G´, G´´, G*, η*) se obtuvieron a partir de barridos de frecuencia entre 0.01 y 100 Hz, con una deformación constante del 1.0%. Se aplicó el modelo de gel crítico de Winter-Chambon para evaluar los cambios en las propiedades viscoelásticas de las muestras en función de la frecuencia. Los datos se ajustaron mediante un análisis de regresión no lineal utilizando el software Origin Pro 8.5.0 (Origin Lab Corporation, Northampton, MA, USA).

$$G^* = A\omega^{1/z}$$

Donde *A* simboliza la resistencia del gel, ω es la frecuencia en Hz y *z* corresponde al factor de interacción, es decir, el número de unidades estructurales que interactúan entre sí en una red tridimensional.

Además, con el objetivo de establecer el grado de gelificación (fuertes o débiles), se determinaron las pendientes de dlog|G*| (S1), dlog|tan δ| (S2), dlog|η*| (S3) en función a log ω (Yu et al., 2020).

6.17. Evaluación sensorial

Se llevó a cabo una evaluación sensorial (prueba afectiva) de los distintos tratamientos con un panel de cuarenta evaluadores no entrenados de entre 20 y 25 años. Cada tratamiento fue evaluado en cinco parámetros sensoriales, determinados según la literatura como los más representativos para este tipo de alimentos: grumoso a liso, cremosidad, acidez, sabor residual y aceptación global, utilizando una escala de calificación estandarizada de cinco puntos que iba del 1 al 5 (1 = no me gusta en absoluto, 2 = no me

gusta, 3 = ni me gusta ni me disgusta, 4 = me gusta, 5 = me gusta mucho) para cada atributo sensorial. Para llevar a cabo el análisis sensorial por parte de los evaluadores, los tratamientos fueron servidos en vasos de 10 mL aproximadamente y se presentaron a los panelistas con códigos de tres dígitos en un orden aleatorio. Se proporcionó agua a los evaluadores entre muestras para la limpieza del paladar (Gkitsaki et al., 2024; Jrad et al., 2019).

6.18. Análisis estadístico

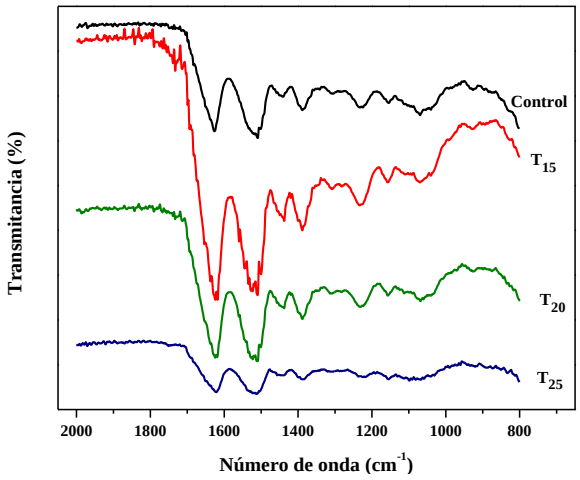
Todos los experimentos se realizaron al menos por triplicado. Los datos se analizaron mediante un análisis de varianza (ANOVA) de una vía y, en los casos relevantes, se llevó a cabo una prueba de Tukey para la comparación de medias ($p \leq 0.05$). Todos los datos se analizaron utilizando el software estadístico Minitab 18.0 (Minitab Inc., State College, PA, EE. UU.).

7. Resultados y discusión

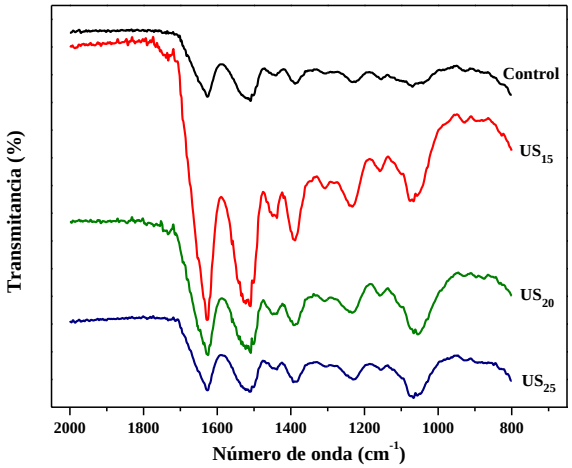
7.1. FTIR para WPI preacondicionado

Los tratamientos T y US indujeron cambios significativos en la estructura del WPI, como se muestra en la Figura 3. Los espectros FTIR mostraron cambios significativos en las bandas de absorción entre el WPI sin tratar (Control) y el resto de los tratamientos, específicamente dentro de las regiones donde se ubican la amida I (1600-1700 cm^{-1}) y la amida II (1550-1500 cm^{-1}). Basado en Kher et al. (2007), las bandas características ubicadas alrededor de 1660 cm^{-1} y 1650 cm^{-1} están relacionadas con la región amida primaria de las proteínas del suero, generalmente asignadas a estructuras ∝-hélice, mientras que la banda a 1630 cm^{-1} indica la región amida secundaria, relacionada a la presencia de estructuras de hoja β, algunas otras señales encontradas cerca de 1515 cm^{-1}, 1498 cm^{-1} y 1454-1438 cm^{-1} fueron asociadas con las vibraciones de la cadena lateral de aminoácidos de tirosina, fenilalanina y prolina, respectivamente. Los tratamientos T_{15} y US_{15} mostraron los mayores cambios, ya que se observaron los picos más nítidos en los espectros normalizados. Por el contrario, los tratamientos T_{25} y US_{25} mostraron señales con modificaciones menores. Estos cambios pueden atribuirse al proceso de desnaturalización de las proteínas en WPI causado por la temperatura o la aplicación de ultrasonido que condujo al proceso de desdoblamiento de la estructura de la proteína en diferente medida. Debido a que la configuración de la estructura secundaria en las proteínas impacta en su estabilidad y funcionalidad, la región amida I (1700-1600 cm^{-1}) se utilizó para deconvolucionar los espectros FTIR, analizando la contribución de configuraciones específicas como láminas-β (1617-1642 cm^{-1}), giros-β (1672-1691 cm^{-1}), ∝-hélice (1655-1662 cm^{-1}) y estructuras aleatorias (1646-1652 cm^{-1}), respectivamente (Sow et al., 2018).

a)



b)



c)

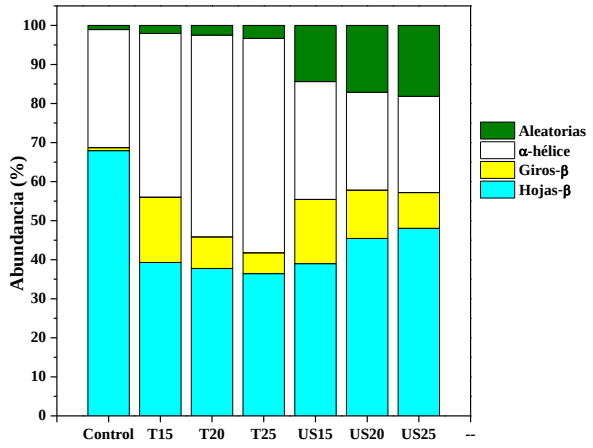


Figura 3. Espectros FTIR para WPI preacondicionados con a) temperatura y b) tratamiento con ultrasonido, c) estructura secundaria de WPI estimada a partir de la deconvolución de los espectros de amida I después de los procesos de preacondicionamiento (abundancia basada en el área relativa del pico, %).

La Figura 3c muestra los resultados del proceso de deconvolución de los espectros FTIR en la región amida I, donde se notan cambios en la estructura secundaria de las proteínas en WPI, aumentando la abundancia (área relativa del pico) de estructuras de hojas-β y estructuras aleatorias, conforme la exposición a la temperatura y ultrasonido fue más prolongada, con menor presencia de ∝-hélice, lo que indica cambios en la flexibilidad e hidrofobicidad de las proteínas (Vargas et al., 2021).

7.2. Formación y caracterización de CCT

La coacervación compleja involucra las interacciones atractivas entre dos biopolímeros de carga opuesta, como los sistemas proteína-polisacárido (Albano et al., 2020). Para llevar a cabo las interacciones entre los biopolímeros WPI y AI, se evaluó el efecto del tipo de proceso de preacondicionamiento aplicado a WPI sobre la densidad de carga a través del potencial zeta. La Figura 4 muestra los perfiles de potencial zeta para WPI tratado y sin tratar, y de la mezcla de polisacáridos AI. La mezcla de polisacáridos AI presentó valores negativos (-18.4 a -38.8 mV) en el intervalo de pH de 2.0 a 5.0. El WPI sin tratar (Control) exhibió un comportamiento típico para su potencial zeta (Fan et al., 2021; Barbosa et al., 2021; Raoufi et al., 2017) con valores positivos de potencial zeta en valores de pH por debajo del punto isoeléctrico (~ 4.3), convirtiéndose en negativo por arriba de este valor. El WPI tratado con temperatura exhibió diferencias significativas en los valores de potencial zeta, siendo marcadamente positivo en valores de pH de 2-3, el tratamiento T_{20} exhibió un punto isoeléctrico cercano a 4.8 (Figura 4a). El WPI tratado con ultrasonido no mostró diferencias significativas en el perfil de potencial zeta respecto al Control (Figura 4b), a pesar de que estos tratamientos provocaron cambios estructurales en el WPI, como se describe en la sección anterior. Hallazgos similares fueron obtenido por Barbosa et al.

(2021) y Vargas et al. (2021), donde los cambios inducidos en la estructura del WPI por la aplicación de T o US modificaron las propiedades de la superficie en diferente medida. El pH_{CC} 3.0 se definió como el valor de pH donde ocurre la mayor fuerza de interacción electrostática entre las cargas opuestas y las interacciones de atracción entre biopolímeros son más fuertes (Rousi et al., 2019).

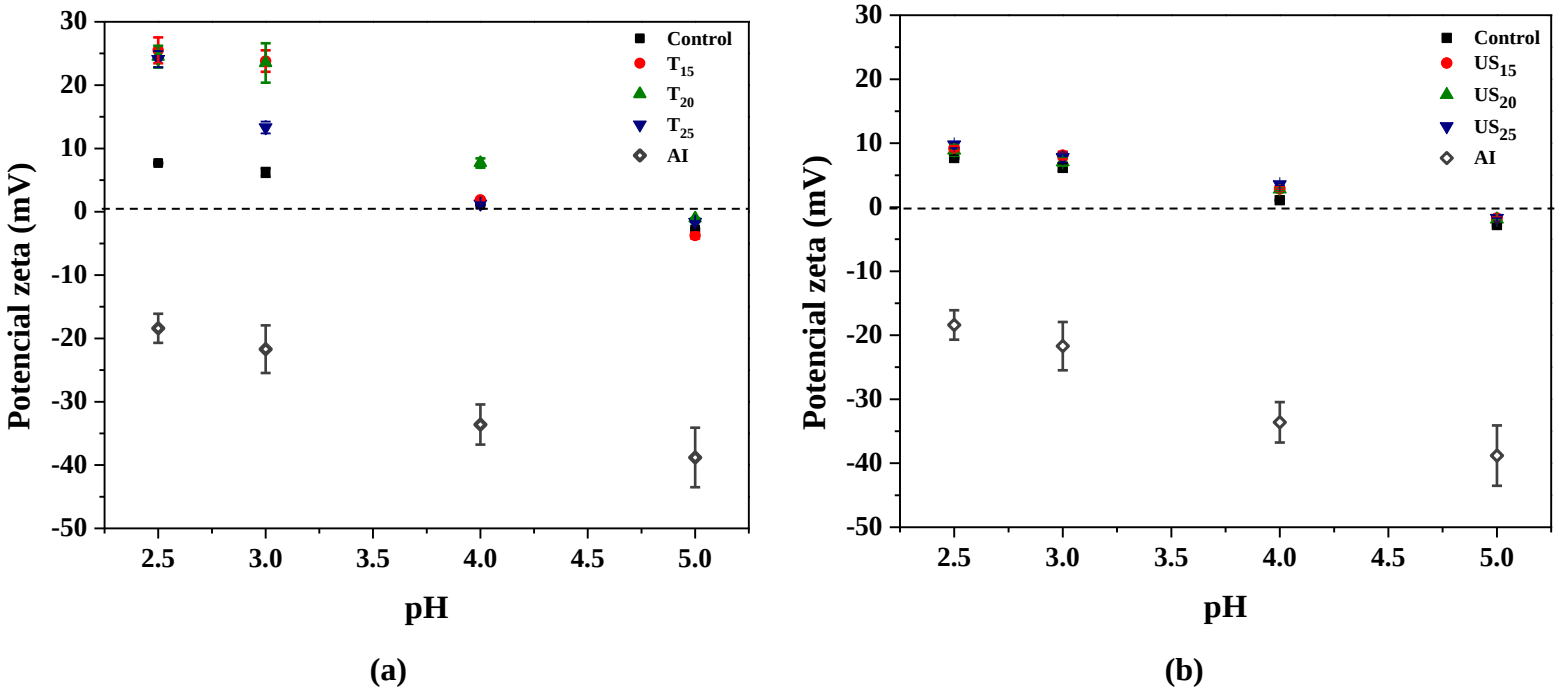


Figura 4. Perfiles de potencial zeta en función del pH para la mezcla de polisacáridos AI y WPI sin tratar (Control) y tratada con T (a) y US (b) como procesos de preacondicionamiento.

La Figura 5 muestra el efecto de la $R_{WPI:AI}$ y el tipo de proceso de preacondicionamiento para el WPI, sobre el R_{CCT} y la turbidez de la fase sobrenadante de los tratamientos. Los valores más altos de R_{CCT} están relacionados con la baja turbidez de la fase sobrenadante, ya que ambos fenómenos son el resultado de la complejación de WPI-AI que condujo a la formación de una fase rica en polímeros que constituyen el complejo coacervado y una fase rica en solvente. $R_{WPI:AI}$ tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.05$) para ambas variables; cuando $R_{WPI:AI}$ fue 2.0:1.0, todos los sistemas mostraron una disminución en el R_{CCT} y un aumento en la turbidez de la fase sobrenadante, destacando la relevancia de

la estructura de los biopolímeros involucrados en la coacervación y el equilibrio sobre las interacciones electrostáticas para la neutralización de sus cargas superficiales.

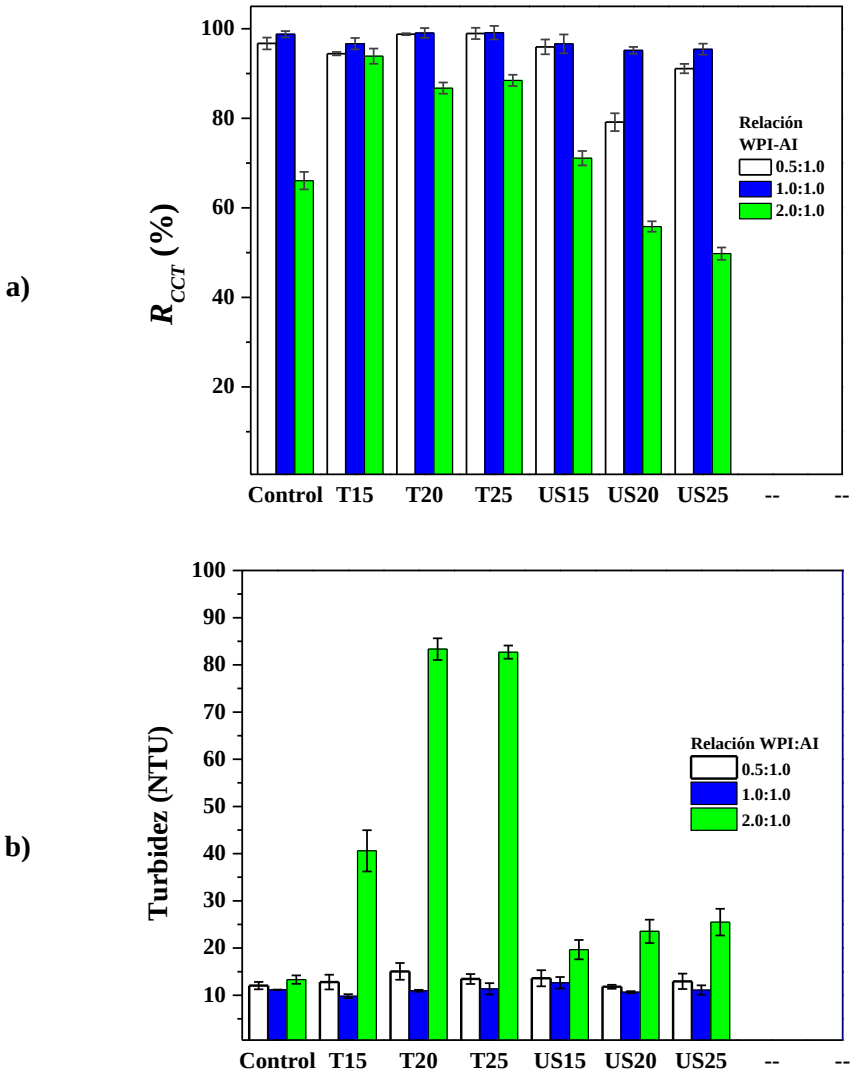


Figura 5. Efecto del proceso de preacondicionamiento de WPI y relación WPI-AI en a) sobre el rendimiento porcentual de coacervación (R_{CCT}), y b) turbidez de la fase sobrenadante de CCT a pH_{CC} 3.0.

$R_{WPI:AI}$ de 1.0:1.0 seguido de 0.5:1.0, mostró los valores más altos de R_{CCT} (99.12-91.10%) y baja turbidez (9.80-15.05), indicando que bajo estas condiciones el proceso de coacervación complejo entre WPI tratado y no tratado y AI se produce preferentemente. En cuanto al tipo de proceso de preacondicionamiento de WPI (T o US), la aplicación de ultrasonido provocó valores menores de R_{CCT} que los observados para $CCT_{Control}$ o CCT_T

(Figura 5a), a pesar de que la turbidez no tuvo un efecto significativo ($p \leq 0.05$) (Figura 5b). Vargas et al. (2021) reportaron un comportamiento similar, donde las proteínas tratadas con ultrasonido pueden presentar un aumento en la turbidez de una dispersión proteica causado por las modificaciones ocurridas en la estructura terciaria de las proteínas de WPI que afectan al reducir o agotar las interacciones proteína-proteína y proteína-polisacárido, lo que reduce la capacidad de WPI para interactuar electrostáticamente con los polisacáridos.

La tensión interfacial (TI) es una característica relevante de los materiales con actividad superficial como las proteínas y los polisacáridos, define sus propiedades funcionales como agentes con actividad superficial, influyendo en las interacciones que ocurren con otras moléculas y su idoneidad para utilizar estos materiales en diferentes áreas industriales. Desde el punto de vista de este trabajo, la evaluación de la TI en WPI preacondicionado es una herramienta para evaluar el efecto del tratamiento T o US en la estructura de la proteína y la mejora de su actividad superficial. La Figura 6 muestra los perfiles TI para WPI_T y WPI_{US} preacondicionados y sus respectivos sistemas CCT, donde todos los tratamientos muestran una reducción continua de la tensión interfacial, lo que indica que estos materiales se adsorben de forma continua y gradual en la interfaz aceite-agua (Wang et al., 2023). Los tiempos más prolongados en el proceso de preacondicionamiento para WPI, llevaron a una menor reducción de la TI en los tratamientos T y US (Figura 6a-b) que los exhibidos por el $WPI_{Control}$, con los tratamientos WPI_{US} se mostraron mayores diferencias. Los resultados sugieren que las modificaciones en la estructura resultantes de las condiciones de procesamiento T y US utilizadas en este estudio llevaron a una disminución en la capacidad del WPI para reducir la tensión

interfacial en la interfaz aceite-agua. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, estas modificaciones mejoraron la capacidad del WPI para interactuar con polisacáridos de carga opuesta. Además, la caracterización de la actividad superficial para CCT formado utilizando WPI_T y WPI_{US} a través de perfiles de tensión interfacial también es relevante. Siguiendo el principio de coacervación compleja, la formación de interacciones asociativas entre moléculas de proteína y polisacárido en una solución con un pH y una relación de masa específica, da como resultado la formación de una fase de coacervado complejo. Se espera que esta fase tenga menos grupos funcionales disponibles en cada macromolécula. La evaluación de la TI es relevante para evaluar las propiedades funcionales de los coacervados complejos utilizados como agentes estabilizantes de emulgel. Al comparar los perfiles de TI, $CCT_{Control}$ y CCT_{T15} mostraron valores de tensión interfacial más bajos que CCT_{T25} y CCT_{T20}, respectivamente (Figura. 6c). No se observaron diferencias significativas en los perfiles de tensión interfacial para CCT_{US15} y CCT_{T20} en comparación con el perfil de tensión interfacial para $CCT_{Control}$ en tiempos de envejecimiento de la interfaz >20 min. CCT_{US25} y CCT_{US15} exhibieron valores de tensión interfacial significativamente más bajos (Figura 6d). Las diferencias en los perfiles de TI entre WPI preacondicionado y sus CCT se pueden atribuir a la afinidad de los sistemas coloidales a la fase oleosa, así como a su estructura y composición molecular (Liu et al., 2021). Se deben realizar más estudios para dilucidar la influencia de la disposición estructural de los componentes individuales dentro de los sistemas de coacervados complejos en sus propiedades funcionales como estabilizadores de emulgel.

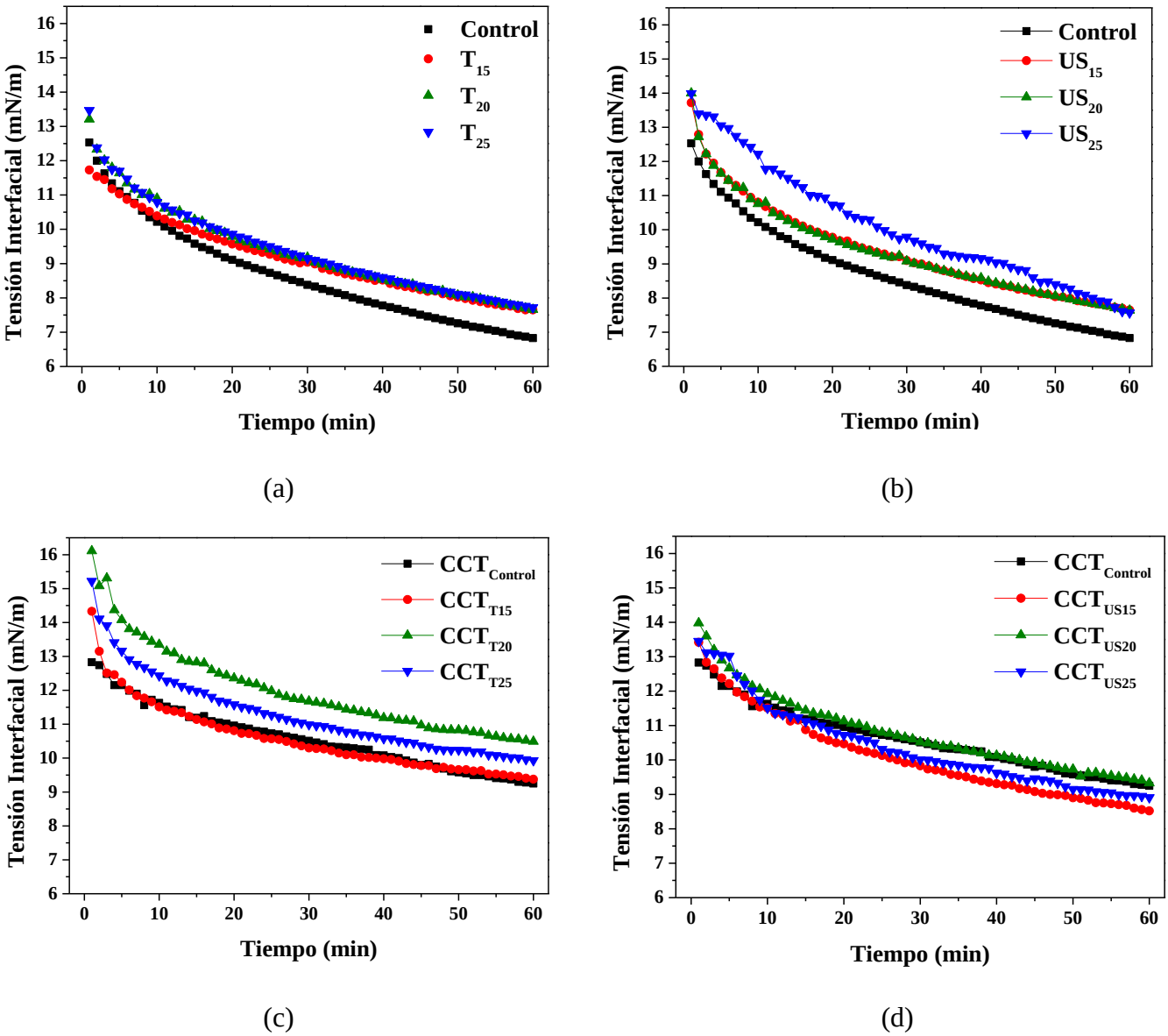


Figura 6. Perfil de tensión interfacial de WPI preacondicionada (T o US, a-b) y sus CCT (c-d).

Los espectros FTIR para los $CCT_{Control}$, CCT_T y CCT_{US} se muestran en la Figura 7. Tanto $CCT_{Control}$, CCT_T y CCT_{US} mostraron bandas típicas de absorción de WPI entre 1600-1700 cm^{-1} y la mezcla de polisacáridos AI con bandas relacionadas con las vibraciones de los enlaces O-H (3000-3600 cm^{-1}), enlaces alifáticos C-H (2920-2850 cm^{-1}), y bandas asociadas a vibraciones de estiramiento asimétricas y simétricas de iones carboxilato (1649 y 1460 cm^{-1}), siendo relevante para la estructura del A. Como puede verse, el pretratamiento de WPI_T tuvo un efecto significativo en la estructura de los CCT

finales, al desarrollar bandas de absorción más definidas en comparación con $CCT_{Control}$. El pretratamiento WPI_{US} mostró cambios con mayor intensidad, especialmente en la región entre 2400-2200 cm^{-1}. Estos resultados permiten inferir que, si bien el tratamiento con T o US sobre WPI permitió la modificación y exposición de un número diferente de grupos funcionales, estos cambios también influyeron en la formación de las interacciones electrostáticas y el desarrollo de diferentes estructuras.

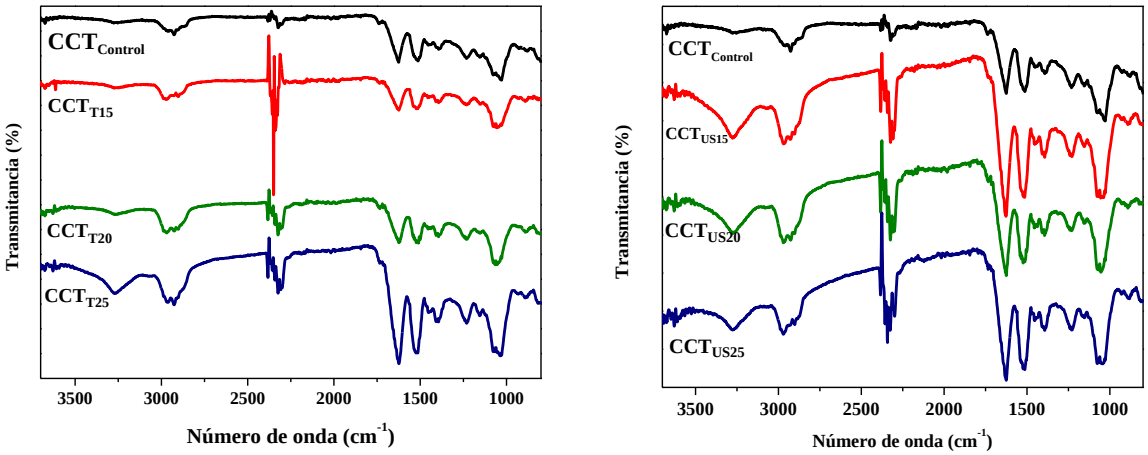
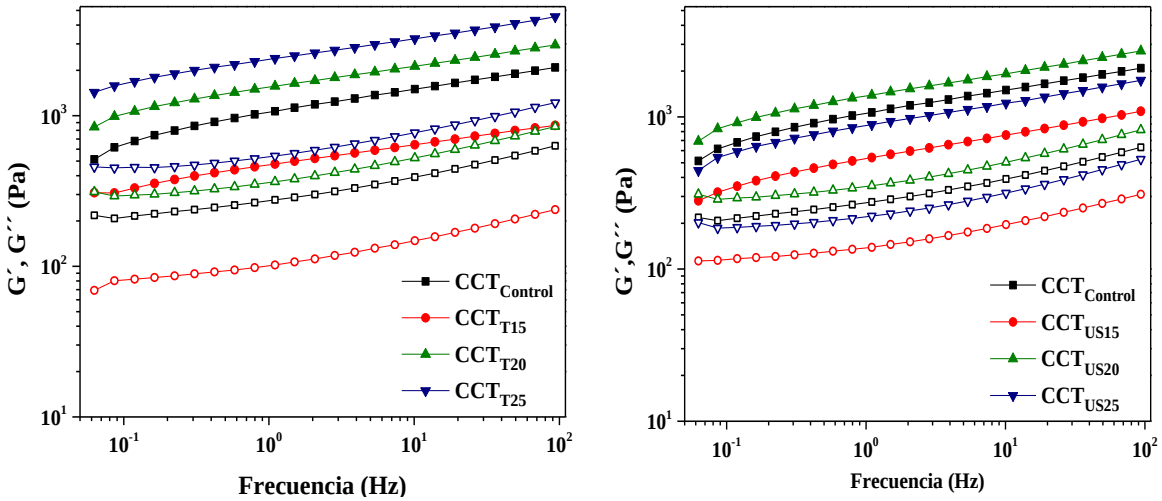


Figura 7. Espectros FTIR de CCT formados con WPI sin tratar (Control), a) con preacondicionamiento de WPI con temperatura (T) o b) ultrasonido (US).

Los módulos elástico (G´) y viscoso (G´´) de CCT se muestran en la Figura 8. En todos los casos G´ > G´´ indicando un comportamiento viscoelástico predominantemente tipo sólido. Dong et al. (2021) informaron que el comportamiento viscoelástico en CCT está estrechamente relacionado con una construcción tipo gel, debido a la red formada durante el proceso de entrecruzamiento entre la proteína y los polisacáridos que permiten atrapar moléculas de agua. El proceso de preacondicionamiento en WPI, T o US, también afectó la magnitud de G´ y G´´, tanto en CCT_{T15} como en CCT_{US15}, ambos módulos fueron menores a los exhibidos por el $CCT_{Control}$. En el caso de CCT_{T20} y CCT_{T25}, el incremento del tiempo de tratamiento T provocó un comportamiento sólido-viscoelástico mayor que el mostrado

por $CCT_{Control}$, lo que indica que este tipo de procesamiento genera interacciones más fuertes entre las moléculas de WPI-AI cuando se utilizan tiempos más prolongados de calentamiento de proteínas. Por otro lado, la aplicación de US para la desnaturalización de WPI no tuvo el mismo efecto que el tratamiento T, CCT_{US15} y CCT_{US25}, solo el CCT_{US20} presentó valores más altos en los módulos viscoelásticos, destacando la relevancia del proceso utilizado para modificar la estructura de WPI para mejorar su actividad superficial y lograr la formación de sistemas mejor estructurados. Con base en estos resultados, se determinó que las condiciones para formar CCT fueron: pH_{CC} 3.0 y $R_{WPI:AI}$ de 1.0:1.0, y tiempo de preacondicionamiento de 20 min tanto para procesos T como para US.



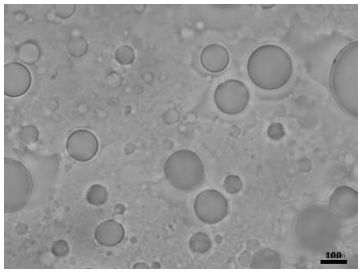
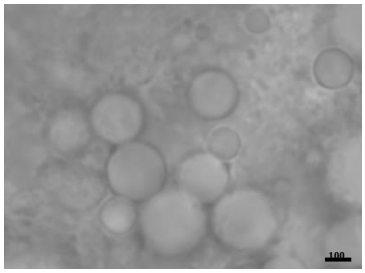
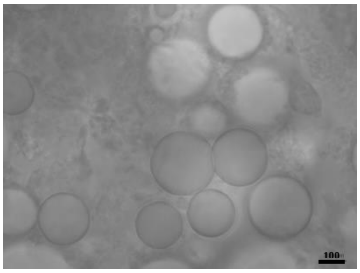
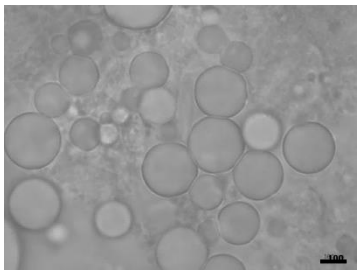
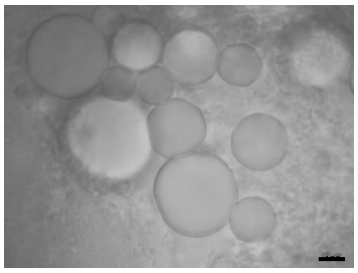
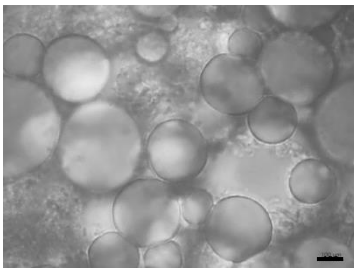
(a) (b)

Figura 8. Propiedades viscoelásticas de CCT formados con WPI sin tratar (Control), a) con preacondicionamiento de WPI con temperatura (T) o b) ultrasonido (US). G´ (símbolos rellenos) y G´´ (símbolos vacíos).

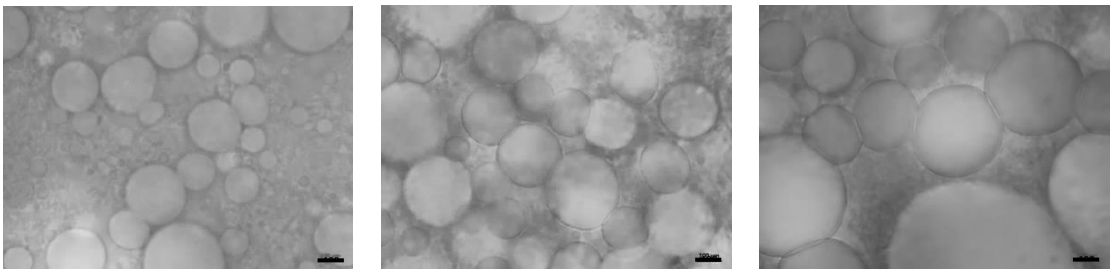
7.3. Formación y caracterización de emulgeles O/W

Los emulgeles O/W estabilizados con CCT_{T20} y CCT_{US20} (ET y EUS) exhibieron la formación de gotas de aceite esféricas (Figura 9) con tamaños de gota homogéneos, pero de mayor tamaño que los obtenidos con $CCT_{Control}$ (EC). $ET_{0.20}$ presentó tamaños más pequeños (50-200 μm) en comparación con $ET_{0.30}$ y $ET_{0.50}$, donde los diámetros de tamaño

de gota oscilaron entre 100-300 μm. Los emulgeles $EUS_{0.30}$ (200-300 μm) y $EUS_{0.50}$ (100-300 μm) mostraron diámetros de gota más grandes que los exhibidos por $EUS_{0.20}$ (50-200 μm). En todos los casos las gotas de aceite mantuvieron su integridad individual, también se notaba la agregación de algunas gotas; este comportamiento puede estar asociado a la estructura gelificada de los CCT utilizados para la formación del emulgel, lo que proporciona una red 3-D reticulada de biopolímeros que no solo contienen las gotas de aceite incrustadas en la matriz del CCT, sino que también actúan como una barrera mecánica. Resultados similares en morfología y tamaño de gota se han encontrado para emulgeles elaborados con enzima tirosinasa-reticulada-proteína de patata-zeína, con tamaños de gota alrededor de 310 μm (Glusac et al., 2018), y en la estabilización de emulsiones Pickering con geles WPI, con tamaños de gota que oscilan entre 40 y 170 μm a medida que la fracción de aceite aumenta de 0.2 a 0.7 (Lv et al., 2020).

	ϕ=0.20	**ϕ=0.30**	**ϕ=0.50**
EC			
	D_{10}=93.33±8.16 μm *EE*=91.30±0.31 %	D_{10}=160.00±7.07 μm *EE*=90.06±0.78 %	D_{10}=197.22±15.14 μm *EE*=88.54±1.22 %
ET			
	D_{10}=136.53±13.63 μm *EE*=98.03±0.36 %	D_{10}=193.75±7.15 μm *EE*=96.62±0.27 %	D_{10}=205.88±7.42 μm *EE*=95.12±0.62 %

EUS



D_{10}=144.79±12.20 μm | D_{10}=186.11± 12.92μm | D_{10}=292.85±20.11 μm

EE=99.69±0.11 % | *EE*=99.52±0.06 % | *EE*=99.01±0.12 %

Figura 9. Morfología de los emulgeles EC, ET, EUS empleando (ϕ=0.20, 0.30 y 0.50) obtenidas por microscopía óptica (100×).

La eficiencia de encapsulación (*EE*) de la fase oleosa en los emulgeles se muestra en la Figura 9. Todos los sistemas de emulgel tuvieron valores de *EE* por encima del 90% de encapsulación. Se encontraron diferencias significativas en *EE* de los sistemas de emulgeles, no sólo por el valor de ϕ, sino también por el tipo de WPI ($WPI_{Control}$, WPI_T o WPI_{US}) utilizado para producir el CCT. El emulgel $ET_{0.20}$ tuvo el *EE* más alto en los emulgeles formados con CCT_{T20}, y disminuyó significativamente ($p \leq 0.05$) a medida que aumentó el contenido de O en la fase dispersa del emulgel. Por otro lado, $EUS_{0.20}$ y $EUS_{0.30}$ tuvieron los valores más altos de *EE* (por encima del 99.50%), seguidos de $EUS_{0.50}$. A partir de estos resultados, la aplicación de US como un proceso de preacondicionamiento para mejorar las propiedades funcionales de WPI conduce a un mejor desempeño no sólo para la formación de complejos coacervados proteína-polisacárido, sino también para el aprovechamiento de estos CCT como materiales tipo gel capaz de formar y estabilizar emulgeles O/W. Se han reportado valores de *EE* similares para sistemas en los que se usaron complejos coacervados de aislado de proteína de soya-goma arábiga (83.19-87.02%), aislado de proteína de lenteja-maltodextrina-alginato (87.9%) o WPI-carboximetilcelulosa (96.21%) para encapsular aceite vegetal (Barbosa et al., 2021; Bordón et al., 2021). Guo et al. (2021b) y Bordón et al. (2023) encontraron que se puede lograr una

EE mejorada cuando se usan sistemas complejos ternarios en lugar de aquellos en los que solo se consideran dos biopolímeros. En este sentido, el uso de mezclas de polisacáridos de AI y WPI preacondicionado permite mejorar sinérgicamente las actividades funcionales y superficiales de CCT.

Tabla 3. Propiedades texturales y estabilidad de formación de crema de emulgels EC, ET y EUS con diferentes fracciones de fase dispersa.

	ϕ	Dureza (N)	Cohesividad	Gomosidad (N)	Resiliencia	Tasa de cremado (%)
EC	0.20	0.11 ± 0.01^{e}	0.47 ± 0.03^{e}	0.05 ± 0.01^{d}	0.02 ± 0.01^{a}	1.378 ± 0.003^{a}
	0.30	0.12 ± 0.01^{e}	0.52 ± 0.01^{d}	0.06 ± 0.01^{d}	0.02 ± 0.01^{a}	1.214 ± 0.018^{b}
	0.50	0.16 ± 0.01^{d}	0.56 ± 0.04^{c}	0.08 ± 0.02^{c}	0.03 ± 0.01^{a}	1.099 ± 0.006^{c}
ET	0.20	0.17 ± 0.01^{d}	0.58 ± 0.06^{c}	0.09 ± 0.01^{c}	0.02 ± 0.01^{a}	0.336 ± 0.012^{e}
	0.30	0.20 ± 0.01^{c}	$0.68\pm0.04^{a,b}$	0.14 ± 0.01^{b}	0.02 ± 0.01^{a}	0.234 ± 0.006^{f}
	0.50	0.23 ± 0.00^{b}	0.72 ± 0.04^{a}	0.17 ± 0.01^{a}	0.02 ± 0.00^{a}	0.204 ± 0.006^{g}
EUS	0.20	0.19 ± 0.01^{c}	0.66 ± 0.00^{b}	0.13 ± 0.01^{b}	0.03 ± 0.01^{a}	1.092 ± 0.000^{c}
	0.30	$0.18\pm0.04^{c,d}$	0.58 ± 0.05^{c}	0.11 ± 0.04^{b}	0.02 ± 0.01^{a}	0.324 ± 0.024^{e}
	0.50	0.28 ± 0.00^{a}	0.61 ± 0.04^{c}	0.17 ± 0.01^{a}	0.02 ± 0.01^{a}	0.486 ± 0.012^{d}

Letras diferentes en la misma columna significan diferencias significativas entre valores en $p \leq 0.05$.

7.4. Propiedades texturales de emulgeles

La Tabla 3 muestra las propiedades de textura de los emulgeles EC, ET y EUS. La dureza en los emulgeles aumentó a medida que aumentó el valor de ϕ, a pesar del tipo de CCT utilizado como estabilizador, siendo ET los sistemas con mayor dureza, seguido de EUS y EC. Este comportamiento está asociado con el mayor contenido de aceite de canola, la mayor resistencia estructural desarrollada por los sistemas CCT y el tamaño y distribución de las gotas en los emulgeles. La cohesividad y la gomosidad, propiedades relacionadas con la capacidad de cualquier material para retener su forma después de dos ciclos de compresión y con la energía requerida para desintegrar un material semisólido a un estado listo para somerar, también fueron influenciadas por el contenido de aceite en el emulgel, con diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en cuanto al tipo de CCT utilizado como

estabilizador. La propiedad de resiliencia, generalmente definida como qué tan bien un material "lucha por recuperar su altura original", no mostró diferencias significativas entre los tratamientos ni por efecto del contenido de aceite dentro de los emulgeles. En base a estos resultados, se puede inferir que la obtención de altos rendimientos de coacervación e interacciones más fuertes en los sistemas WPI-AI a través de los procesos de preacondicionamiento en WPI, permiten generar estructuras suficientemente resistentes, que no solo pueden cargar altos contenidos de fases oleosas, sino que también favorecen el desarrollo de propiedades texturales en sistemas tipo gel.

7.5. Propiedades reológicas de emulgeles

La Figura 10 muestra las propiedades reológicas de flujo y oscilatorias para los emulgeles. Todos los sistemas mostraron un comportamiento pseudoplástico, es decir, materiales que exhiben un adelgazamiento por cizallamiento (n<1), donde $ET_{0.50}$ y $EUS_{0.50}$ exhibieron la mayor consistencia, disminuyendo a medida que disminuía el contenido de aceite (ϕ) en el emulgel. Las propiedades viscoelásticas mostraron para todos los emulgeles que G´ > G´´ en todo el intervalo de frecuencia. Se han informado resultados similares en emulgeles O/W para aceite de oliva (ϕ=0.40) emulsionado en mucílago de chía-colágeno, carragenina, proteína de suero, alginato, carboximetilcelulosa o mezclas de transglutaminasa, donde el comportamiento típico de gel (G´ > G´´) (Câmara et al., 2020).

Los tratamientos EC no mostraron diferencias en los perfiles de viscosidad aparente entre los contenidos de aceite, contrario a lo observado en los tratamientos realizados con los dos tipos de WPI preacondicionados. Se observó que mayores cantidades de aceite en el emulgel conducían a mayores valores del componente elástico (G´). El proceso de preacondicionamiento para el WPI consistente en calentamiento también influyó en la

magnitud de las propiedades viscoelásticas, con valores superiores a los apreciados para el proceso de preacondicionamiento por ultrasonidos. Este comportamiento podría estar relacionado, como se describió anteriormente, con los diferentes mecanismos de reordenamiento estructural que sufren las proteínas del suero, el desarrollo de diferentes interacciones con los polisacáridos y la capacidad del CCT para formar capas viscosas alrededor de las gotas de aceite y redes tridimensionales más fuertes que contribuyen a construir sistemas más sólidos y enlaces más fuertes entre los componentes del biopolímero (Montes de Oca-Ávalos et al., 2020).

El efecto de la temperatura en las propiedades viscoelásticas de los emulgeles también se muestra en la Figura 10. El aumento de temperatura provocó el desarrollo de tres zonas con diferente comportamiento viscoelástico. La zona I mostró una ligera disminución en los módulos G´ y G´´ antes de exhibir una fuerte caída del módulo G´, la amplitud de esta región varió entre los tratamientos, desde 20 °C para todos los emulgeles, y hasta 31.4 ± 3.21 °C para EC, 44.87 ± 0.61 °C para ET y 40.53 ± 4.14 °C para EUS, respectivamente. Esta primera zona de transición está relacionada con el reordenamiento de los enlaces entre los polímeros y la fase oleosa que conduce al debilitamiento de la estructura similar a un gel. La zona II comprende una reducción drástica de los módulos hasta alcanzar un valor mínimo, esta zona se ubicó al final de la zona I y hasta 62.1 ± 2.02 °C para EC, 57.67 ± 2.29 °C para ET y 52.63 ± 5.25 °C para EUS, respectivamente. Esta reducción está relacionada con la disminución de las interacciones intramoleculares e intermoleculares entre los biopolímeros y sus interacciones con la fase oleosa, lo que hace que los emulgeles sean materiales similares a geles más débiles (Wen-qiong et al., 2021). Mayores cantidades de aceite en el emulgel mostraron una menor reducción en las propiedades viscoelásticas. Para temperaturas superiores a 62 °C para EC, 69.2 °C para $ET_{0.20}$ y 64.2 °C para EUS

(zona III) los módulos G´ y G´´ mostraron un aumento en su magnitud, este comportamiento podría estar asociado a la formación de nuevas interacciones no covalentes entre la proteína, los polisacáridos y la fase oleosa, contribuyendo a mejorar la dureza del gel (Wagner et al., 2020). En el caso de $ET_{0.30}$ y $ET_{0.50}$, no se evidenció que el fortalecimiento de la estructura se produjera dentro del rango de temperatura evaluado.

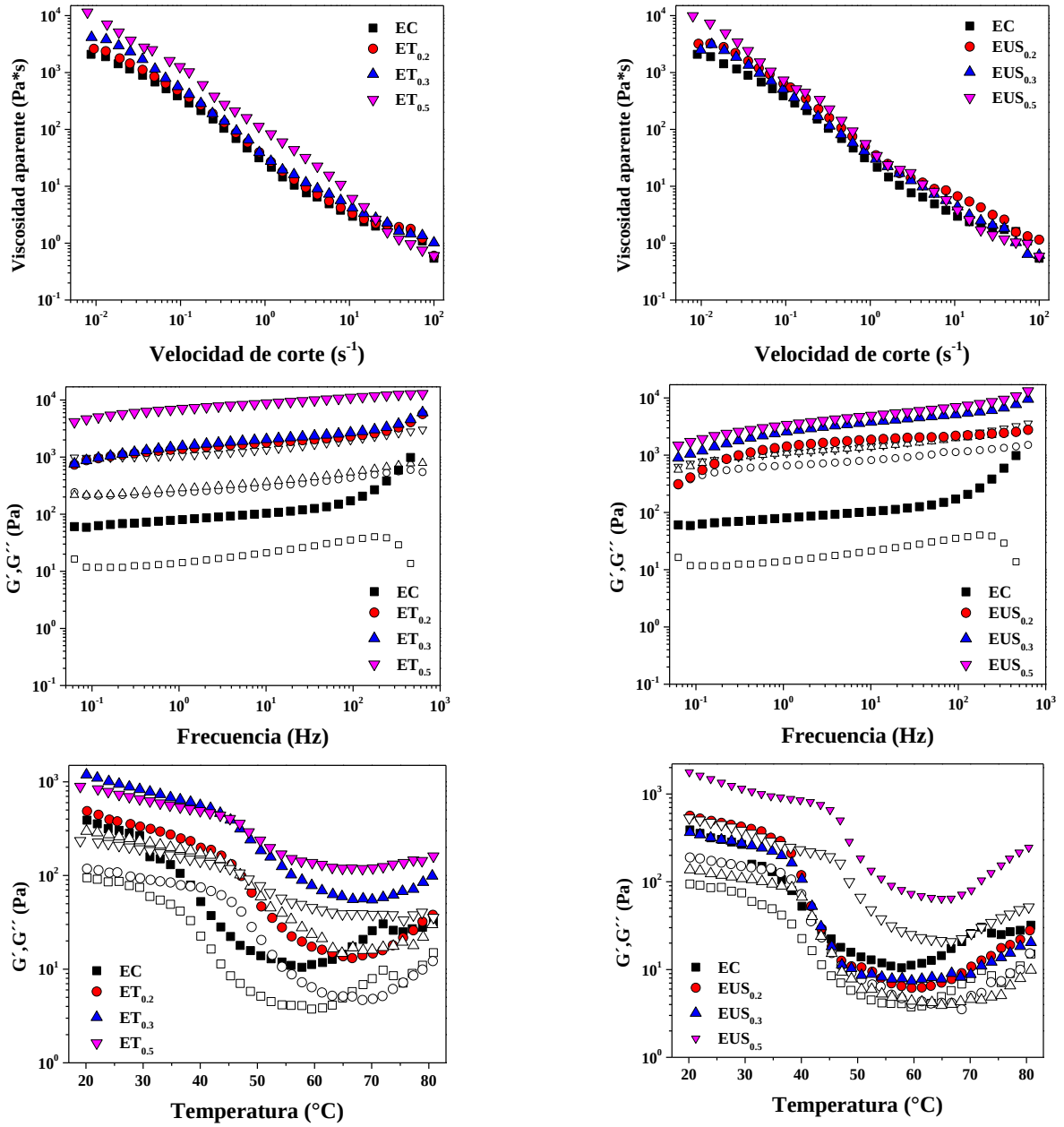


Figura 10. Comportamiento de flujo (superior), módulos viscoelásticos G´ y G´´ (medio) y estabilidad viscoelástica frente a la temperatura (inferior) para emulgeles estabilizados con $CC_{WPI:AI}$ formados con WPI preacondicionado. G´ (símbolos rellenos) y G´´ (símbolos vacíos).

Estas características pueden brindar ventajas en la aplicación de emulgeles, al exhibir estabilidad estructural térmica, en formulaciones de alimentos que requieren tratamiento térmico durante su procesamiento (Nasirpour-Tabrizi et al., 2020). Es de destacar que los tratamientos ET mostraron cambios menores en la magnitud de los módulos viscoelásticos que los observados para los tratamientos EC y EUS, mostrando que estos emulgeles fueron menos afectado por el aumento de temperatura, mostrando más estabilidad para mantener el comportamiento similar al gel.

7.6. Estabilidad física de emulgeles

La estabilidad contra fenómenos agregativos en los emulgeles fue evaluada utilizando una centrífuga analítica multimuestra basada en la tecnología STEP (perfiles de extinción resueltos en el espacio-tiempo). La Figura 11 (gráficos del lado derecho) muestra la progresión de la desestabilización de las gotas de aceite en los emulgeles hechos a ϕ=0.50, debido a que en estos sistemas fue más evidente el mecanismo de formación de una fase cremada debido al aumento de los perfiles de transmisión en la parte superior de la celda. A medida que avanzaba la fase cremada, la concentración de gotas aumentaba en la región del menisco y, por lo tanto, aumentaba la transmisión de luz, indicando mayor cambio en la distribución y tamaño de las gotas de fase dispersa.

La separación de fases fue diferente dependiendo del tipo de CCT utilizado para estabilizar el emulgel, siendo el EC el tratamiento donde se logró mayor separación de fases. En el caso de los emulgeles ET el proceso de cremado fue menor al observado en EUS, como se registra en la Tabla 3 para el parámetro tasa de cremado. Aunque todos los sistemas evaluados presentaron una apariencia homogénea, sin aparente separación de fases visible cuando se dejaron reposar, la prueba de estabilidad acelerada demuestra que

aquellos estabilizados con CCT con WPI sin tratar dieron como resultado sistemas menos estables, lo que llevó a la separación de fases que condujo al fenómeno de formación de crema, seguido de los emulgeles formados con CCT con WPI_{US}, mientras que los emulgeles en los que se utilizó WPI_T dieron como resultado los sistemas más estables.

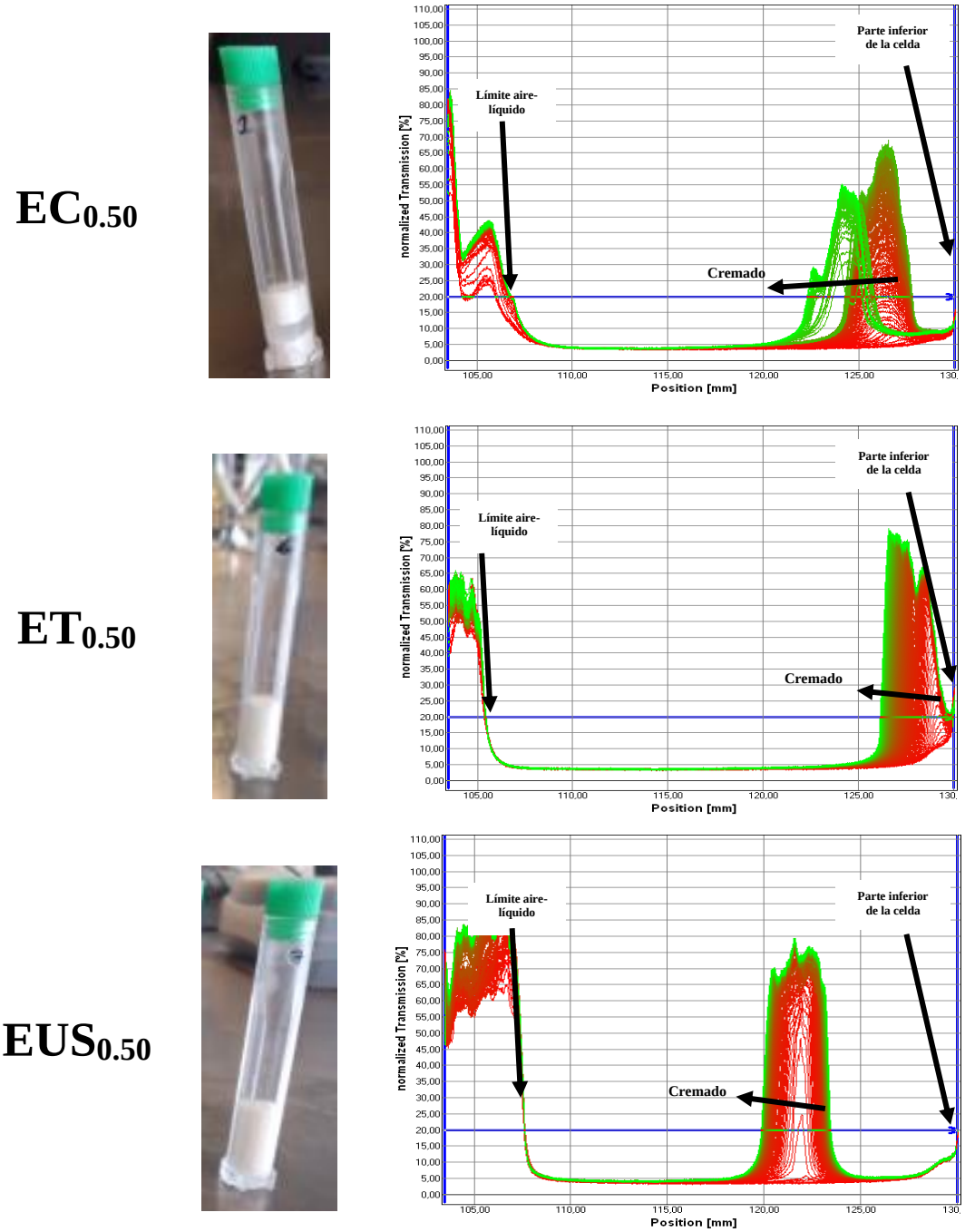


Figura 11. Perfiles de transmisión de emulgeles O/W estabilizados con CCT y WPI_{US} a ϕ=0.50.

7.7. Composición proximal de muestras de yogur tipo Griego

Se incorporó emulgel a distintas concentraciones en yogur tipo Griego con la finalidad de remplazar parcialmente el contenido graso en su formulación y evaluar su efecto en las propiedades fisicoquímicas del alimento. Los parámetros químico-proximales de los distintos tratamientos se reportan en la Tabla 4. Se observaron diferencias significativas en los valores de pH, acidez titulable, proteína, grasa, cenizas y sinéresis ($p \leq 0.05$). A medida que se adicionó una mayor cantidad de emulgel a las muestras de yogur, hubo una mayor disminución en los valores de pH, esto puede ser ocasionado por la presencia de CCT (pH 3.0) que se utilizaron para la formación del emulgel. De igual manera, la acidez titulable es un reflejo inverso del pH, por lo que se vio incrementada en sus valores a medida que el contenido de emulgel presente en el yogur se incrementó. No obstante, $GSYE_{10}$ y $GSYE_{15}$ no mostraron diferencia significativa ($p > 0.05$) en los valores de pH. El pH y la acidez titulable son parámetros que pueden proporcionar información sobre la calidad de productos alimenticios, como los lácteos. El pH puede evaluar la capacidad de los microorganismos para crecer en un alimento específico, mientras que la acidez titulable es un predictor de cómo los ácidos orgánicos presentes en los alimentos influyen en el sabor de estos. La incorporación de ingredientes funcionales naturales a los yogures puede cambiar positiva o negativamente el pH y la acidez titulable según el tipo y la cantidad de ingredientes, así como el tiempo de almacenamiento (Rashwan et al., 2023).

El contenido de proteína tuvo un comportamiento ascendente en los tratamientos RFGSY adicionados con emulgel y mayores que FFGSY, esto debido a la presencia de WPI en la estructura de los CCT utilizados para la formación del emulgel. Por su parte, el contenido de grasa disminuyó significativamente ($p > 0.05$) en los tratamientos en

comparación a FFGSY; dicha disminución osciló entre 68.50-82.33% para GSY´s y 85.07% para RFGSY. No obstante, se observó un ligero incremento de este parámetro por efecto de la adición de un mayor porcentaje de emulgel. En sentido contrario al contenido de proteína y grasa, se observó una ligera disminución en el contenido de cenizas ($p \leq 0.05$), siendo $GSYE_5$ y $GSYE_{10}$ los que mostraron valores similares ($p > 0.05$). Finalmente, el porcentaje de sinéresis estuvo en valores entre 2.94-8.17%, observándose que el contenido de emulgel adicionado en muestras GSY´s influyó en un incremento de este parámetro. $GSYE_5$, por su parte, no mostró diferencia significativa en comparación con RFGSY ($p > 0.05$). Debido a la reorganización de la estructura proteica y el debilitamiento de la red de gel, por efecto de adición de cierto porcentaje de emulgel, la matriz proteica tiene una capacidad limitada para mantener y atrapar toda la fase sérica, produciendo de esta manera una mayor expulsión del suero (Izadi et al., 2015).

Tabla 4. Composición química proximal del yogur tipo Griego bajo en grasa con incorporación de emulgel a diferentes concentraciones.

	pH	Acidez titulable (% ac. láctico)	Proteína (%)	Grasa (%)	Cenizas (%)	Sinéresis (%)
FFGSY	4.01 ± 0.02^{b}	1.62 ± 0.08^{d}	09.46 ± 0.16^{d}	7.30 ± 0.05^{a}	0.74 ± 0.01^{d}	2.94 ± 0.17^{d}
RFGSY	4.15 ± 0.02^{a}	2.34 ± 0.08^{c}	11.94 ± 0.13^{c}	1.09 ± 0.01^{e}	1.08 ± 0.02^{a}	6.95 ± 0.04^{c}
$GSYE_5$	4.01 ± 0.02^{b}	2.48 ± 0.06^{b}	12.80 ± 0.09^{b}	1.29 ± 0.01^{d}	0.99 ± 0.01^{b}	6.82 ± 0.09^{c}
$GSYE_{10}$	3.96 ± 0.01^{c}	2.57 ± 0.06^{a}	12.99 ± 0.15^{b}	1.75 ± 0.02^{c}	0.97 ± 0.01^{b}	7.72 ± 0.08^{b}
$GSYE_{15}$	3.92 ± 0.02^{d}	2.61 ± 0.08^{a}	13.21 ± 0.03^{a}	2.30 ± 0.02^{b}	0.91 ± 0.02^{c}	8.17 ± 0.18^{a}

Letras diferentes en la misma columna significan diferencias significativas entre valores en $p<0.05$.

7.8. Microestructura de muestras de yogur

Las imágenes SEM de la estructura de los tratamientos de yogur son presentados en la Figura 12. FFGSY mostró una compactación de la matriz de caseína, así como una red más compacta. Por otro lado, RFGSY mostró una red tridimensional más diferenciada y menos densa en comparación a FFGSY. En todos los tratamientos se observa la presencia de microorganismos, específicamente *estreptococos* y *lactobacilos*, los cuales son

característicos en la producción de yogur. Además, la adición de un porcentaje de emulgel modificó la estructura del yogur; se observaron estructuras menos dispersas y más fusionadas ocasionadas, principalmente, a la restructuración de la matriz proteica y posiblemente un buen acomodo e interacción entre la estructura del emulgel y la caseína gelificada en el yogur.

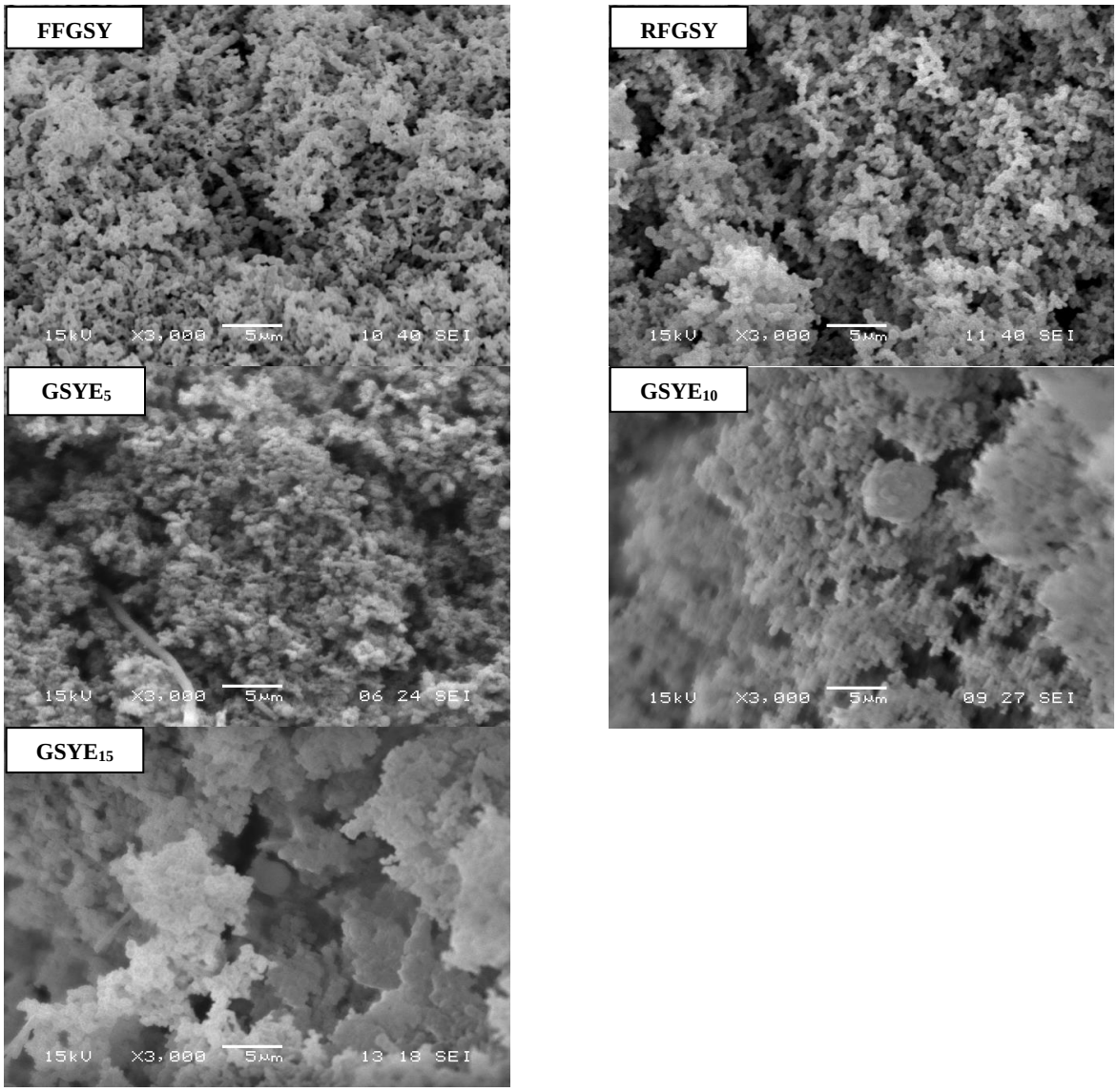


Figura 12. Imágenes SEM de muestras de yogur tipo Griego utilizando distintas concentraciones de emulgel.

Este impacto sobre la microestructura se encuentra alineado con el comportamiento reológico y sus propiedades fisicoquímicas (Wu et al., 2023; Naihabo et al., 2022). Comportamiento similar fue reportado por Li et al. (2022b); incorporaron aceite de maíz encapsulado con complejos WPI-pectina como sustituto de grasa y observaron una matriz proteica más densa y compacta en yogur bajo en grasa.

7.9. Análisis textural de muestras de yogur

La Tabla 5 muestra los valores obtenidos de los distintos tratamientos con relación a las propiedades texturales. Los parámetros de dureza, adhesividad, cohesividad y elasticidad en GSY´s mostraron diferencias significativas por efecto de la adición de emulgel ($p \leq 0.05$). RFGSY fue quien presentó la mayor dureza, esto ocasionado por la fuerte compactación de la matriz proteica por ausencia de la grasa láctea. En contraste, la dureza disminuyó a medida que incrementó el porcentaje de emulgel en GSY´s, aun así, se obtuvieron yogures más duros en comparación con FFGSY. Asimismo, se observó un incremento en la adhesividad; RFGSY y $GSYE_5$ no mostraron diferencias ($p > 0.05$). Comportamiento similar fueron reportados por Dou et al. (2022) y Osorio-Arias et al. (2020), sugiriendo que la presencia de otros componentes en la formulación de un yogur tipo Griego puede alterar la formación de complejos proteicos, lo que afecta la dureza y la adhesividad. El análisis de la cohesividad reveló que FFGSY, $GSYE_{10}$ y GSY_{15} no exhibieron diferencia significativa ($p > 0.05$), mientras que RFGSY fue menos cohesivo y elástico. La elasticidad de los tratamientos incrementó a medida que aumentaba el contenido de emulgel presente en su formulación, siendo FFGSY quien mostró una mayor elasticidad ($p \leq 0.05$). Estas características, de manera global, pueden relacionarse con los

resultados sensoriales obtenidos, ya que una menor dureza y cohesividad, así como un incremento en la elasticidad generó productos más cremosos en comparación a RFGSY.

Tabla 5. Parámetros texturales del yogur tipo Griego bajo en grasa con incorporación de emulgel a diferentes concentraciones.

	Dureza (N)	**Adhesividad (mJ)**	**Cohesividad (ad)**	**Elasticidad (ad)**
FFGSY	0.27 ± 0.02^{e}	-0.28 ± 0.04^{d}	0.65 ± 0.03^{b}	0.83 ± 0.02^{a}
RFGSY	0.66 ± 0.02^{a}	-0.91 ± 0.08^{a}	0.45 ± 0.03^{c}	0.69 ± 0.02^{d}
GSYE$_5$	0.48 ± 0.01^{b}	-0.81 ± 0.03^{a}	0.72 ± 0.02^{a}	0.73 ± 0.01^{c}
GSYE$_{10}$	0.36 ± 0.01^{c}	-0.51 ± 0.02^{b}	0.68 ± 0.02^{b}	0.79 ± 0.01^{b}
GSYE$_{15}$	0.33 ± 0.01^{d}	-0.43 ± 0.04^{c}	0.63 ± 0.02^{b}	0.77 ± 0.02^{b}

Letras diferentes en la misma columna significan diferencias significativas entre valores en $p \leq 0.05$.

7.10. Comportamiento reológico de muestras de yogur

La Figura 13 muestra el comportamiento reológico de los distintos tratamientos de yogur tipo Griego. Se observó un comportamiento predominantemente elástico en todo el rango de frecuencia estudiado ($G´ > G´´$); GSYE$_5$ fue quien presentó mejores propiedades viscoelásticas seguido de FFGSY, RFGSY y GSYE$_{10}$, respectivamente. Por su parte, GSYE$_{15}$ tuvo un comportamiento viscoelástico menor en comparación a los demás tratamientos y se vio influenciado por presentar el mayor porcentaje de emulgel adicionado (Figura 12a). Estas características son comparables con los resultados obtenidos por Osorio-Arias et al. (2020), indicando que dicho comportamiento se debe a la tendencia a formar redes macromoleculares en la matriz de yogur. También, se observó que RFGSY presentó una mayor viscosidad en comparación a los demás tratamientos, esto posiblemente por la poca presencia de grasa láctea y una reducida cantidad de suero, lo que generó una matriz proteica más dura, a su vez GSYE$_{15}$ fue quien mostró una menor viscosidad y posiblemente debido a características inversas de RFGSY, es decir, menor dureza y mayor presencia de suero (Figura 12b). Oliveira et al. (2023) y Rocha et al. (2022) reportaron perfiles de flujo pseudoplástico típicos similares en yogur tipo Griego, donde la viscosidad

disminuyó al aumentar las velocidades de corte; además, el material del núcleo de las partículas adicionadas puede afectar η*. Los perfiles de G* (Figura 12c) muestran que la adición de emulgel en $GSYE_5$ desarrolló una fuerza de gel en la matriz de proteína, superior a FFGSY y a los demás tratamientos. Por otro lado, en la Figura 12d se observó una disminución generalizada de los valores de η* conforme incrementó ω, en la que $GSYE_5$ y FFGSY mostraron tendencias similares, esto principalmente a la capacidad del yogur de formar redes de gel más elásticas al interaccionar con la estructura del emulgel.

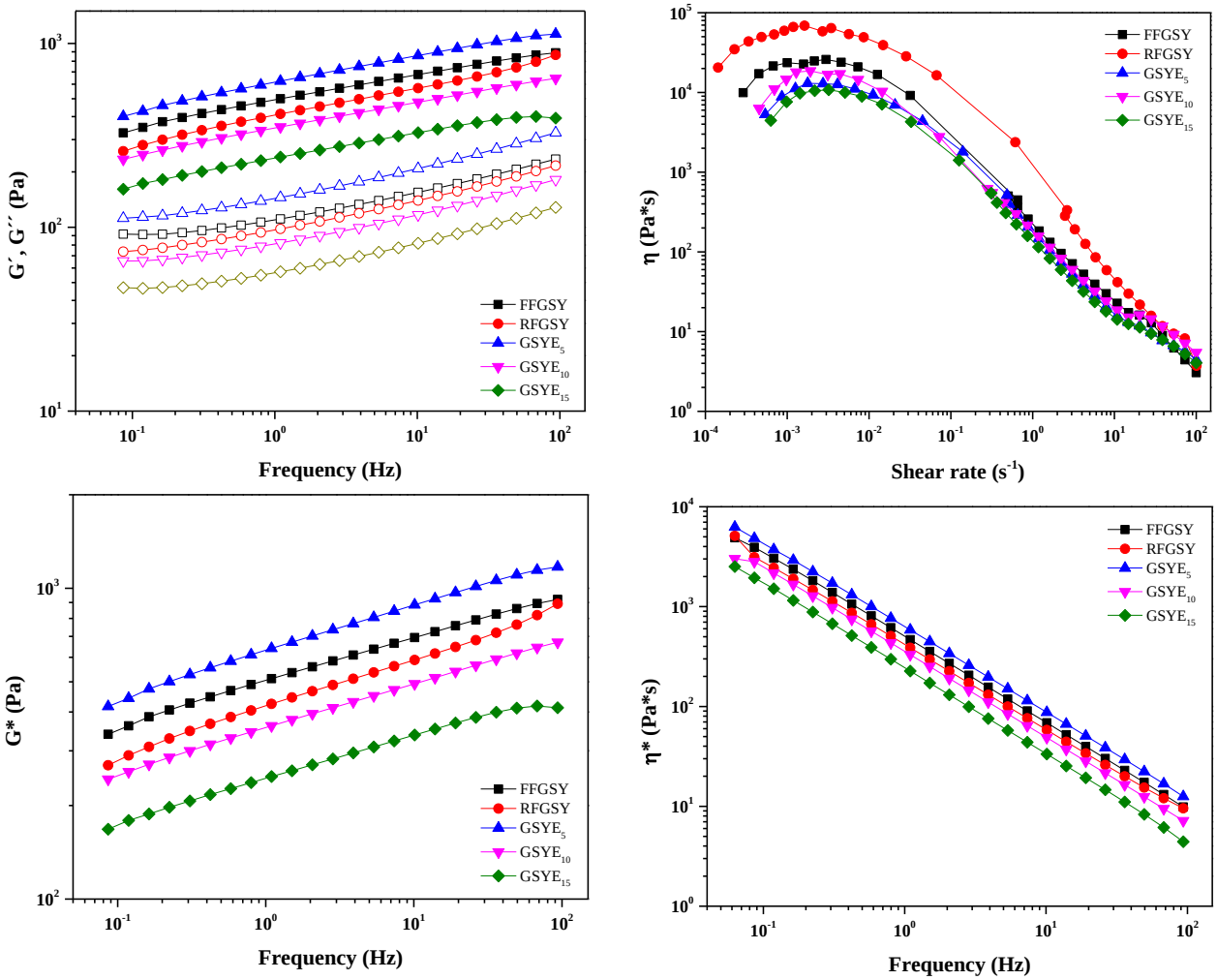


Figura 13. Características reológicas de yogur tipo Griego a diferentes concentraciones de emulgel.

La Tabla 6 muestra los valores estimados de la fuerza y el grado de gelificación de los distintos tratamientos. De acuerdo con Kieserling et al. (2019), clasificar la fuerza de un gel

en yogur dependerá si S1 está en un valor < 0.2, S2 cercanos a cero y S3 valores cercanos a -1. RFGSY, $GSYE_5$ y $GSYE_{10}$ mostraron valores similares y superiores en S1 ($p \leq 0.05$) en comparación a FFGSY. S2 mostró diferencias significativas siendo RFGSY, $GSYE_5$ y $GSYE_{15}$ los más cercanos a cero. $GSYE_{15}$ presentó diferencia significativa ($p \leq 0.05$) y más cercana a -1 en S3. $GSYE_5$ mostró un valor superior en *A* con respecto a los demás tratamientos y seguido de FFGSY, lo cual indica una mayor firmeza con la adición del emulgel debido al aumento de la fuerza de gel. Asimismo, los GSY´s con cierto porcentaje de emulgel fueron los que presentaron un mayor factor de interacción (*z*) con respecto a RFGSY, esto puede ser interpretado en una mayor fuerza de gel y mayor consistencia. FFGSY y $GSYE_{15}$ presentaron los valores similares ($p > 0.05$) y mayor fuerza de interacción de la matriz proteica (Costa et al., 2019).

Tabla 6. Parámetros reológicos de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel en diferentes concentraciones.

	FFGSY	**RFGSY**	**$GSYE_5$**	**$GSYE_{10}$**	**$GSYE_{15}$**
dlog|G*|/ dlog(ω)	0.1437 ± 0.0032^{b}	0.1534 ± 0.0041^{a}	0.1493 ± 0.0017^{a}	0.1508 ± 0.0026^{a}	0.1369 ± 0.0029^{c}
dlog|tanδ|/ dlog(ω)	-0.0101 ± 0.0002^{b}	-0.0053 ± 0.0008^{c}	-0.0048 ± 0.0012^{c}	-0.0201 ± 0.0009^{a}	-0.0061 ± 0.0005^{c}
dlog|η*|/ dlog(ω)	-0.8562 ± 0.0033^{b}	-0.8466 ± 0.0029^{c}	-0.8507 ± 0.0017^{b}	-0.8493 ± 0.0013^{c}	-0.8631 ± 0.0021^{a}
A	14.814 ± 0.520^{b}	13.758 ± 0.670^{c}	16.340 ± 0.330^{a}	12.701 ± 0.410^{c}	10.842 ± 0.640^{d}
Z	6.959 ± 0.480^{a}	6.519 ± 0.350^{c}	6.698 ± 0.270^{b}	6.631 ± 0.390^{b}	7.305 ± 0.220^{a}

Letras diferentes en la misma fila significan diferencias significativas entre valores en $p \leq 0.05$.

7.11. Características sensoriales de muestras de yogur

La evaluación sensorial es uno de los factores primordiales para el control de calidad de los alimentos y conocer la satisfacción por parte de los consumidores (Kim et al., 2023). De los cinco parámetros del perfil sensorial evaluados, la Figura 14 ilustra que FFGSY obtuvo los puntajes más altos con excepción en el parámetro "sabor residual", observándose, además, diferencias significativas entre los tratamientos ($p \leq 0.05$) (Tabla 7).

A medida que se incrementó el contenido de emulgel se mejoró el carácter "liso", de "cremosidad" y una mayor "aceptación global" del yogur. Además, se identificó que $GSYE_{15}$ mostró un mayor "sabor residual", esto de acuerdo con la evaluación por parte de los panelistas. Por su parte, FFGSY, $GSYE_{15}$ y RFGSY, presentaron condiciones de acidez estadísticamente similares ($p > 0.05$). Comportamiento similar fue observado por Amiri et al. (2024) al adicionar nanoliposomas cargados con extracto de melón amargo a una matriz de yogur. Aunque los tratamientos adicionados con emulgel no emularon plenamente las características sensoriales de un yogur tipo Griego completo en grasa, si mejoró dichos parámetros y mostraron una buena aceptación en comparación a RFGSY. Gkitsaki et al. (2024) mencionan que valores medios por encima de 3.0 (ni me gusta ni me disgusta), podría ser interpretado como una aceptación satisfactoria por parte de los panelistas. Los parámetros sensoriales pudieron verse influenciados por la composición química y la sinéresis de los tratamientos, provocando una estrecha relación con la textura y características reológicas obtenidas en esta investigación. La aceptación general por parte de los consumidores de los materiales con componentes grasos depende en gran medida de las propiedades reológicas (Marangoni et al., 2020).

Tabla 7. Parámetros sensoriales de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel a distintas concentraciones.

	FFGSY	**RFGSY**	**$GSYE_5$**	**$GSYE_{10}$**	**$GSYE_{15}$**
Grumoso/liso	3.70 ± 0.65^{a}	2.76 ± 0.51^{c}	2.87 ± 0.49^{c}	3.11 ± 0.46^{b}	3.03 ± 0.62^{b}
Cremosidad	4.21 ± 0.40^{a}	3.48 ± 0.51^{c}	3.53 ± 0.58^{c}	3.53 ± 0.54^{c}	3.76 ± 0.61^{b}
Acidez	3.45 ± 0.56^{a}	3.37 ± 0.56^{a}	3.18 ± 0.55^{b}	3.18 ± 0.63^{b}	3.37 ± 0.62^{a}
Sabor residual	2.89 ± 0.60^{c}	2.97 ± 0.50^{b}	3.18 ± 0.52^{a}	2.87 ± 0.56^{c}	3.21 ± 0.51^{a}
Aceptación global	3.42 ± 0.56^{a}	2.74 ± 0.43^{c}	2.74 ± 0.49^{c}	2.95 ± 0.48^{b}	3.00 ± 0.56^{b}

Letras diferentes en la misma fila significan diferencias significativas entre valores en $p \leq 0.05$.

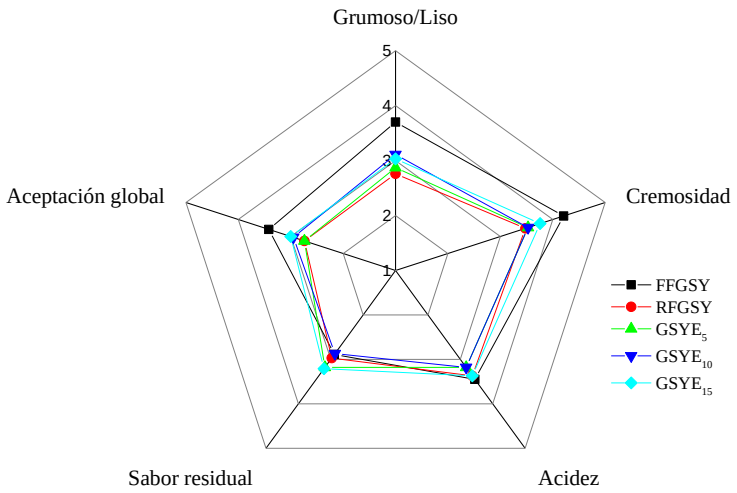


Figura 14. Análisis sensorial de yogur tipo Griego bajo en grasa adicionado con emulgel en diferentes concentraciones.

8. Conclusiones

La aplicación de procesos de preacondicionamiento, como temperatura o ultrasonido en WPI, permitió modificar las estructuras secundarias en la proteína (en comparación con $WPI_{Control}$) y mejorar su actividad superficial con valores de potencial zeta más altos.

Los CCT formados con WPI preacondicionado, T o US, exhibieron mayores interacciones proteína-polisacárido que las observadas cuando se usa WPI sin tratar y desarrollaron estructuras similares a gel con propiedades viscoelásticas mejoradas.

El uso de estos coacervados complejos para la formación de emulgeles O/W mostró excelentes propiedades como estabilizantes y gelificantes, con eficiencias de encapsulación superiores al 95%, estabilidad mejorada frente al cremado, propiedades viscoelásticas y estabilidad térmica para WPI preacondicionados con temperatura, seguido de ultrasonido como proceso de preacondicionamiento.

Este trabajo sienta algunas bases para el uso de tratamientos físicos como la aplicación de calor o ultrasonido, para mejorar las propiedades funcionales en proteínas, no solo mediante la inducción de modificaciones estructurales sino también para aprovechar dichas modificaciones para formar matrices biopoliméricas capaces de transportar y protegiendo compuestos bioactivos y mostrando propiedades estructurales, viscoelásticas y texturales mejoradas que permiten su uso en aplicaciones que requieren atributos específicos de tipo gel.

Por otra parte, la incorporación de sistemas estructurados, como los emulgeles O/W, formados a partir de CCT y aceite de canola permite la sustitución de la grasa láctea en yogur tipo Griego. Agregar este tipo de estructuras logró generar un balance nutricional al aumentar el contenido de proteínas, así como la modulación del contenido graso en yogur

tipo Griego reducido en grasa. Además, el emulgel O/W proveyó al yogur propiedades mecánico-estructurales que favoreció sus condiciones viscoelásticas a fin de mejorar algunos de los parámetros sensoriales como la cremosidad pudiendo mimetizar las características de un yogur tipo Griego completo en grasa. Finalmente, el uso de biopolímeros naturales para la formación y aplicación de sistemas complejos estructurados (emulgeles O/W) permiten expandir la gama de alternativas de sustitutos grasos con potencial aplicación en la industria alimentaria y el desarrollo de nuevos productos saludables.

9. Referencias

Agazzi, M. L., Rovey, M. F. P., Apuzzo, E., Herrera, S. E., Spesia, M. B., De Las Mercedes Oliva, M., & Azzaroni, O. (2023). Lysozyme/tripolyphosphate complex coacervates: Properties, curcumin encapsulation and antibacterial activity. *Food Hydrocolloids*, 145, 109134. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109134

Albano, K.M., Cavallieri, A.L.F. & Nicoletti, V.R. (2020). Electrostatic interaction between soy proteins and pectin in O/W emulsions stabilization by ultrasound application. *Food Biophysics, 15, 297-312*. doi: 10.1007/s11483-020-09625-z

Amiri, Z.R., Erami, S.R., Jafari, S.M., & Ahmadian, S. (2024). Physicochemical properties of yogurt enriched with nanoliposomes containing bitter melon extract. *LWT, 198*, 116091. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116091

Anderson-Dekkers, I., Nouwens-Roest, M., Peters, B., & Vaughan, E. (2021). Inulin. In Handbook of hydrocolloids (pp. 537-562). Woodhead Publishing. doi: 10.1016/B978-0-12-820104-6.00015-2

AOAC. (2019). Official Methods of Analysis, Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C., USA

Báez, L.A., Santos, J., Ramírez, P., Trujillo-Cayado, L.A., & Muñoz, J. (2019). Development of emulgels formulated with sweet fennel oil and rhamsan gum, a

biological macromolecule produced by *Sphingomonas*. *International Journal of Biological Macromolecules, 129: 326–332*. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2019.01.114

Barbosa, A.E.G., Bastos, L.P.H., & Garcia-Rojas, E.E. (2021). Complex Coacervates formed between whey protein isolate and carboxymethylcellulose for encapsulation of β-carotene from Sacha inchi oil: Stability, In vitro digestion and release kinetics. *Food Biophysics, 1-13*. doi: 10.1007/s11483-021-09670-2

Bojorges, H., López-Rubio, A., Martínez-Abad, A., & Fabra, M. J. (2023). Overview of alginate extraction processes: Impact on alginate molecular structure and techno-functional properties. *Trends in Food Science & Technology*, 140, 104142. doi: 10.1016/j.tifs.2023.104142

Bordón, M.G., Barrera, G.N., González, A., Ribotta, P.D., & Martínez, M.L. (2023). Complex coacervation and freeze drying using whey protein concentrate, soy protein isolate and arabic gum to improve the oxidative stability of chia oil. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 103(7), 3322-3333. doi: 10.1002/jsfa.12489

Bordón, M.G., Paredes, A.J., Camacho, N.M., Penci, M.C., González, A., Palma, S.D., Ribotta, P.D., & Martinez, M.L. (2021). Formulation, spray-drying and physicochemical characterization of functional powders loaded with chia seed oil and prepared by complex coacervation. *Powder Technology*, 391, 479-493. doi: 10.1016/j.powtec.2021.06.035

Bourouis, I., McClements, D. J., Chen, C., Li, H., Pang, Z., & Liu, X. (2024). Formulations and evaluations of structural and physico-chemical properties of soy yogurts: Effect of incorporating soy protein isolate/chitosan complexed microgels. *LWT*, 206, 116569. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116569

Bruno, E., Lupi, F.R., Mammolenti, D., Mileti, O., Baldino, N., & Gabriele, D. (2022). Emulgels structured with dietary fiber for food uses: a rheological model. *Foods*, *11*(23), 3866. doi: 10.3390/foods11233866

Câmara, A.K.F.I., Okuro, P.K., Santos, M., Paglarini, C.D.S., da Cunha, R.L., Ruiz-Capillas, C., Herrero, A.M., & Pollonio, M.A.R. (2020). Understanding the role of chia (Salvia Hispanica L.) mucilage on olive oil-based emulsion gels as a new fat substitute in emulsified meat products. *European Food Research and Technology*, 246, 909-922. doi: 10.1007/s00217-020-03457-4

CANILEC. (2019). Estadísticas del Sector lácteo 2010-2018. Disponible en: https://www.canilec.org.mx/estadisticas%20lacteos%202019.pdf. [Revisado 24 de agosto de 2020]

Chen, H., Mao, L., Hou, Z., Yuan, F., & Gao, Y. (2020). Roles of additional emulsifiers in the structures of emulsion gels and stability of vitamin E. *Food Hydrocolloids, 99: 105372*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105372

Chen, X.W., Fu, S.Y., Hou, J.J., Guo, J., Wang, J.M., & Yang, X.Q. (2016). Zein based oil-in-glycerol emulgels enriched with β-carotene as margarine alternatives. *Food Chemistry, 211: 836–844*. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.05.133

Codex Alimentarius. (2022). Leches y productos lácteos. 2da Ed. Vialedelle Terme di Caracalla, Roma, Italia. p 6.

Costa, M.F., Pimentel, T.C., Guimaraes, J.T., Balthazar, C.F., Rocha, R.S., Cavalcanti, R.N., Esmerino, E.A., Freitas, M.Q., Raices, R.S.L., Silva, M.C., & Cruz, A.G. (2019). Impact of prebiotics on the rheological characteristics and volatile compounds of Greek yogurt. *LWT*, 105, 371-376. doi: 10.1016/j.lwt.2019.02.007

Daza, L. D., López, S. D., Montealegre, M. Á., Eim, V. S., & Sandoval-Aldana, A. (2024). Study of the physicochemical properties of hass avocado oil encapsulated by complex coacervation. *LWT*, 204, 116491. doi: 10.1016/j.lwt.2024.116491

Dias, S.S., de Souza Vergílio, D., Pereira, A.M., Klososki, S.J., Marcolino, V.A., da Cruz, R.M.S., Costa, G.N., Barao, C.E. & Pimentel, T.C. (2021). Probiotic Greek yogurt: Effect of the addition of prebiotic fat substitutes on the physicochemical characteristics, probiotic survival, and sensory acceptance. *Journal of Dairy Research*, 88(1), 98-104. doi: 10.1017/S0022029921000121

Dickinson, E. (2008). Interfacial structure and stability of food emulsions as affected by protein-polysaccharide interactions. *Soft Matter, 4(5): 932-942*. doi: 10.1039/B718319D

Dickinson, E. (2013). Stabilising emulsion-based colloidal structures with mixed food ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture, 93(4): 710–721*. doi: 10.1002/jsfa.6013

Dou, N., Sun, R., Su, C., Ma, Y., Zhang, X., Wu, M., & Hou, J. (2022). Soybean oil bodies as a milk fat substitute improves quality, antioxidant and digestive properties of yogurt. *Foods*, 11(14), 2088. doi: 10.3390/foods11142088

Dong, X., Li, Y., Huang, G., Xiao, J., Guo, L., & Liu, L. (2021). Preparation and characterization of soybean Protein isolate/chitosan/sodium alginate ternary complex coacervate phase. *LWT, 150, 112081*. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112081

Fan, Y., Peng, G., Pang, X., Wen, Z., & Yi, J. (2021). Physicochemical, emulsifying, and interfacial properties of different whey protein aggregates obtained by thermal treatment. *Lwt*, 149, 111904. doi: 10.1016/j.lwt.2021.111904

Farjami, T., & Madadlou, A. (2019). An overview on preparation of emulsion-filled gels and emulsion particulate gels. *Trends in Food Science & Technology, 86, 85-94*. doi: 10.1016/j.tifs.2019.02.043

Fernandes, P. A., & Coimbra, M. A. (2023). The antioxidant activity of polysaccharides: A structure-function relationship overview. *Carbohydrate Polymers*, 314, 120965. doi: 10.1016/j.carbpol.2023.120965

Free-Manjarrez, S., Mojica, L., Espinosa-Andrews, H., & Morales-Hernández, N. (2022). Sensory and biological potential of encapsulated common bean protein hydrolysates incorporated in a Greek-style yogurt matrix. *Polymers*, 14(5), 854. doi: 10.3390/polym14050854

Gao, Y. & Wu, S. (2019). Thermal and oxidation stability of functional oleogels formed by edible wax/starch and schisandra chinensis oil. *Food and Function, 10, 8056–8068*. doi: 10.1039/C9FO01727E

Gkitsaki, I., Potsaki, P., Dimou, I., Laskari, Z., Koutelidakis, A., & Giaouris, E. (2024). Development of a functional Greek sheep yogurt incorporating a probiotic *Lacticaseibacillus rhamnosus* wild-type strain as adjunct starter culture. *Heliyon*, 10(2). doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e24446

Glusac, J., Davidesko-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. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.03.046

Gharanjig, H., Gharanjig, K., Hosseinnezhad, M., & Jafari, S. M. (2020). Development and optimization of complex coacervates based on zedo gum, cress seed gum and gelatin.

International journal of biological macromolecules, 148, 31-40. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.01.115

Godoy-García, L., Abadía-García, L., Cruz-Aldaco, K., Castaño-Tostado, E., Murúa-Pagola, B., & Amaya-Llano, S. L. (2020). Addition of glycomacropeptide as fat replacer in sugar-reduced Greek-style yoghurt. *International Journal of Dairy Technology*, 73(4), 718-725. doi: 10.1111/1471-0307.12717

Gomez-Betancur, A. M., Carmona-Tamayo, R., Martínez-Álvarez, O. L., Casanova-Yepes, H., & Torres-Oquendo, J. D. (2022). Effect of fat substitution using long-chain inulin and fortification with microencapsulated calcium in the rheological and sensory properties of yogurt mousse. *Journal of Food Process Engineering*, 45(7), e13433. doi: 10.1111/jfpe.13433

Gómez-Luria, D., Vernon-Carter, E. J, Álvarez-Ramírez, J., & Cruz-Sosa, F. (2019). Insights of the ability of gelatinized fractions from non-chemical modified corn, rice, wheat, and waxy corn starches to stabilize O/W emulsions. *Food Hydrocolloids, 89, 726-734*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2018.11.045

Graf, B., Protte, K., Weiss, J. & Hinrichs, J. (2019). Concentrated whey as protein source for thermally stabilized whey protein-pectin complexes. *Journal of Food Engineering, 269, 109760*. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2019.109760

Grossmann, L., & McClements, D. J. (2023). Current insights into protein solubility: A review of its importance for alternative proteins. Food Hydrocolloids, 137, 108416. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.108416

Guo, Q., Shu, X., Hu, Y., Su, J., Chen, S., Decker, E. A., & Gao, Y. (2021a). Formulated protein-polysaccharide-surfactant ternary complexes for co-encapsulation of curcumin and resveratrol: Characterization, stability and in vitro digestibility. *Food Hydrocolloids, 111, 106265*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.106265

Guo, Q., Su, J., Shu, X., Yuan, F., Mao, L., Liu, J., & Gao, Y. (2021b). Fabrication, structural characterization and functional attributes of polysaccharide-surfactant-protein ternary complexes for delivery of curcumin. *Food Chemistry*, 337, 128019. doi: 10.1016/j.foodchem.2020.128019

Gyawali, R., Feng, X., Chen, Y. P., Lorenzo, J. M., & Ibrahim, S. A. (2022). A review of factors influencing the quality and sensory evaluation techniques applied to Greek yogurt. *Journal of Dairy Research*, 89(2), 213-219. doi: 10.1017/S0022029922000346

Hernández-Marín, N. Y., Lobato-Calleros, C., Vernon-Carter, E. J. (2013). Stability and rheology of water-in-oil-in-water multiple emulsions made with protein-polysaccharide soluble complexes. *Journal of Food Engineering, 119(2): 181-187*. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2013.05.039

Huang, L., Abdel-Hamid, M., Romeih, E., Zeng, Q. K., Yang, P., Walker, G., & Li, L. (2020). Textural and organoleptic properties of fat-free buffalo yogurt as affected by

polydextrose. *International Journal of Food Properties*, 23(1), 1-8. doi: 10.1080/10942912.2019.1682010

Huang, Y.Y., Liang, M.H., Sun, L.N., Brennan, C.S., & Liu, D.M. (2021). Effect of microencapsulation on morphology, physicochemical properties and flavour profiles of solid yoghurt-flavoured bases. *International Journal of Food Science & Technology*, 56(5), 2565-2578. doi: 10.1111/ijfs.14896

Izadi, Z., Nasirpour, A., Garoosi, G.A., & Tamjidi, F. (2015). Rheological and physical properties of yogurt enriched with phytosterol during storage. *Journal of Food Science and Technology*, *52*, 5341-5346. doi: 10.1007/s13197-014-1593-2

Jiang, Y. H., Cheng, J. H., & Sun, D. W. (2020). Effects of plasma chemistry on the interfacial performance of protein and polysaccharide in emulsion. *Trends in Food Science & Technology*, 98, 129-139. doi: 10.1016/j.tifs.2020.02.009

Jorgensen, C.E., Abrahamsen, R.K., Rukke, E.O., Hoffmann, T.K., Johansen, A.G., & Skeie. S.B. (2019). Processing of high-protein yoghurt - A review. *International Dairy Journal, 88: 42-59*. doi: 10.1016/j.idairyj.2018.08.002

Jorgensen, C.E., Abrahamsen, R.K., Rukke, E.O., Johansen, A.G., Schüller, R.B., & Skeie, S.B. (2015). Improving the structure and rheology of high protein, low fat yoghurt with undenatured whey proteins. *International Dairy Journal, 47: 6-18*. doi: 10.1016/j.idairyj.2015.02.002

Jourdain, L., Leser, M.E., Schmitt, C., Michel, M., & Dickinson., E. (2008). Stability of emulsions containing sodium caseinate and dextran sulfate: Relationship to complexation in solution. *Food Hydrocolloids, 2008(22): 647-659*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2007.01.007

Jrad, Z., Oussaief, O., Bouhemda, T., Khorchani, T., & EL-Hatmi, H. (2019). Potential effects of ultrafiltration process and date powder on textural, sensory, bacterial viability, antioxidant properties and phenolic profile of dromedary Greek yogurt. *International Journal of Food Science & Technology*, 54(3), 854-861. doi: 10.1111/ijfs.14005

Kang, Z.L., Wang, T.T., Li, Y.P., Li, K., & Ma, H.J. (2020). Effect of sodium alginate on physical-chemical, protein conformation and sensory of low-fat frankfurters. *Meat science*, 162, 108043. doi: 10.1016/j.meatsci.2019.108043

Khan, B.A., Ullah, S., Khan, M.K., Alshahrani, S.M., & Braga, V.A. (2020). Formulation and evaluation of Ocimum basilicum-based emulgel for wound healing using animal model. Saudi pharmaceutical journal, 28(12), 1842-1850. doi: 10.1016/j.jsps.2020.11.011

Kher, A., Udabage, P., McKinnon, I., McNaughton, D., & Augustin, M.A. (2007). FTIR investigation of spray-dried milk protein concentrate powders. *Vibrational Spectroscopy*, 44(2), 375-381. doi: 10.1016/j.vibspec.2007.03.006

Kieserling, K., Vu, T. M., Drusch, S., & Schalow, S. (2019). Impact of pectin-rich orange fibre on gel characteristics and sensory properties in lactic acid fermented yoghurt. *Food Hydrocolloids*, *94*, 152-163. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.02.051

Kim, J., Kim, M., & Choi, I. (2023). Physicochemical characteristics, antioxidant properties and consumer acceptance of Greek yogurt fortified with apple pomace syrup. *Foods*, *12*(9), 1856. doi: 10.3390/foods12091856

Li, H., Liu, T., Zou, X., Yang, C., Li, H., Cui, W., & Yu, J. (2021). Utilization of thermal-denatured whey protein isolate-milk fat emulsion gel microparticles as stabilizers and fat replacers in low-fat yogurt. LWT. 150, 112045. doi: 10.1016/j.lwt.2021.112045

Li, H., Zhang, L., Jia, Y, Yujing, Y., Hongbo, L., Wenming, C. & Jinghua, Y. (2022a). Application of whey protein emulsion gel microparticles as fat replacers in low-fat yoghurt t: Applicability of vegetable oil as the oil phase. *Journal of Dairy Science*, 105, 9404-9416. doi: 10.3168/jds.2022-22314

Li, H., Zhang, Y., Liu, X., Yuan, Y., Li, H., Wang, X. & Yu, J. (2022b). Effects of mixed and bilayer whey protein isolate-pectin emulsions as fat-replacers on physicochemical properties and quality of low-fat yogurt. *Available at SSRN 4162419*. doi: 10.2139/ssrn.4162419

Liang, X., Ma, C., Yan, X., Zeng, H., McClements, D. J., Liu, X., & Liu, F. (2020). Structure, rheology and functionality of whey protein emulsion gels: Effects of double cross-linking with transglutaminase and calcium. *Food Hydrocolloids, 102*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.105569

Liu, B., Lai, L., Muhoza, B., & Xia, S. (2021). Complex coacervates based on gelatin and sodium carboxymethyl cellulose as carriers for cinnamaldehyde: Effect of gelatin Bloom values on coacervates formation and interfacial properties. *Food Bioscience*, 44, 101403. doi: 10.1016/j.fbio.2021.101403

Liu, X., Xue, F., & Adhikari, B. (2023). Hemp protein isolate-polysaccharide complex coacervates and their application as emulsifiers in oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 137, 108352. doi: 10.1016/j.foodhyd.2022.108352

Luo, N., Ye, A., Wolber, F.M., & Singh, H. (2019). Structure of whey protein emulsion gels containing capsaicinoids: Impact on in-mouth breakdown behaviour and sensory perception. *Food Hydrocolloids, 92: 19-29*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.01.019

Lv, P., Wang, D., Dai, L., Wu, X., Gao, Y., & Yuan, F. (2020). Pickering emulsion gels stabilized by high hydrostatic pressure-induced whey protein isolate gel particles: Characterization and encapsulation of curcumin. *Food Research International*, 132, 109032. doi: 10.1016/j.foodres.2020.109032

Makarova, A. O., Derkach, S. R., Khair, T., Kazantseva, M. A., Zuev, Y. F., & Zueva, O. S. (2023). Ion-induced polysaccharide gelation: peculiarities of alginate egg-box association with different divalent cations. *Polymers*, 15(5), 1243. doi: 10.3390/polym15051243

Małecki, J., Muszyński, S., & Sołowiej, B.G. (2021). Proteins in food systems—bionanomaterials, conventional and unconventional sources, functional properties, and development opportunities. *Polymers*, 13(15), 2506. doi: 10.3390/polym13152506

Marangoni, A.G., Van Duynhoven, J.P., Acevedo, N.C., Nicholson, R.A., & Patel, A.R. (2020). Advances in our understanding of the structure and functionality of edible fats and fat mimetics. *Soft matter*, 16(2), 289-306. doi: 10.1039/C9SM01704F

Matos, J., Afonso, C., Cardoso, C., Serralheiro, M.L. & Bandarra, N.M. (2021). Yogurt enriched with *Isochrysis galbana*: An innovative functional food. *Foods, 10, 1458, 1-16*. doi: 10.3390/foods10071458

Mehdipour, B. Z., & Gharachorloo, M. (2020). Curcumin as a bioactive compound: biological properties and encapsulation methods. *Journal of Food and Bioprocess Engineering, 3(1): 79-86*. doi: 10.22059/jfabe.2020.76608

Meng, F., Li, J., Yang, C., Wang, M., & Liu, X. (2024). Rheological and tribological properties of high internal phase emulsions stabilized by pH-induced soy protein isolate-carrageenan complex coacervates. *Food Hydrocolloids*, *146*, 109191. doi: 10.1016/j.foodhyd.2023.109191

Mohammadi, F., Shiri, A., Tahmouzi, S., Mollakhalili-Meybodi, N., & Nematollahi, A. (2023). Application of inulin in bread: A review of technological properties and factors affecting its stability. *Food science & nutrition*, 11(2), 639-650. doi: 10.1002/fsn3.3141

Montes de Oca-Ávalos, J.M., Borroni, V., Huck-Iriart, C., Navarro, A.S., Candal, R.J., & Herrera, M.L. (2020). Relationship between formulation, gelation kinetics, micro/nanostructure and rheological properties of sodium caseinate nanoemulsion-based acid gels for food applications. *Food and Bioprocess Technology*, 13, 288-299. doi: 10.1007/s11947-019-02394-9

Mu, H., Song, Z., Wang, X., Wang, D., Zheng, X., & Li, X. (2022). Microencapsulation of algae oil by complex coacervation of chitosan and modified starch: Characterization and oxidative stability. *International Journal of Biological Macromolecules*, 194, 66-73. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2021.11.168

NOM-181-SCFI/SAGARPA-2018. Yogurt-denominación, especificaciones fisicoquímicas y microbiológicas, información comercial y métodos de prueba.

Naibaho, J., Butula, N., Jonuzi, E., Korzeniowska, M., Laaksonen, O., Föste, M., Kütt, M.L. & Yang, B. (2022). Potential of brewers' spent grain in yogurt fermentation and evaluation of its impact in rheological behaviour, consistency, microstructural properties and acidity profile during the refrigerated storage. *Food Hydrocolloids*, 125, 107412. doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.107412

Nasirpour-Tabrizi, P., Azadmard-Damirchi, S., Hesari, J., Heshmati, M.K., & Savage, G.P. (2020). Rheological and physicochemical properties of novel low-fat emulgels containing flaxseed oil as a rich source of ω-3 fatty acids. *Lwt*, 133, 110107. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110107

Neitzel, A. E., Fang, Y. N., Yu, B., Rumyantsev, A. M., De Pablo, J. J., & Tirrell, M. V. (2021). Polyelectrolyte complex coacervation across a broad range of charge densities. *Macromolecules*, 54(14), 6878-6890. doi: 10.1021/acs.macromol.1c00703

Oliveira, N.L., Espinal-Ruiz, M., Neves, I.C.O., Silva, S.H., de Resende, J.V., & Rogers, M.A. (2023). Evaluation of α-tocopherol microencapsulation stability with either coconut oil or canola oil cores in Greek yogurt and butter. *Food Chemistry Advances*, 2, 100277. doi: 0.1016/j.focha.2023.100277

Oppong, D., 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(1), 1-17. doi: 10.1007/s44187-024-00210-8

Ortíz-Deleón, A. M., Ramírez-Santiago, C., Sandoval-Castilla, O., Román-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(1), Alim3012-Alim3012. doi: 10.24275/rmiq/Alim3012

Osorio-Arias, J., Pérez-Martínez, A., Vega-Castro, O., & Martínez-Monteagudo, S.I. (2020). Rheological, texture, structural, and functional properties of Greek-style yogurt fortified with cheese whey-spent coffee ground powder. *Lwt*, 129, 109523. doi: 10.1016/j.lwt.2020.109523

Paglarini, C. S., Martini, S., & Pollonio, M. A. R. (2019). Physical properties of emulsion gels formulated with sonicated soy protein isolate. *International Journal of Food Science and Technology, 54(2), 451-459*. doi: 10.1111/ijfs.13957

Pappa, E. C., Kondyli, E., Pappas, A. C., Kyriakaki, P., Zoidis, E., Papalamprou, L., Karageorgou, A., Simitzis, P., Goliomytis, M., Tsiplakou, E., & Georgiou, C.A. (2024). Physicochemical Characteristics of Commercially Available Greek Yoghurts. Dairy, 5(3), 436-450. doi: 10.3390/dairy5030034

Pintado, T., Ruiz-Capillas, C., Jiménez-Colmenero, F., Carmona, P., & Herrero, A.M. (2015). Oil-in-water emulsion gels stabilized with chia (*Salvia hispanica* L.) and cold gelling agents: Technological and infrared spectroscopic characterization. *Food Chemistry, 185: 470–478*. doi: 10.1016/j.foodchem.2015.04.024

Qin, Y. Q., Wang, L. Y., Yang, X. Y., Xu, Y. J., Fan, G., Fan, Y. G., ... & Li, X. (2023). Inulin: Properties and health benefits. *Food & function*, 14(7), 2948-2968. doi: 10.1039/D2FO01096H

Raoufi, N., Fang, Y., Kadkhodaee, R., Phillips, G.O., & Najafi, M.N. (2017). Changes in turbidity, zeta potential and precipitation yield induced by Persian gum-whey protein isolate interactions during acidification. *Journal of Food Processing and Preservation*, 41(3), e12975. doi: 10.1111/jfpp.12975

Rashwan, A.K., Osman, A.I., & Chen, W. (2023). Natural nutraceuticals for enhancing yogurt properties: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1907-1931. doi: 10.1007/s10311-023-01588-0

Ribeiro, E. F., Morell, P., Nicoletti, V. R., Quiles, A., & Hernando, I. J. F. H. (2021). Protein-and polysaccharide-based particles used for Pickering emulsion stabilisation. *Food Hydrocolloids*, 119, 106839. doi: 10.1016/j.foodhyd.2021.106839

Rocha, F., Marques, C.S., de Sousa, L.S., Minim, V.P.R., dos Santos Pires, A.C., Minim, L.A., Strengheta, P.C., Jones, O.W., & Vidigal, M.C.T.R. (2022). Betalains nanodispersions: Effects on betalains stability and on rheological properties of Greek yogurt. *Food Research International*, 159, 111583. doi: 10.1016/j.foodres.2022.111583

Rousi, Z., Malhiac, C., Fatouros, D. G., & Paraskevopoulou, A. (2019). Complex coacervates formation between gelatin and gum Arabic with different arabinogalactan protein fraction content and their characterization. *Food Hydrocolloids*, *96*, *577-588*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2019.06.009

Say, D., Soltani, M., & Güzeler, N. (2020). Texture, colour and sensory properties of non-fat yoghurt as influenced by tara gum or combinations of tara gum with buttermilk powder. *Mljekarstvo/Dairy*, 70(4). doi: 10.15567/mljekarstvo.2020.0409

Shahein, M.R., Atwaa, E.S.H., Radwan, H.A., Elmeligy, A.A., Hafiz, A.A., Albrakati, A. & Elmahallawy, E.K. (2022). Production of a yogurt drink enriched with golden berry (*Physalis pubescens* L.) juice and its therapeutic effect on hepatitis in rats. *Fermentation, 8, 112, 1-13*. doi: 10.3390/fermentacion8030112

Sheidaei, Z., Sarmadi, B., Hosseini, S. M., Javanmardi, F., Khosravi-Darani, K., & Mortazavian, A. M. (2020). Influence of κ-carrageenan, modified starch and inulin addition on rheological and sensory properties of non-fat and non-added sugar dairy dessert. Current Nutrition & Food Science, 16(4), 462-469. doi: 10.2174/1573401315666190301152645

Soni, R., Jain, N. K., Shah, V., Soni, J., Suthar, D., & Gohel, P. (2020). Development of probiotic yogurt: Effect of strain combination on nutritional, rheological, organoleptic and probiotic properties. *Journal of Food Science and Technology*, 57, 2038-2050. doi: 10.1007/s13197-020-04238-3

Sow, L.C., Chong, J.M.N., Liao, Q.X., & Yang, H. (2018). Effects of κ-carrageenan on the structure and rheological properties of fish gelatin. *Journal of Food Engineering*, 239, 92-103. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2018.05.035

Stefos, G.C., Dalaka, E., Papoutsi, G., Palamidi, I., Andreou, V., Katsaros, G., Bossis, I., Portis, I., & Theodorou, G. (2024). In vitro evaluation of the effect of yogurt acid

whey fractions on iron bioavailability. *Journal of Dairy Science*, 107(2), 683-694. doi: 10.3168/jds.2023-23643

Tetrapack. (2019). Tendencias de consumo de yogur y lo que significan para los productores. [Revisado 24 de agosto de 2024]. Disponible en: https://www.tetrapak.com/mx/about/cases-articles/consumer-yoghurt-trends

Taheri, A., Kashaninejad, M., Tamaddon, A. M., & Jafari, S. M. (2021). Comparison of binary cress seed mucilage (CSM)/β-lactoglobulin (BLG) and ternary CSG-BLG-Ca (calcium) complexes as emulsifiers: Interfacial behavior and freeze-thawing stability. *Carbohydrate Polymers*, 266, 118148. doi: 10.1016/j.carbpol.2021.118148

Timilsena, Y. P., Wang, B., Adhijari, R., & Adhikari, B. (2016). Preparation and characterization of chia seed protein isolate-chia seed gum complex coacervates. *Food Hydrocolloids, 52: 554-563*. doi: 10.1016/j.foodhyd.2015.07.033

Trujillo-Ramirez, D., Olivares-Martinez, I., Lobato-Calleros, C., Rodriguez-Huezo, E., Jaime Vernon-Carter, E. & Alvarez-Ramirez, J. (2022). Impact of the droplet size of canola oil-in-water emulsions on the rheology and sensory acceptability of reduced-milk fat stirred yogurt. *Journal of Food Science and Technology*, 59, 4853-4862. doi: 10.1007/s13197-022-05573-3

Vargas, S.A., Delgado-Macuil, R.J., Ruiz-Espinosa, H., Rojas-López, M., & Amador-Espejo, G.G. (2021). High-intensity ultrasound pretreatment influence on whey protein isolate and its use on complex coacervation with kappa carrageenan:

Evaluation of selected functional properties. *Ultrasonics Sonochemistry*, 70, 105340. doi: 10.1016/j.ultsonch.2020.105340

Vénica, C.I., Spotti, M.J., Pavón, Y.L., Molli, J.S. & Perotti, M.C. (2019). Influence of carrot fibre powder addition on rheological, microstructure and sensory characteristics of stirred-type yogurt. *International Journal of Food Science and Technology, 55, 1916–1923*. doi: 10.1111/ijfs.14415

Víquez-Barrantes, D., Lau-Lee, N., Cubero-Castillo, E., & Cordero-García, M. (2023). Comparing consumer acceptance, sensory profile, and chemical properties in artisanal and industrial Greek-style yogurts processing: A path to enhancing food safety. *NFS Journal*, 33, 100156. doi: 10.1016/j.nfs.2023.100156

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. doi: 10.1016/j.lwt.2020.110518

Wang, L., Liu, M., Guo, P., Zhang, H., Jiang, L., Xia, N., Zheng, L., Cui, Q., & Hua, S. (2023). Understanding the structure, interfacial properties, and digestion fate of high internal phase Pickering emulsions stabilized by food-grade coacervates: Tracing the dynamic transition from coacervates to complexes. *Food Chemistry*, 414, 135718. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.135718

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(4), 1228-1242. doi: 10.1111/1750-3841.15659

Wu, J., Dai, T., Lin, R., Niu, J., Li, Z., Chang, Z., Jia, C., Zou, C., Jiang, D., Jin, M. Huang, J., & Gao, H. (2023). Effect of protein-glutaminase on the texture, rheology, microstructure and sensory properties of skimmed set-type yoghurt. *Food Chemistry*, 429, 136831. doi: 10.1016/j.foodchem.2023.136831

Xie, L., Shen, M., Wang, Z., & Xie, J. (2021). Structure, function and food applications of carboxymethylated polysaccharides: A comprehensive review. *Trends in Food Science & Technology*, 118, 539-557. doi: 10.1016/j.tifs.2021.09.016

Yan, C., & Zhang, W. (2014). Coacervation processes. *In Microencapsulation in the food industry* (pp. 125-137). Academic Press. doi: 10.1016/B978-0-12-404568-2.00012-1

Yang, X., Li, A., Li, X., Sun, L., & Guo, Y. (2020). An overview of classifications, properties of food polysaccharides and their links to applications in improving food textures. *Trends in Food Science & Technology*, 102, 1-15. doi: 10.1016/j.tifs.2020.05.020

Yi, Y., Xu, W., Wang, H. X., Huang, F., & Wang, L. M. (2020). Natural polysaccharides experience physiochemical and functional changes during preparation: A review. *Carbohydrate polymers*, 234, 115896. doi: 10.1016/j.carbpol.2020.115896

Yu, B., Zheng, L., Cui, B., Zhao, H. & Liu, P. (2020). The effects of acetylated distarch phosphate from tapioca starch on rheological properties and microstructure of acid-induced casein gel. *International Journal of Biological Macromolecules*, 159, 1132–1139. doi: 10.1016/j.ijbiomac.2020.05.049

Zare, M., Golmakani, M. T., & Hosseini, S. M. (2023). Studying structural and rheological properties of alginate-whey protein isolate cold-set hybrid emulgels at various pH levels. Journal of Texture Studies, 54(5), 720-735. doi: 10.1111/jtxs.12761

Zhang, C., Li, Y., Wang, P., Li, J., Weiss, J., & Zhang, H. (2020). Core-shell nanofibers electrospun from O/W emulsions stabilized by the mixed monolayer of gelatin-gum Arabic complexes. *Food Hydrocolloids, 107: 1-9.* doi: 10.1016/j.foodhyd.2020.105980

Zhou, L., Shi, H., Li, Z., & He, C. (2020). Recent advances in complex coacervation design from macromolecular assemblies and emerging applications. *Macromolecular Rapid Communications, 41(21), 2000149*. doi: 10.1002/marc.202000149

ANEXOS:

International Journal of Biological Macromolecules 265 (2024) 131260

Contents lists available at ScienceDirect

International Journal of Biological Macromolecules

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ijbiomac

Characterization of O/W emulgels based on whey protein-alginate-inulin coacervates: Influence of temperature and ultrasound as protein preconditioning process

Anthony M. Ortiz-Deleón [a], Angélica Román-Guerrero [a,*], Ofelia Sandoval-Castilla [b], Juan Carlos Cuevas-Bernardino [c]

[a] Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Av. Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª sec., 09310, Iztapalapa, CDMX, Mexico
[b] Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carretera México-Texcoco, 56230 Texcoco, Estado de México, Mexico
[c] CONACYT - Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Subsede Sureste, Parque Científico Tecnológico de Yucatán, Km 5.5, Carretera Sierra Papacal-Chuburná Puerto, 97302 Mérida, Yucatán, Mexico

ARTICLE INFO

Keywords:
Emulgel
Protein:polysaccharide complex
Interfacial activity

ABSTRACT

Preconditioning processes in proteins play a crucial role in enhancing their functional properties as surface active agents. Whey protein isolate (WPI, 20 wt%) was preconditioned via temperature (WPI_T, 90 °C) or ultrasound (WPI_{US}, 20 kHz, 80 % amplitude). FTIR and zeta potential analysis demonstrated the effect of the preconditioning process on the secondary structure and surface properties of WPI. WPI-Alginate:inulin (*AI*) complex coacervates ($CC_{WPI:AI}$) were formed at pH 3.0 using WPI_T and WPI_{US}, and the associative electrostatic interactions between WPI-*AI* led to coacervation yields >90 %, influenced by the preconditioning process employed. Viscoelastic properties outlined a predominantly solid-like behavior ($G' > G''$). The $CC_{WPI:AI}$ system based on WPI_T showed enhanced strength and gel-like structure compared to the WPI_{US}-based system. Oil-in-water (O/W) emulgels were formed and stabilized with the $CC_{WPI:AI}$ complexes, exhibiting spherical droplets (93.3–292.8 μm), whereas texture and rheological properties highlighted the formation of gel-like systems. The centrifugation STEP technology was used to evaluate the physical stability of emulgels, WPI_T-based emulgels displayed superior stability against creaming than untreated WPI and WPI_{US}-based emulgels. These findings provide a basis for developing emulgels with prolonged stability and tunable functional properties, tailoring enhanced viscoelastic and texture attributes to meet specific needs for industrial applications where gel-like properties are pursued.

1. Introduction

Polysaccharides and proteins, known as biopolymers, are commonly used as food ingredients due to their ability to act as structuring agents [1]. They are essential in food processing when specific textural and sensory attributes are desired [2]. These attributes can be achieved through the gelation properties of food components like proteins and polysaccharides and being tailored by taking advantage of their differences in structure and composition [3–5]. In protein-based systems, gelation starts with the unfolding/denaturation of the protein structure, which drives its aggregation and the formation of a 3D gel network. Processes such as high-pressure, thermal treatment, microwaving, ultrasonic processes, pH, or ionic strength changes can induce denaturation of protein structure, involving the exposure of initially hidden functional groups, increasing the potential interactive sites and surface activity of the molecules, but can also promote aggregation processes [2,6,7]. The addition of polysaccharides, under specific conditions such as pH, mass ratio, ionic strength, and total biopolymer concentration can lead to the development of inter- and intramolecular interactions that not only can modify and improve the gelling properties of the system [8], but also contribute to the development of new functionalities and physicochemical characteristics useful for designing novel functional foods [9]. When proteins and polysaccharides interact attractively, they can form aggregates through mechanisms such as complex coacervation

* Corresponding author.
E-mail address: aroguc@xanum.uam.mx (A. Román-Guerrero).

https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.131260
Received 15 January 2024; Received in revised form 8 March 2024; Accepted 28 March 2024
Available online 9 April 2024
0141-8130/© 2024 Elsevier B.V. All rights reserved.

International Journal of Food Science and Technology 2023 1

Original article

Effect of the addition of an emulgel based on whey protein isolate-alginate-inulin complex on the physicochemical and textural properties of reduced-fat set yoghurt

Anthony M. Ortiz-Deleón,[1] Angélica Román-Guerrero,[1]* Ofelia Sandoval-Castilla,[2] Juan C. Cuevas-Bernardino[3] & Eduardo Jaime Vernon-Carter[4]

1 Departamento de Biotecnología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª secc., Iztapalapa, 09340, Ciudad de México, Mexico
2 Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo, 56230, Texcoco, Estado de México, Mexico
3 CONACYT – Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, Subsede Sureste, anque Científico Tecnológico de Yucatán, Km 5.5. Carr. Sierra Papacal-Chuburná Puerto, 97302, Mérida, Yucatán, Mexico
4 Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, Ferrocarril San Rafael Atlixco 186, Leyes de Reforma 1ª secc. Iztapalapa, 09340, Ciudad de México, Mexico

(Received 21 April 2023; Accepted in revised form 20 August 2023)

Summary Oil-in-water emulgels formed with canola oil and whey protein isolate:alginate-inulin ternary complex coacervates (TCC) were used as fat replacers (10–15% wt.) in a reduced-fat set yoghurt (RFY). The addition of the emulgel had a significant effect ($P < 0.05$) on RFY syneresis and better stability against whey expulsion compared to a full-fat set yoghurt (FFY). Microstructure in RFY added with emulgel showed denser packing structures in the protein lattice with filling behaviour of emulgel. The textural and rheological properties showed that the emulgel contributed to mimicking and modulating its performance like that of FFY. The complex elastic modulus (G^*) indicates that higher emulgel content in RFY improved the strength of the gel, allowing it to achieve a behaviour like that of FFY. The addition of emulgel increased the protein (55.3–63.2%) and reduced the fat (30.1–42.9%) contents, allowing the development of more balanced foods with similar mechanical properties to an FFY.

Keywords Fat replacer, oil-in-water emulgel, syneresis, viscoelastic properties, yoghurt.

Introduction

Yoghurt, a nutritious and healthy dairy product, is produced through the bacterial fermentation of milk using starter cultures such as *Streptococcus thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* subs. *bulgaricus* (Farag *et al.*, 2021). It is widely consumed worldwide and offers a range of health benefits due to its unique properties (Fazilah *et al.*, 2018; Matos *et al.*, 2021; Shahein *et al.*, 2022). Yoghurt is renowned for its pleasant flavour and texture (Vénica *et al.*, 2019) and can be enjoyed in various forms such as meal substitutes, beverages, desserts, snacks, and protein-rich drinks, among others. The demand for functional foods that promote health is continuously increasing; currently, consumers' preferences have been focused on low-calorie, high-protein, and healthier desserts. In this regard, low-fat and low-sugar options are promising options as they align with the goal of meeting daily nutritional needs while promoting healthier choices (Data Bridge Market Research, 2022). In dairy products, milk fat plays a key role in determining flavour, texture, and appearance (Liu *et al.*, 2016). However, the production of low-fat yoghurt often results in undesirable characteristics, including reduced total solid content, poor texture, low viscosity, high syneresis, and unpleasant mouthfeel (Lee & Lucey, 2010; Fang *et al.*, 2019). To address these challenges, food scientists and technologists have explored various alternatives, including the use of fat replacers, which enable to create low-calorie food products while improving certain physical and sensory properties affected by the reduction in milk fat content (Fang *et al.*, 2019; Graf *et al.*, 2019). Fat replacers commonly used in dairy products encompass a range of polysaccharides like modified starches (Sandoval-Castilla

*Correspondent: E-mail: aroguc@xanum.uam.mx

doi:10.1111/ijfs.16678

© 2023 Institute of Food, Science and Technology (IFSTTF).

Congresos:

1. Presentación de video de divulgación titulado "¿Yogur sin grasa?... ¡Cerca del bien y del mal!" en Simposio de Perspectivas en Biotecnología 2024, 12 de julio de 2024.
2. Presentación en XLV Encuentro Nacional de la AMIDIQ con el tema titulado "Características texturales y estructurales de yogur reducido en grasa adicionado con un emulgel O/W", del 07 al 10 de mayo de 2024.
3. Presentación en XLIV Encuentro Nacional de la AMIDIQ con el tema titulado "Características reológicas y texturales de emulgeles aceite en agua (O/W) basados en complejos coacervados ternarios", del 30 de mayo al 02 de junio de 2023.
4. Presentación en *10th Food Science, Biotechnology and Safety Congress Latin Food 2022* con el tema titulado "Rheological, texture and stability properties in skim set-type yogurt added with an emulgel based on ternary complex coacervates", del 16 al 18 de noviembre de 2022.
5. Presentación en XLIII Encuentro Nacional de la AMIDIQ con el tema titulado "Efecto de la relación másica en la formación de complejos coacervados ternarios", del 23 al 26 de agosto de 2022.

Distinciones:

1. Otorgado por la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa por haber obtenido el segundo lugar en el concurso INNOVA UAMI 2024, con el proyecto titulado "Healthy GreekLuks yogurt".
2. Otorgado por la Asociación Mexicana de Ciencia de los Alimentos (AMECA), por obtener el tercer lugar en la categoría de presentación oral en el área de Biotecnología Alimentaria, presentada en Congreso *Latin Food 2022*.

Retribución social:

1. Participación en la organización del evento "Jornadas de Tecnología de alimentos" edición 24-P, realizado en la Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa. 25 de septiembre de 2024.
2. Presentación de video de divulgación titulado "¿Yogur sin grasa?... ¡Cerca del bien y del mal!" en Simposio de Perspectivas en Biotecnología 2024. 12 de julio de 2024.
3. Conferencias a grupos escolares sobre el tema "Perspectivas en la Biotecnología alimentaria: producción de alimentos funcionales". 07 al 10 de febrero de 2023.
4. Ponencia en línea titulada "Panorama de la agroindustria en México: Productividad y oportunidades laborales" dentro del Ciclo de conferencias "Retos, desafíos y oportunidades en la agronomía", organizada por la Universidad Mexiquense del Bicentenario y dirigida a la comunidad estudiantil y público en general. 14 de mayo de 2021.

Casa abierta al tiempo
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

ACTA DE DISERTACIÓN PÚBLICA

No. 00292
Matrícula: 2203802299

EVALUACIÓN DE LA ADICION DE UN EMULGEL ESTABILIZADO CON COMPLEJOS COACERVADOS, COMO AGENTE DE TEXTURA EN YOGUR TIPO GRIEGO.

En la Ciudad de México, se presentaron a las 12:00 horas del día 16 del mes de diciembre del año 2024 en la Unidad Iztapalapa de la Universidad Autónoma Metropolitana, los suscritos miembros del jurado:

DR. FRANCISCO CRUZ SOSA
DRA. EDITH PONCE ALQUICIRA
DRA. OFELIA SANDOVAL CASTILLA
DRA. MARIA AURORA PINTOR JARDINES

Bajo la Presidencia del primero y con carácter de Secretaria la última, se reunieron a la presentación de la Disertación Pública cuya denominación aparece al margen, para la obtención del grado de:

DOCTOR EN BIOTECNOLOGÍA

DE: ANTHONY MARTIN ORTIZ DELEON

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

Aprobar

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

ANTHONY MARTIN ORTIZ DELEON
ALUMNO

REVISÓ

MTRA. ROSALIA SERRANO DE LA PAZ
DIRECTORA DE SISTEMAS ESCOLARES

DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CBS

DR. JOSE LUIS GOMEZ OLIVARES

PRESIDENTE

DR. FRANCISCO CRUZ SOSA

VOCAL

DRA. EDITH PONCE ALQUICIRA

VOCAL

DRA. OFELIA SANDOVAL CASTILLA

SECRETARIA

DRA. MARIA AURORA PINTOR JARDINES