



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Efecto de carragenina sola y en mezcla con
hidrocoloides espesantes en la textura y estabilidad de
leches gelificadas**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

CAROLINA ITZEL DÍAZ PÉREZ

ASESORAS:

DRA. LAURA PATRICIA MARTÍNEZ PADILLA

DRA. VIRGINIA AGUSTINA DELGADO REYES

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO, 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES**

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLÁN

ASUNTO: VOTO APROBATORIO



**M. en C. JORGE ALFREDO CUÉLLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLÁN
PRESENTE**

**ATN: I.A. LAURA MARGARITA CORTAZAR FIGUEROA
Jefa del Departamento de Exámenes Profesionales
de la FES Cuautitlán.**

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Efecto de carragenina sola y en mezcla con hidrocoloides espesantes en la textura y estabilidad de leches gelificadas.

Que presenta la pasante: Carolina Itzel Díaz Pérez
Con número de cuenta: 411025498 para obtener el Título de la carrera: Ingeniería en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el **EXAMEN PROFESIONAL** correspondiente, otorgamos nuestro **VOTO APROBATORIO**.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cuautitlán Izcalli, Méx. a 21 de Agosto de 2017.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	<u>I.B.Q. Norma Beatriz Casas Alencaster</u>	
VOCAL	<u>Dra. Laura Patricia Martínez Padilla</u>	
SECRETARIO	<u>Dra. María Eugenia Ramírez Ortíz</u>	
1er. SUPLENTE	<u>Dra. María Guadalupe Sosa Herrera</u>	
2do. SUPLENTE	<u>I.A. Zaira Berenice Guadarrama Alvarez</u>	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

LMCF/cga*

AGRADECIMIENTOS

A mis papás, por ser mis pilares y mi fuerza, por construir los cimientos sobre los que yo construiré mi vida. Gracias por su esfuerzo y dedicación para que pudiera recibir la mejor educación y por todas las oportunidades que me dieron. Gracias por siempre brindarme lo mejor de ustedes, por su amor incondicional y su apoyo constante, por aguantarme en mis peores días y por creer en mí cuando ni siquiera yo lo hacía. LOS QUIERO MUCHO.

A mi hermana, por ser mi alegría, por ser mi confidente y mi amiga. Gracias por esa seguridad que me das, porque no importa que tan fuerte sea la pelea, yo sé que vas a estar ahí para mí, así como yo siempre estaré para ti. Gracias por escucharme y darme ánimos cuando ya no quería continuar, fue un largo trayecto pero sé que sin ti, Vale, no podría haberlo concluido.

A Víctor, por llegar a cambiar mi vida sin darme cuenta y llenarme de alegría y amor, por convertir la frustración que sentía en impulso, por siempre creer en mí y recordarme lo capaz que soy.

A mis asesoras la Dra. Laura Patricia Martínez Padilla y la Dra. Virginia Agustina Delgado Reyes, por su apoyo y guía en cada paso de esta etapa, gracias por sus palabras de aliento, paciencia y por siempre estar al pie del cañón en mi proceso.

A toda la comunidad LAPRYFAL por poner a disposición sus instalaciones y sus conocimientos y por ser parte de esta investigación.

A la empresa Gelymar por proveer las carrageninas usadas en esta experimentación.

ÍNDICE

	Página
I. ANTECEDENTES	1
1.1 Leches gelificadas	1
1.1.1 Formulación	2
1.1.2 Proceso	3
1.2 Funcionalidad de los ingredientes principales en leches gelificadas	6
1.2.1 Leche	6
1.2.2 Agentes gelificantes	6
1.2.2.1 Interacción proteínas lácteas - carragenina	10
1.2.3 Hidrocoloides espesantes	14
1.2.4 Edulcorantes, saborizantes y colorantes	17
1.3 Propiedades de las leches gelificadas	18
1.3.1 Reología	18
1.3.2 Textura	23
1.3.3 Estabilidad	26
II. METODOLOGÍA	28
2.1 Objetivos	28
2.2 Materiales	29
2.3 Métodos	29
2.3.1 Etapas preliminares	29
2.3.2 Formulación de leches gelificadas	31
2.3.3 Reología	32
2.2.4 Textura	34

2.3.5 Estabilidad	36
III. RESULTADOS	38
3.1 Base láctea	38
3.1.1 Seguimiento de la viscosidad	38
3.1.2 Curvas de flujo	45
3.2 Leches gelificadas	50
3.2.1 Fuerza de gel	50
3.2.2 Perfil de textura	55
3.2.3 Estabilidad	64
CONCLUSIONES	67
REFERENCIAS	69

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.1	Geles formados con carrageninas κ e ι	8
1.2	Clasificación de geles lácteos	23
2.1	Formulación flan base	31
2.2	Formulaciones en las que se emplea leche fluida	31
2.3	Formulaciones en las que se emplea fórmula láctea en polvo	32
2.4	Condiciones de prueba de seguimiento de viscosidad	33
2.5	Condiciones de prueba para la obtención de curvas de flujo	33
3.1	Viscosidad (Pa•s) a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}) a diferentes temperaturas durante el seguimiento de viscosidad de formulaciones elaboradas con leche y fórmula láctea	44
3.2	Parámetros reológicos de las curvas de flujo a $50 \text{ }^\circ\text{C}$	48
3.3	Parámetros reológicos de las curvas de flujo a $25 \text{ }^\circ\text{C}$	49
3.4	Parámetros texturales obtenidos en la prueba de fuerza de gel de las formulaciones elaboradas con leche y fórmula láctea	53
3.5	Valores de dureza obtenidos con el análisis de perfil de textura	57
3.6	Valores de cohesividad obtenidos con el análisis de perfil de textura	59
3.7	Valores de elasticidad obtenidos con el análisis de perfil de textura	61
3.8	Valores de gomosidad obtenidos con el análisis de perfil de textura	63
3.9	Sinéresis de las leches gelificadas	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.1	Diagrama de proceso para la elaboración de una leche gelificada	3
1.2	Estructura de diferentes tipos de carragenina	7
1.3	Modelo de la gelatinización de la carragenina en agua	9
1.4	Esquematación de las micelas de caseína	11
1.5	Esquematación de la interacción caseína-carragenina	12
1.6	Interacción carragenina – proteína	13
1.7	Clasificación de tipos de fluidos	19
1.8	Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, en mezclas de k-carragenina al 0.1%, con diferentes tipos de leche a concentraciones de proteína de leche de 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5%	22
1.9	Gráfico de fuerza en función de la distancia de penetración, con concentraciones de carragenina de 0.1%, 0.2%, 0.3%, 0.4% y 0.5%	24
2.1	Gráfica general de fuerza de gel	34
2.2	Gráfica general del análisis de perfil de textura	36
3.1	Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo carragenina κ -II y κ -I al 0.25%	39
3.2	Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo carragenina κ -II y κ -I 0.125% con CMC 0.3%	40
3.3	Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo carragenina κ -II y κ -I 0.125% con goma guar 0.3%	41

3.4	Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s ⁻¹), evaluada en el calentamiento y enfriamiento (2 °C/min), en la base láctea conteniendo carragenina κ-II y κ-I 0.125% con almidón 2%	42
3.5	Gráficas comparativas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla	46
3.6	Gráficas comparativas de fuerza en función del tiempo de la prueba de fuerza de gel en formulaciones elaboradas con leche fluida (arriba) y fórmula láctea en polvo (abajo)	51
3.7	Fuerza máxima (N) obtenida en la prueba de fuerza de gel	54
3.8	Gráficas comparativas de fuerza en función del tiempo de la prueba de análisis de perfil de textura de formulaciones elaboradas con leche fluida (arriba) y con fórmula láctea en polvo (abajo)	56
3.9	Dureza (N) obtenida en la prueba de perfil de textura	58
3.10	Cohesividad obtenida en la prueba de perfil de textura	60
3.11	Elasticidad obtenida en la prueba de perfil de textura	62
3.12	Gomosidad (N) obtenida en la prueba de perfil de textura	64
3.13	Porcentaje del exudado (sinéresis) por las leches gelificadas	66

RESUMEN

En esta investigación se evaluó el efecto de dos carrageninas refinadas solas y en mezcla con un hidrocoloide espesante (carboximetilcelulosa, goma guar o almidón pre-gelatinizado de maíz ceroso entrecruzado) en leche fluida y fórmula láctea en polvo, proponiendo alternativas de mezcla para una leche gelificada tipo flan, así como el efecto que éstos tiene en la reología, textura y estabilidad del sistema.

En cuanto a las pruebas reológicas, se realizaron en una base láctea, en un reómetro de cilindros concéntricos a 25 °C y 50 °C; todas las formulaciones presentaron un comportamiento fluidificante a la cizalla, pero al enfriar el sistema a 25 °C, todas las muestras, a excepción de las preparadas con goma guar, requirieron de un esfuerzo de cedencia ajustándose al modelo Herschel-Bulkley.

Se buscó igualar la textura de un producto de referencia elaborado con una carragenina estandarizada para un postre tipo flan que se le denominó, flan base, se realizaron pruebas de fuerza de gel y análisis de perfil de textura a 10 °C, dando los mejores resultados las formulaciones elaboradas con goma guar en leche fluida con ambas carrageninas, y las de fórmula láctea en mezcla con carragenina κ -II.

Finalmente, la estabilidad fue mayor en las formulaciones elaboradas con goma guar, ya que se presentó un menor porcentaje de sinéresis.

INTRODUCCIÓN

En la industria láctea actual se utilizan ingredientes y sistemas tecnológicos que permiten la producción de productos variados, fáciles de digerir y con mayor contenido de nutrimentos (Martínez *et al.*, 2008). Los postres lácteos o leches gelificadas son productos estructurados y en ocasiones con aire incorporado, donde los estabilizantes, gelificantes y espesantes desempeñan el principal papel en las características de estos sistemas (Varnam, 1994); se preparan como productos listos para su consumo, por lo que sus propiedades reológicas y texturales deben estar ya desarrolladas, así mismo, deberán conservar su estabilidad hasta la fecha de expiración indicada.

Los postres lácteos se presentan al consumidor en forma sólida o semisólida (Martínez *et al.*, 2008); para su producción se toma como ingrediente básico la leche, razón por la cual se pueden considerar buena fuente de calcio, fósforo, magnesio y sodio (Spreer, 1991); en el proceso final se pueden adicionar colorantes, aromatizantes y edulcorantes, para hacer el producto más llamativo.

Algunos atributos de la calidad de estos productos lácteos, como la textura, dependen en su mayor parte de los hidrocoloides utilizados; su consistencia se incrementa mediante diferentes procedimientos, como la coagulación y más frecuentemente con la adición de gelificantes como almidones modificados, carrageninas, gomas o gelatinas (Puvanenthiran *et al.*, 2003). Los agentes de textura actúan estabilizando las características físicas de los alimentos a los que se adicionan, proporcionan consistencia y estabilidad, permitiendo que el alimento se presente como recién preparado en el momento de su consumo.

En los postres lácteos, los agentes gelificantes como la carragenina interaccionan entre ellos mismos o con las proteínas presentes en la leche, para formar una red tridimensional donde quedará atrapada el agua (Venugopal, 2011; Prajapati *et al.*, 2014); la capacidad de gelificación y las propiedades del gel están relacionadas

con sus propiedades reológicas y texturales (Avanza *et al.*, 2004); por otro lado, los agentes espesantes ligan el agua haciendo más eficaz el proceso de gelificación, alargando la vida útil del postre.

Algunas mezclas de carragenina con otros hidrocoloides han sido usadas comúnmente en la industria de alimentos, ya que proporcionan una gran variedad de propiedades físicas, reológicas y texturales que mejoran el desempeño durante los procesos, ayudan a diversificar las aplicaciones y la obtención de nuevos productos (Juan-Mei y Shao-Ping, 2016).

Las carrageninas comerciales son mezclas más o menos enriquecidas de uno u otro tipo de carragenina, y de acuerdo con el proceso de producción de la carragenina es que pueden definirse como semirefinada o refinada, entre más refinadas sean, el gel que se obtenga será más fuerte y transparente; en la industria láctea generalmente son usadas carrageninas para productos específicos que además vienen adicionadas con uno o varios hidrocoloides espesantes que no se reportan en las especificaciones.

Debido a que la carragenina interacciona con las proteínas presentes en la leche, la cantidad de proteína es un factor importante es la textura, reología y estabilidad final del producto, en el mercado mexicano existe una gran variedad de leches comerciales que van desde leches, fórmulas lácteas, alimentos lácteos, en los que varía el porcentaje de proteínas presentes.

En esta investigación se pretende sustituir el uso de estas carrageninas comerciales, por carragenina refinada sola en mezcla con otro hidrocoloide, como la goma guar, la carboximetilcelulosa de alto peso molecular o el almidón pre-gelatinizado de maíz ceroso entrecruzado, en dos diferentes tipos de leche con diferentes porcentaje de proteína (leche fluida y fórmula láctea en polvo), así como estudiar el impacto que tiene en las propiedades texturales y de estabilidad para la aplicación en leches gelificadas.

I. ANTECEDENTES

1.1 Leches gelificadas

Se consideran leches gelificadas tanto a las leches líquidas débilmente gelificadas como a los productos estructurados y en ocasiones con aire incorporado. En ambos casos, los gelificantes desempeñan el papel principal en la determinación de las características del producto (Varnam, 1994). En su mayoría se presentan como productos terminados a manera de postres.

Los postres lácteos son cremosos y/o gelificados de leche no ácida, se presentan al consumidor en forma sólida o semisólida, son productos alimenticios estéticos y nutritivos dependiendo de su composición. Para su producción se toma como ingrediente básico la leche, razón por la cual se pueden considerar buenas fuentes de calcio, fósforo, magnesio y sodio. Son mezclas complejas de productos lácteos combinados con hidrocoloides y azúcares. En el proceso final se pueden adicionar colorantes, aromatizantes y edulcorantes (Martínez *et al.*, 2008). En el mercado se pueden encontrar numerosos postres lácteos no acidificados; éstos son obtenidos a través de tratamientos termo-mecánicos de mezclas de leche, carragenina y sacarosa en su mayoría; hay dos grupos de productos que se diferencian usualmente como, postres cremosos que muestran un comportamiento reológico de líquido o semi-líquido, y en flanes que son similares al sólido (Matignon *et al.*, 2016).

Las leches gelificadas también se pueden clasificar según su apariencia y textura en (Martínez *et al.*, 2008):

- Geles firmes desmoldables: leches gelificadas y flanes, estos productos se extraen fácilmente de su envase y presentan las siguientes características de textura: geles fuertes que producen en la boca sensación quebradiza, compacta o cremosa; también se encuentran geles débiles que producen en la boca una sensación cremosa.

- Postres cremosos: natillas y pudines líquidos. Pueden presentar consistencia y textura fuerte, muy compacta y densa, o ligera
- Postres con varias capas: fondo con una capa superior gelificada o cremosa. Estos productos son los más consumidos.

1.1.1 Formulación

Las leches gelificadas incluyen leche (entera, descremada, condensada, evaporada o en polvo) en su totalidad o en mezcla (70-80%), edulcorantes como la sacarosa (8-12%), este porcentaje depende del tipo de edulcorante empleado; grenetina, almidón u otros hidrocoloides espesantes adicionados para darle consistencia (2-3%), saborizantes, colorantes, aromatizantes (1-5%) y un gelificante principal como carragenina (0.1-0.3%) (Martínez *et al.*, 2008). Investigadores como Puvanenthiran (2003) y Trckova *et al.* (2004), han trabajado con diferentes concentraciones de carragenina, obteniendo mejores resultados con las concentraciones más altas, alrededor del 0.5%, pero sin notar un cambio importante cuando esta concentración se excede.

En el rubro de geles firmes desmoldables se pueden encontrar diversos productos en el mercado mexicano que cumplen con las características antes descritas de una leche gelificada, a continuación se resumen algunos, así como los ingredientes correspondientes al listado en la etiqueta.

- Postre estilo flan sabor vainilla “Art”

Leche parcialmente descremada de vaca, azúcar, almidón, crema pasteurizada de vaca, jarabe de caramelo, saborizante, amarillo 5, rojo 40, sorbato de potasio, sal yodatada y carragenina.

- Flan “Danette”

Leche descremada pasteurizada y/o reconstituida pasteurizada de vaca, azúcar, crema, caramelo, sólidos de leche, carragenina, saborizante, pirofosfato de sodio, betacaroteno y amarillo 5.

- Flan “Lala”

Leche parcialmente descremada de vaca, azúcar, crema pasteurizada de vaca, leche descremada en polvo, almidón modificado, saborizante artificial, carragenina, fosfato disodico, amarillo 5 (tartrazina), amarillo 6, sorbato de potasio y nisina.

1.1.2 Proceso

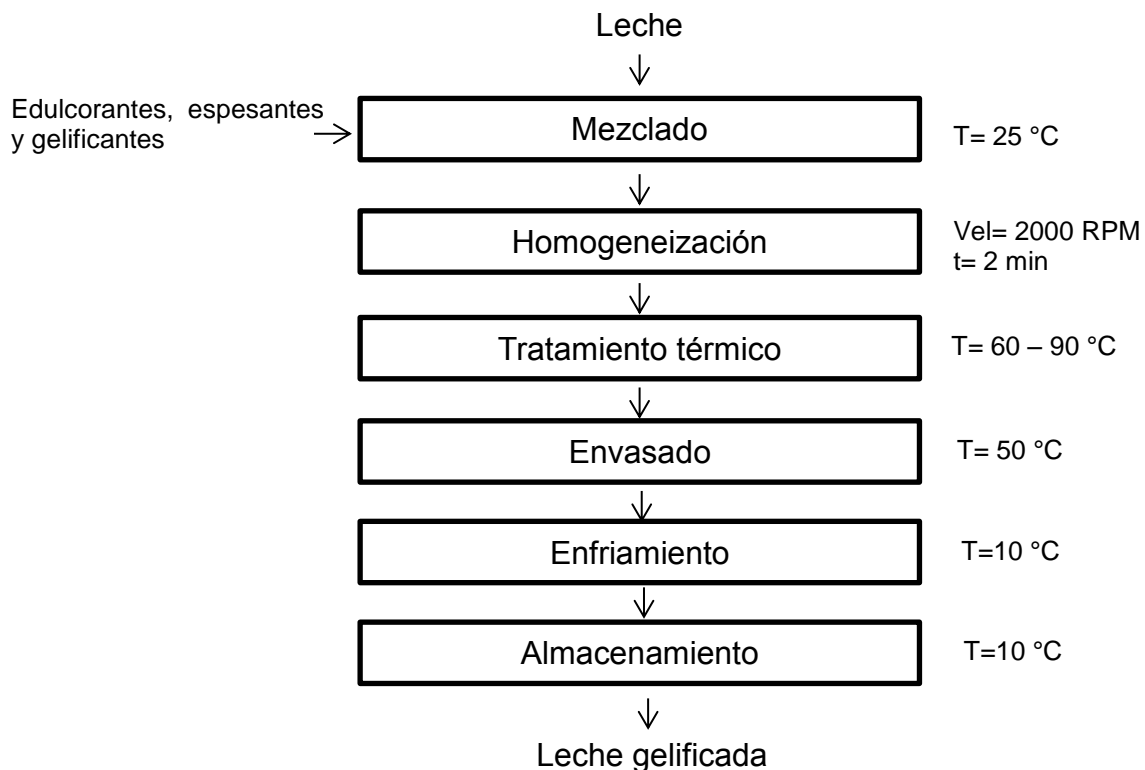


Figura 1.1 Diagrama de proceso para la elaboración de una leche gelificada (Benavides, 2011).

El proceso de elaboración de las leches gelificadas consiste en la adición de los ingredientes a la leche fría y homogenizada, con un posterior calentamiento de la mezcla a temperaturas entre 60 y 90 °C, el propósito del tratamiento térmico es la eliminación de los microorganismos que contenga la leche y adicionalmente inactivar en mayor o menor grado las enzimas lácteas presentes.

Las leches gelificadas pueden pasteurizarse para su venta en expositores refrigerados, o esterilizarse por un procedimiento de alta temperatura en un corto tiempo (UHT, por sus siglas en inglés), que permite su almacenamiento a temperatura ambiente (Varnam, 1994). En la Figura 1.1 se esquematiza el proceso de elaboración general para la obtención de leches gelificadas.

1. Mezclado y homogeneización

En estas etapas, se agregan los ingredientes (edulcorantes, espesantes y gelificantes) que no se ven afectados por la temperatura o que necesitan la temperatura para su activación, además de que se busca conseguir un tamaño de partícula homogéneo, no sólo de los glóbulos grasos, sino también de los ingredientes que se le han añadido a la leche, estos homogeneizadores constan de una bomba de alta presión y dos válvulas de homogenización, una de alta y otra de baja presión. La leche pasa por la primera válvula donde se rompe el glóbulo de grasa a un tamaño no superior a 1.2 μm de diámetro, con el paso por la segunda válvula, lo que se pretende conseguir es mantener el tamaño de los glóbulos y que no se vuelvan a unir (Fernández, 2013). Esta operación puede o no hacerse a la par con el tratamiento térmico.

2. Tratamiento térmico

El tratamiento térmico que se realiza en esta etapa es similar al llevado a cabo para el acondicionamiento de la leche cruda para su consumo. Las micelas de caseína son estables a temperaturas de hasta 140 °C, por el contrario, las proteínas del lactosuero son relativamente termolábiles, sufriendo una intensa desnaturalización a 80 °C (Varnam, 1994), por lo que se debe cuidar la temperatura si se desean conservar estas proteínas intactas. En esta etapa, los

ingredientes que son más solubles a altas temperaturas (45-60 °C), como la carragenina se empiezan a hidratar (Venugopal, 2011). El tratamiento térmico se puede realizar en equipos como intercambiadores de calor de placa o tubulares, con una inyección de vapor en un sistema indirecto, lo que se refiere a que el vapor se aplica sin que entre en contacto con el alimento, utilizando una barrera de placa o tubular (Fernández, 2013).

3. Envasado

El envasado se produce generalmente en envases parcialmente creados en los propios equipos de llenado donde son previamente esterilizados para su posterior llenado y cerrado hermético. Para el envasado de postres lácteos se utilizan envases de poliestireno con tapas laminadas de aluminio recubierto de polietileno sellable con calor (Rodríguez, 2013). Lo que se desea con el envasado es lograr que el producto mantenga sus características organolépticas. Generalmente estos productos requieren ser envasados en caliente.

4. Enfriamiento

Posteriormente al tratamiento térmico, se enfría la mezcla de leche e ingredientes para completar su acondicionamiento térmico. En frío la estructura desordenada en forma de hebras extendidas de la carragenina se transforma en una estructura ordenada de hélice doble, esta transformación está acompañada por la agregación y formación del gel de carragenina (Puvanenthiran *et al.*, 2003). Por lo general ocurre en el envase.

5. Almacenamiento refrigerado

Desde su elaboración hasta su distribución final al consumidor, este tipo de productos deben ser almacenados en cámaras de refrigeración. Durante todo el proceso se debe cuidar el pH ya que la carragenina forma geles con la leche en un intervalo de pH de 6-7 (Mleko *et al.*, 1997), en leche ácida la carragenina no muestra “reactividad de la leche” que es el fenómeno cuando la concentración de

carragenina requerida para gelificar en leche es mucho más baja (Venugopal, 2011).

1.2 Funcionalidad de los ingredientes principales en leches gelificadas

Las leches gelificadas se elaboran a partir de leche pasteurizada o esterilizada, sacarosa u otro edulcorante, aromatizante, colorantes, estabilizantes, espesantes y agentes gelificantes (Varnam, 1994).

1.2.1 Leche

El principal papel de la leche en la formulación, además de ser el medio dispersante y una fuente de vitaminas y minerales, recae en las proteínas lácteas, éstas son las encargadas de interactuar con cualquier tipo de hidrocólide agregado a la leche.

En la leche hay dos tipos de proteínas, las presentes en el suero lácteo como la lactoglobulinas y lactoalbúminas, que son derivados de la hidrólisis de la β -caseína y las caseínas que constituyen por encima del 80 % del total de la proteína en la leche. Las caseínas se subdividen en α , β , γ y κ -caseína, son proteínas globulares, su naturaleza anfifílica facilita la interacción entre ellas y con iones como el calcio. Las propiedades de las proteínas lácteas se relacionan con el comportamiento de la leche durante el procesado, tanto debido a las características específicas de la micela de caseína como a la secuencia de aminoácidos que en definitiva determinan las propiedades funcionales (Varnam, 1994). Las reacciones más importantes de las proteínas lácteas son aquellas que conllevan a la desestabilización de las micelas proteínicas. Algunas de estas reacciones son tecnológicamente deseables, como la formación de un gel (Spreer, 1991).

1.2.2 Agentes gelificantes

Los agentes gelificantes son hidrocoloides capaces de interactuar con los proteínas o polisacáridos presentes en el alimento, que en condiciones de

temperatura y pH pueden formar redes tridimensionales donde quedará atrapada el agua. Las características del producto final dependen mucho del gelificante usado (Juan-Mei y Shao-Ping, 2016).

La carragenina es un polisacárido lineal sulfatado extraído de algas rojas que es soluble en agua. Por ser un biopolímero lineal se ha incrementado su uso como agente espesante o gelificante en la industria de alimentos y farmacéutica. Según la cantidad y la posición de sus grupos sulfatos la carragenina se clasifica en tres tipos utilizados en la industria, kappa (κ), iota (ι) y lambda (λ) (Venugopal, 2011), todos contienen alrededor de 22-35% de grupos sulfatos (Prajapati *et al.*, 2014), como se muestra en la Figura 1.2.

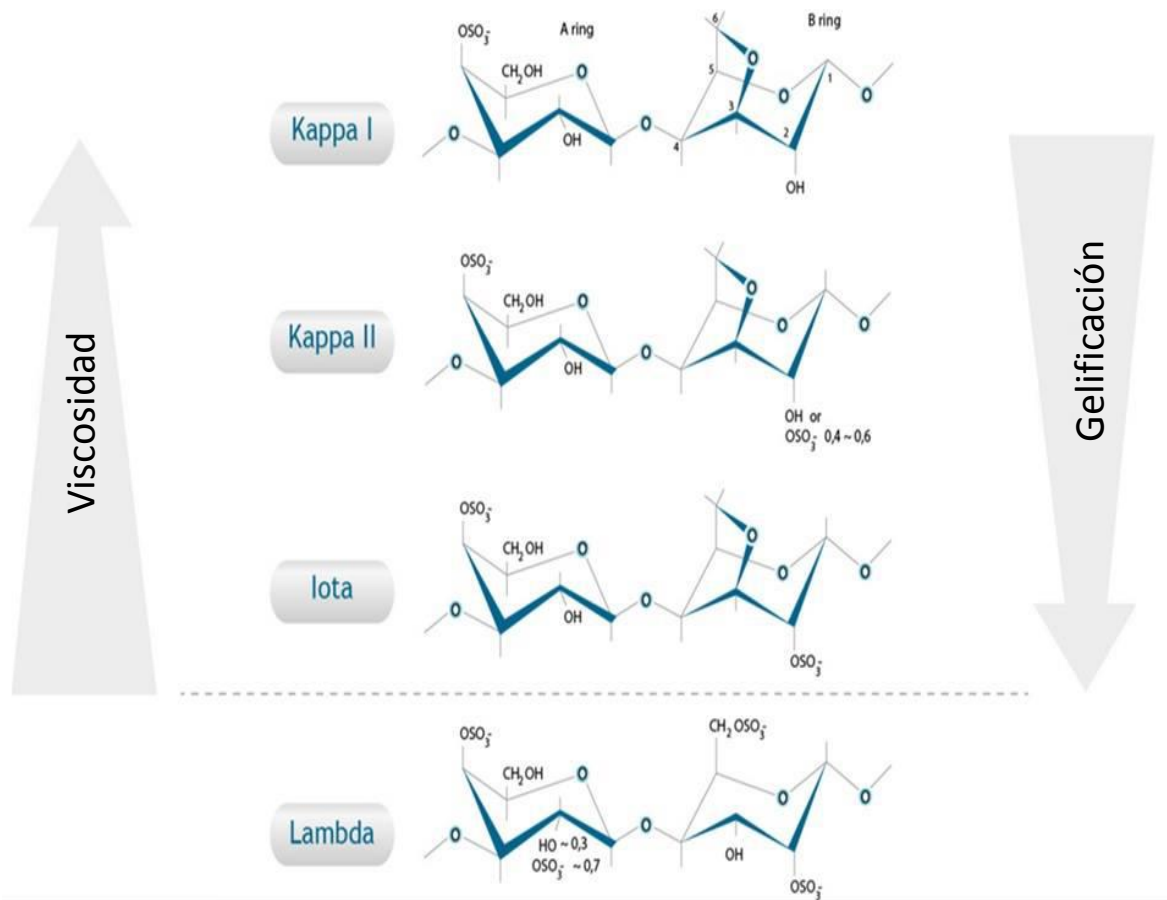


Figura 1.2 Estructura de diferentes tipos de carragenina (Gelymar, 2015).

A medida que la cantidad de grupos sulfatos aumenta, éstos proporcionan una mayor viscosidad y su poder gelificante disminuye, al igual que la temperatura a la

que es soluble, esto se debe a que la formación en hélice que se requiere para gelificar se presenta entre los carbonos $^4C_1-^1C_4$.

La λ -carragenina presenta grupos sulfatos en 4C_1 lo que evita la formación en hélice (Langerdorff *et al.*, 1997), es el caso de la κ -carragenina presenta un mayor poder gelificante porque es el tipo de carragenina con menor número de grupos sulfatos que puedan interferir en la formación de la red tridimensional.

La carragenina tiene la capacidad de formar complejos con las proteínas, para obtener geles, suspensiones, floculaciones y aumentar la estabilidad. Las disoluciones calientes de carrageninas κ e ι poseen la habilidad de formar geles termorreversibles a través de su enfriamiento, con textura rígida a elástica, transparentes, con distintos grados de retención de agua (Fennema, 1993), en el Cuadro 1.1, se describen las características finales de los geles formados por cada una de estas carrageninas.

Cuadro 1.1 Geles formados con carrageninas κ y ι (Boatella *et al.*, 2004).

Efecto Ca^{++}/K^+	<i>Kappa</i>		<i>Iota</i>
	Fuerza de gel elevada con K^+	Fuerza de gel elevada con Ca^{++}	Fuerza de gel elevada con Ca^{++}
Tipo de gel	Fuerte, quebradizo y con sinéresis	Elástico y cohesivo, sin sinéresis	Elástico y cohesivo, sin sinéresis
Concentración para formar gel	Agua Leche	0.5 – 1% 0.2 – 0.3%	0.5 - 1% 0.2 – 0.3%

El fenómeno de gelificación ocurre debido a la formación de una estructura de hélice doble por los polímeros de la carragenina. A temperaturas superiores a la temperatura de fusión del gel, los polímeros de la carragenina existen en la disolución como hebras o espirales aleatorias (Figura 1.3).

Durante el enfriamiento de la disolución, se forma la red tridimensional de polímeros, en la cual las hélices dobles constituyen los puntos de unión de las

cadena. El enfriamiento adicional causa la agregación de los puntos de unión para formar la estructura de gel tridimensional, como se muestra en la Figura 1.3.

La κ -carragenina gelifica en presencia de iones potasio y la rigidez del gel aumenta con la concentración de dicho ion. En cambio, la ι -carragenina gelifica en presencia de iones calcio, para formar un gel elástico, libre de sinéresis (Cuadro 1.1).

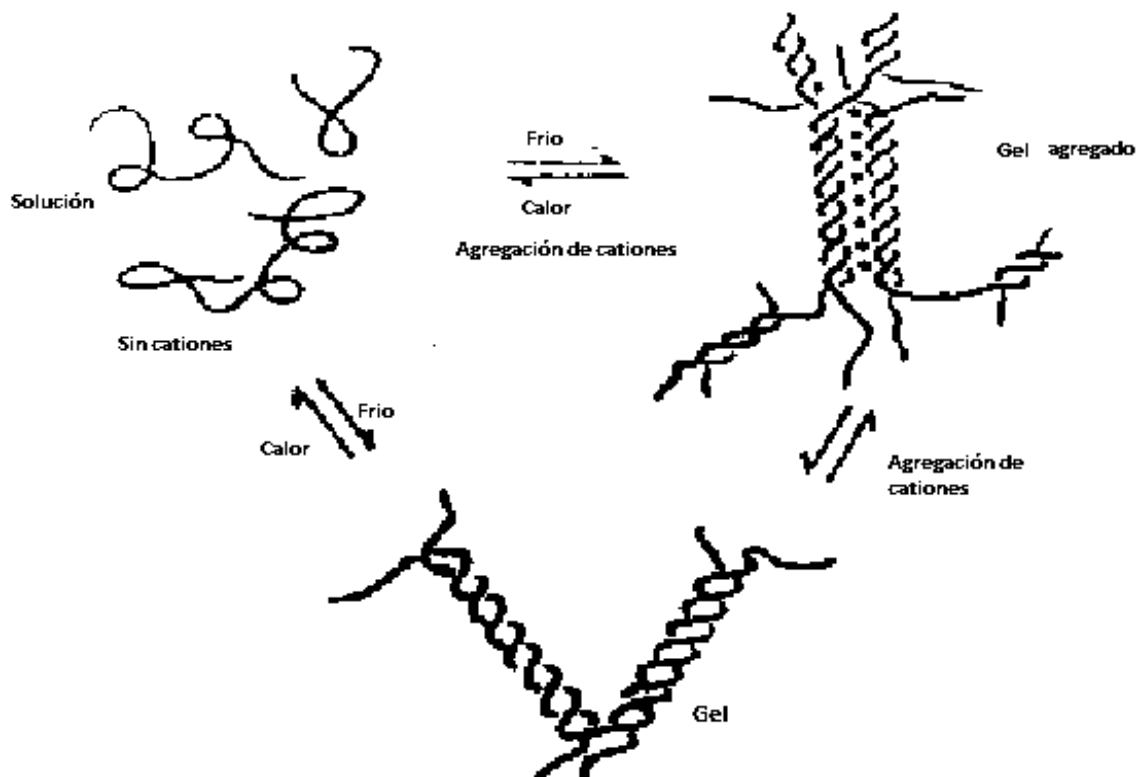


Figura 1.3 Modelo de la gelatinización de la carragenina en agua (Venugopal, 2011).

El contenido y posición de los grupos éster sulfatos determinan las diferencias primarias entre las carrageninas. En el caso de los dos tipos de kappa (κ) carragenina, la κ -I es la carragenina con el mayor poder gelificante, posee un contenido de éster sulfato de un 24 - 25% y entre un 35% y 40% de 3,6 anhidro galactosa; este tipo de carragenina produce geles firmes y quebradizos en agua con alta sinéresis, requiere baja temperatura para su disolución (aproximadamente

75 °C) y proporciona baja viscosidad al sistema en el cual es aplicada; la carragenina κ -II posee un contenido en 25% y 28% de éster sulfato y de un 32 a 34% de 3,6 anhidro galactosa, forma geles firmes y elásticos en agua y leche con moderada sinéresis, requiere una temperatura de aproximadamente 71 °C para su disolución, y brinda una mayor viscosidad comparada con la carragenina κ -I, debido a su mayor peso molecular, posee un alta reactividad con las proteínas lácteas por lo que es la carragenina que presenta mayor reactividad con la leche (Gelymar, 2015), la diferencia más significativa entre el tipo I y el tipo II, es la posible presencia de un puente anhidro 3-6 en la galactosa unido a través de la posiciones 1-4 y la posición del grupo sulfato, que en la carragenina κ -II puede estar en el carbono 4 ó 6 lo que facilita la interacción con las proteínas lácteas (Boatella *et al.*, 2004).

1.2.2.1 Interacción proteínas lácteas - carragenina

Las interacciones más estudiadas entre proteínas lácteas y polisacáridos se enfocan en las carrageninas (Olsen, 1989) y diversos autores le atribuyen a fenómenos diferentes la fuerte interacción entre carragenina y leche.

Las caseínas de la leche tienden a agruparse en micelas, las cuales a su vez están formadas por la asociación de submicelas a través de puentes de fosfato de calcio. Las submicelas son agregados esféricos de varias moléculas de caseína unidos por ataduras hidrófobas y electrostáticas. Las zonas hidrófilas de las caseínas están orientadas hacia el exterior de las submicelas. Las κ -caseínas están localizadas en la periferia de las micelas con su parte terminar hidrófila que se comportan como cadenas flexibles en el solvente (Langendorff *et al.*, 1997) (Figura 1.4).

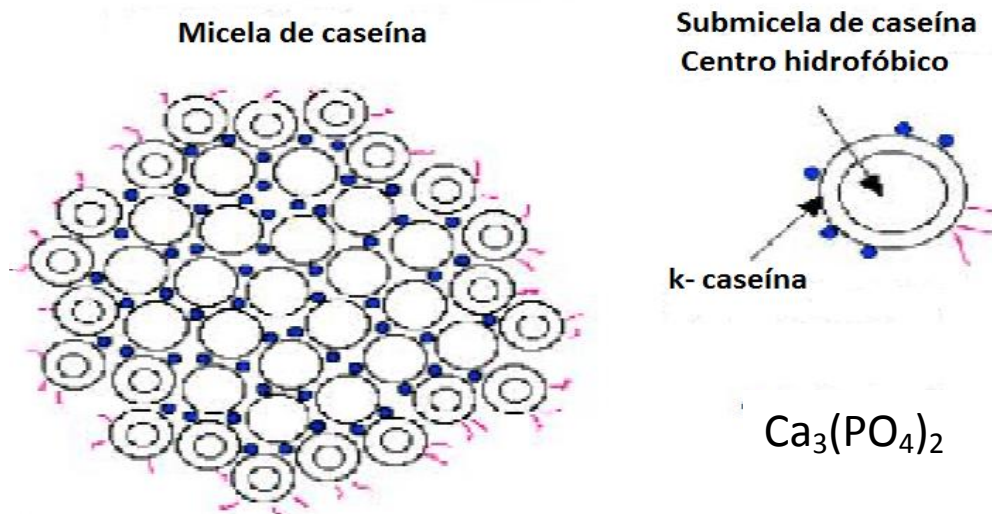


Figura 1.4 Esquematización de las micelas de caseína (Langendorff *et al.*, 1997).

Las propiedades de la carragenina en la leche están influenciadas por la interacción con la caseína; la carragenina forma una red donde quedan atrapadas las micelas de caseína (Trckova *et al.*, 2004), como se observa en la Figura 1.5 para las carrageninas iota y kappa, esta red se forma a una temperatura de 40 °C o menos, durante el enfriamiento, que es denominada temperatura de transición (Puvanenthiran *et al.*, 2003).

La temperatura de transición depende de la naturaleza y concentración de los cationes en solución; la gelatinización se promueve por iones K^+ , Na^+ y Ca^{2+} . La κ -carragenina que por encima de la temperatura de transición se encuentra en forma de hebras o espirales aleatorios y durante el enfriamiento (una vez que disminuye por debajo de la temperatura de transición) esa estructura se transforma a una de doble hélice o helicoidal, esta transformación está acompañada por la agregación y formación del gel (Puvanenthiran *et al.*, 2003).

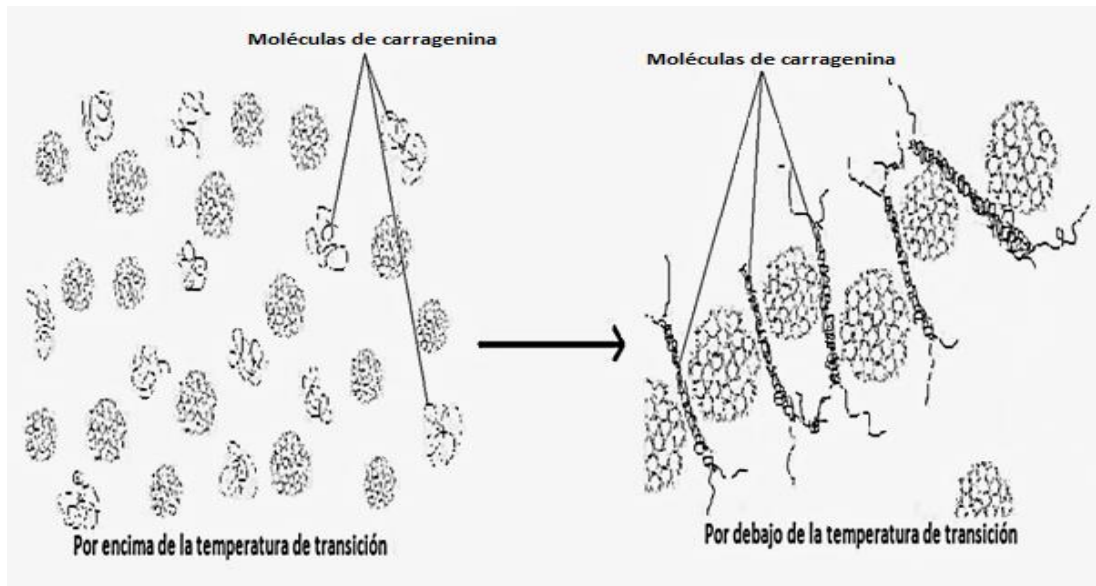


Figura 1.5 Esquematación de la interacción caseína-carragenina (Stainsby, 1980).

El efecto sinergista en la gelificación de carragenina y micelas de caseína es mayor comparado con cualquier otra proteína. Al formarse la red, interactúan cargas negativas de los sulfatos de la carragenina y grupos positivos de la caseína, pero la interacción depende del pH, la caseína por arriba de su punto isoeléctrico (4.4), presenta carga eléctrica negativa y por debajo, carga eléctrica positiva.

Por tanto, es posible que a pH neutro la interacción se dé gracias a la formación de puentes de calcio, mientras que en pH moderadamente ácido sea directa por carga eléctrica opuesta; además de lo anterior es posible la formación de puentes de hidrógeno como se ve en la Figura 1.6. A valores de pH por encima de 4.4, la carragenina y la caseína presentan la misma carga neta pero a pesar de esto ambas moléculas no se repelen, esto se puede deber a dos cosas (Snoeren y Payens, 1976):

- Formación de puentes de Ca^{2+} entre las dos moléculas.
- La κ -caseína está constituida por un gran número de aminoácidos, algunos más electropositivos que otros, existiendo una gran región positiva para hacer posible la interacción electrostática con la carragenina.

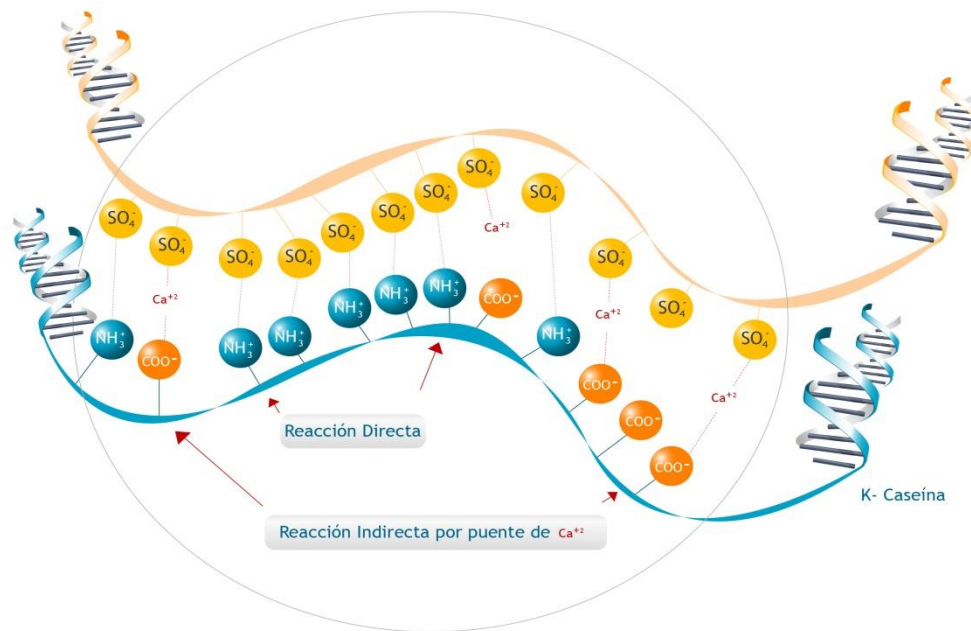


Figura 1.6 Interacción carragenina – proteína (Gelymar, 2015).

En los sistemas lácteos la interacción entre la caseína y la carragenina no es la responsable de la gelificación. Durante el enfriamiento, sectores de moléculas de carragenina forman la doble hélice como en los sistemas de agua, pero la interacción caseína- κ -carragenina, refuerza esta red por los enlaces cruzados entre los restos de carragenina, y como resultado la cantidad necesaria de carragenina para gelificar un sistema lácteo es mucho menor que la requerida para gelificar un sistema en agua, este fenómeno es conocido como “reactividad de la leche” (Venugopal, 2011).

La reactividad de la leche es un término usado para describir la funcionalidad de los estabilizantes en sistemas lácteos que estén por encima o por debajo de la concentración de gelificación (Ospina *et al.*, 2011).

1.2.3 Hidrocoloides espesantes

Los hidrocoloides son polímeros de alto peso molecular de diversos orígenes (animales, plantas, algas marinas y microorganismos) que al dispersarse o solubilizarse en agua o leche fría o caliente dan lugar a disoluciones viscosas y/o gelificantes que los hacen ideales para la fabricación de leches gelificadas (Boatella *et al.*, 2004).

En forma separada cada goma tiene propiedades individuales, pero al combinarse en la relación correcta sus efectos de viscosidad se pueden incrementar drásticamente, lo cual es una ventaja desde el punto de vista comercial como una manera de abaratar costos y proporcionar nuevas texturas. El uso de mezclas de hidrocoloides presenta numerosas ventajas tanto desde el punto de vista comercial como industrial. Por una parte, es posible obtener sinergismos que permitan la reducción de las dosis totales y, por otro lado, pueden elaborarse formulaciones específicas dirigidas a diferentes condiciones de uso (Ruiz, 2007).

Almidón

El almidón es el polisacárido más usado en la industria alimentaria por su poder espesante y gelificante, se extrae principalmente de tubérculos y cereales como la papa, yuca y maíz. El almidón está constituido por unidades de glucosa dispuestas en dos componentes: amilosa y amilopectina; su proporción varía de un tipo a otro según sea su fuente.

La amilosa es un polímero lineal de unidades de glucosa, esta molécula no es soluble en agua, pero puede formar micelas hidratadas por su capacidad para enlazar moléculas vecinas por puentes de hidrógeno y generar una estructura helicoidal, es la responsable de proporcionarle viscosidad al sistema; mientras que la amilopectina es un polímero ramificado de unidades de glucosa unidas, dichas ramificaciones se localizan aproximadamente a cada 15-25 unidades de glucosa, la amilopectina es parcialmente soluble en agua caliente, por su estructura ramificada es la responsable de gelatinizar, a mayor cantidad de amilopectina

tenga, más gelatinizará el almidón. Éstas macromoléculas se caracterizan por su grado de polimerización o ramificación, lo cual afecta su comportamiento frente a los procesos de degradación (Aristizábal y Sánchez, 2007).

Las propiedades más importantes que considerar para determinar la utilización del almidón en la elaboración de alimentos y otras aplicaciones industriales incluyen las fisicoquímicas: gelatinización y retrogradación; y las funcionales: solubilidad, hinchamiento, absorción de agua, sinéresis y comportamiento reológico de sus dispersiones y geles (Huc *et al.*, 2014).

Los almidones naturales pueden modificarse químicamente para producir cambios físicos que contribuyen a la estabilidad, apariencia, comodidad y funcionamiento en la preparación de los alimentos; esto puede ser por medios físicos con la finalidad de convertirlos en almidones pre-gelatinizados. Estos almidones a nivel industrial son llamados pre-geles o almidones instantáneos.

Actualmente los almidones pregelatinizados son usados en la industria por las propiedades que pueden proveer a productos alimenticios, mejorando las características de viscosidad y textura. Estos almidones tienen la propiedad de poder dispersarse en agua fría sin necesidad de someterse a altas temperaturas. Pueden utilizarse como aditivos estabilizantes, retenedores de humedad y espesantes (Martínez y El-Dash, 1993).

El almidón de maíz ceroso entrecruzado (AMCE), por estar constituido fundamentalmente de amilopectina (prácticamente exento de amilosa), no tiene propiedades gelificantes y el entrecruzamiento le proporciona resistencia a condiciones drásticas comunes en los procesos de elaboración de alimentos, como agitación, calentamiento y pH bajo dando como resultado que la viscosidad aparente alcanzada no sea afectada por estas condiciones por lo que se utiliza como espesante, estabilizante y texturizante (Casas-Alencáster y Pardo-García, 2005).

En cuanto a la interacción almidón-carragenina centrada en productos lácteos, se ha encontrado que la carragenina actúa como protector de los gránulos de almidón a la degradación (Huc *et al.*, 2014). Diversos autores han trabajado con mezclas de carragenina y almidón en la formación de geles, en proporciones de carragenina entre el 0.05-0.2% en combinación con 0.5-4% de almidón (Huc *et al.*, 2014; Gladkowska-Balewicz *et al.*, 2014), en un medio acuoso.

Carboximetilcelulosa

La carboximetilcelulosa es un compuesto orgánico derivado de la celulosa, es un polímero lineal, aniónico y soluble en agua y soluciones azucaradas, es un agente espesante, estabilizante y agente de relleno, su uso en alimentos tiene un porcentaje máximo de 0.9 a 0.95 %. La carga negativa de la carboximetilcelulosa favorece el desarrollo de sus características de viscosidad, particularmente esto se ve influenciado en productos con presencia de proteína. Es ampliamente usada en la industria alimenticia, porque no tiene olor ni sabor y produce soluciones claras, se disuelve rápido en sistemas acuosos fríos y calientes (Heinze y Pfeiffer, 1999).

La carboximetilcelulosa puede agregarse como polvo o, de preferencia, previamente disuelta, a concentraciones de 0.15 - 0.2% para sistemas lácteos gelificados; muchas veces se aplica en mezcla con carragenina y gelatina (Cando, 2010).

Para estabilizar leche chocolatada, Cando (2010) utilizó las concentraciones de carragenina de 0.01-0.025% y carboximetilcelulosa 0.1-0.3%. Por lo que se puede decir que en el caso de la mezcla carragenina-carboximetilcelulosa se usan con una relación de 1-10.

Goma guar

La goma guar es un polímero lineal contenido en el endospermo de las semillas de *Cyamopsis tetragonoloba*, contiene galactosa y manosa, el intervalo varía dependiendo del origen de las semillas, pero se considera que contiene una

unidad de galactosa por cada dos de manosa, produce soluciones muy viscosas, y no aporta ningún sabor, es capaz de hidratarse en agua fría y no se ve afectada por la presencia de sales.

La goma guar se utiliza como agente espesante, es altamente empleada en la industria de alimentos por su capacidad de ligar agua, las disoluciones de goma guar presentan una viscosidad alta a concentraciones de 1% y a una concentración de 3% en adelante forma disoluciones parecidas a un gel. Las disoluciones de goma guar son estables en amplio intervalo de pH (1.0 – 10.5), presentan un comportamiento reológico fluidificante además de reducir de forma notable el fenómeno de sinéresis (Gliksman, 1969).

Se emplea como estabilizante en productos que deben someterse a tratamientos de esterilización a alta temperatura, como la pasteurización de la leche y en derivados lácteos. Las mezclas de goma guar y caseína pueden originar una separación si se excede el porcentaje máximo de uso en productos lácteos que es de 0.6% (Kawamura, 2008).

1.2.4 Edulcorantes, saborizantes y colorantes

La principal función de los edulcorantes es proporcionar el sabor dulce tan característico de las leches gelificadas, en el caso de la sacarosa que se usa en altas concentraciones, puede proporcionar color y textura ya que actúa como agente espesante.

Los saborizantes y colorantes proporcionan sabor, aroma y color al alimento, para hacerlo más vistoso y apetecible al consumidor, en el caso del color es la primera que percibe el consumidor e influye en gran medida en la aceptación del producto, no tienen ninguna influencia en las propiedades reológicas y texturales del alimento. En un postre tipo flan, los saborizantes más usados son la vainilla, y jarabe de caramelo, los colorantes más usados son combinaciones de naranja,

rojo y amarillo huevo, como el annato, cúrcuma y el beta caroteno (Boatella *et al.*, 2004).

1.3 Propiedades de las leches gelificadas

1.3.1 Reología

Las propiedades reológicas de los materiales están directamente relacionadas con sus propiedades moleculares, como lo son su composición, peso molecular, si su estructura es lineal o ramificada y su concentración, así como las interacciones entre sus componentes y el medio dispersante (Venugopal, 2011).

Para describir la reología de un material, se deben definir algunos conceptos como deformación, que es el cambio o variación de la longitud, cambio del ángulo, o de volumen con respecto al inicial de un material sólido cuando se aplica una fuerza. La deformación puede ser bajo compresión, tensión o cizalla (producida por una fuerza tangencial).

En fluidos, el esfuerzo de cizalla (σ) es la fuerza tangencial por unidad de área requerida para mover un fluido a una velocidad de cizalla dada. La velocidad de cizalla ($\dot{\gamma}$) es la derivada de la deformación de cizalla en función del tiempo. Es una medida relativa del desplazamiento de las capas de fluido, entre el espesor de las mismas, cuando es aplicado un esfuerzo de cizalla (Bird *et al.*, 1960; Steffe, 1992).

Existen diferentes tipos de fluidos que pueden ser descritos por modelos reológicos según el comportamiento del esfuerzo de cizalla (o la viscosidad) cuando se aplica una velocidad de cizalla (Figura 1.7). Las pruebas reológicas se realizan en viscosímetros o reómetros obteniéndose gráficas de esfuerzo de cizalla en función de velocidad de cizalla o viscosidad en función de velocidad de cizalla.

Los fluidos pueden clasificarse en fluidos newtonianos y no newtonianos (Figura 1.7). En los fluidos newtonianos, el esfuerzo de cizalla medido es proporcional a la velocidad de cizalla aplicada, mostrando una relación lineal (Ecuación 1).

$$\sigma = \eta \dot{\gamma} \quad (1)$$

Donde:

η = Viscosidad absoluta o dinámica (Pa•s)

σ = Esfuerzo de cizalla (Pa)

$\dot{\gamma}$ = Velocidad de cizalla (s⁻¹)

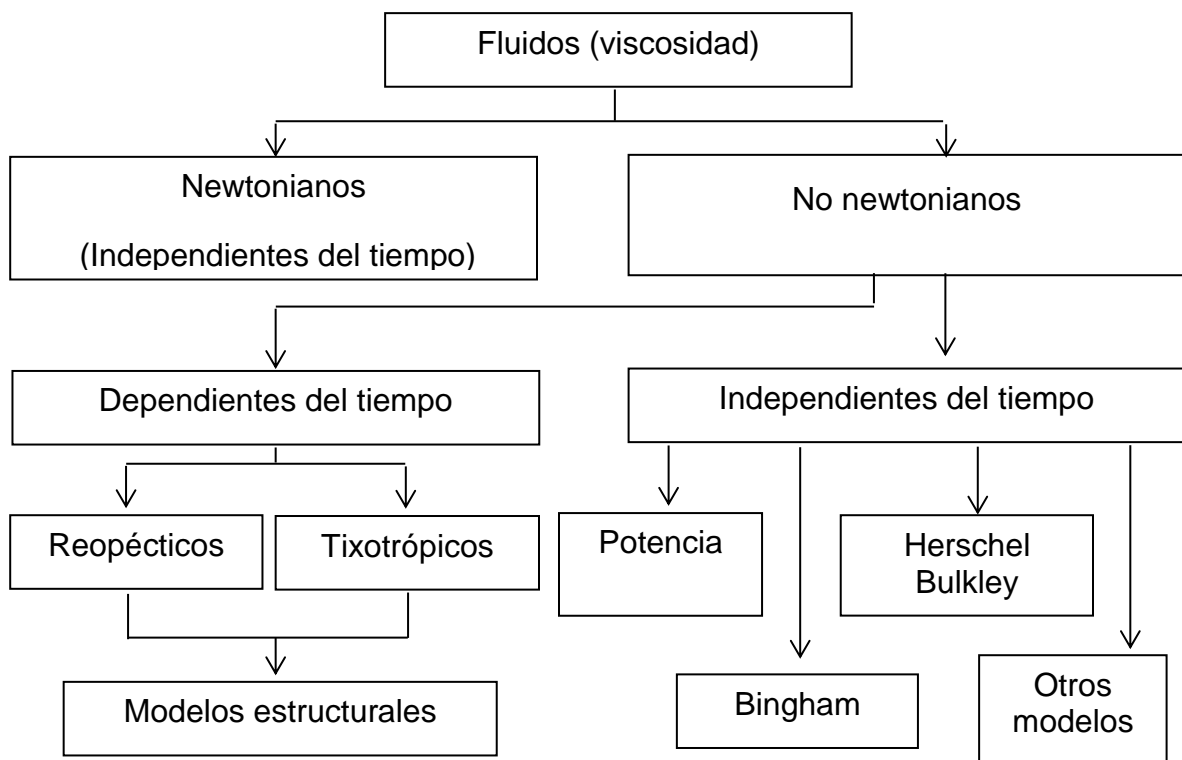


Figura 1.7 Clasificación de tipos de fluidos (Ramírez, 2006).

Los fluidos independientes del tiempo de cizallamiento incluyen el modelo potencia, que se utiliza para describir materiales fluidificantes o espesantes. La función potencia representa al fluido no newtoniano cuando n es diferente a 1 (Steffe 1992) (Ecuación 2).

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

Donde:

K = Índice de consistencia ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)

n = Índice de comportamiento al flujo (adimensional). Para los fluidos fluidificantes se cumple que $n < 1$ mientras que $n > 1$ para los espesantes.

El modelo Herschel-Bulkley, representa un comportamiento más general que engloba al de todos los anteriores descrito por la Ecuación 3 (Steffe, 1992).

$$\sigma = \sigma_0 + K \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Donde:

σ_0 = Esfuerzo de cedencia (Pa)

El Plástico de Bingham, es una simplificación del modelo de Herschel-Bulkley con $n = 1$, en este caso K representa a la viscosidad plástica. El punto de fluencia de un plástico de Bingham marca la destrucción de una estructura interna estática, fluyendo después como newtoniano.

$$\sigma = \eta_p \dot{\gamma} + \sigma_0 \quad (4)$$

Donde:

η_p = Viscosidad plástica ($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

En los fluidos dependientes del tiempo de cizallamiento, la viscosidad depende no sólo de la velocidad de cizalla, sino también de la duración del cizallamiento. Se clasifican en fluidos tixotrópicos y fluidos reopécticos, denominados actualmente anti-tixotrópicos, en los primeros, el esfuerzo de cizalla o la viscosidad disminuyen con el tiempo de cizallamiento, mientras que en los reopécticos se incrementa.

Los métodos reológicos usados en leches gelificadas, se utilizan para caracterizar las propiedades mecánicas de la red que forma el gel y cómo se deforma (Venugopal, 2011). Sus propiedades reológicas dependen de las condiciones del proceso de fabricación y de las características particulares de algunos de sus ingredientes como del contenido en grasa de la leche, del tipo y concentración de hidrocoloides y de las interacciones entre ellos. Estas propiedades también dependen de la naturaleza de los agentes estabilizantes, espesantes y gelificantes y el tratamiento que éstos reciban durante el proceso de fabricación (Varnam, 1994).

La viscosidad de la carragenina depende de su concentración, temperatura y la presencia de otros solutos, las carrageninas comerciales generalmente están disponibles en un intervalo de viscosidad de 5 – 800 mPa•s. Las disoluciones de carragenina a una concentración de 1.5% a una temperatura de 75 °C, tienen viscosidades por debajo de los 100 mPa•s; presentan comportamiento fluidificante, en presencia de iones Ca^{2+} , la carragenina exhibe un comportamiento dependiente del tiempo de cizallamiento (Venugopal, 2011).

La Figura 1.8 muestra los resultados obtenidos de una caracterización reológica a mezclas de carragenina con diferentes tipos de leche, se observa un carácter fluidificante, cuando aumenta la velocidad de cizalla la viscosidad disminuye pero permanece más alta que la de carragenina sola. La viscosidad de la κ -carragenina sola fue de 0.008 Pa•s, cuando se agregó leche descremada en polvo (SMP) o concentrado de proteína de leche (MPC), el comportamiento cambió drásticamente con viscosidades de 2000 Pa•s.

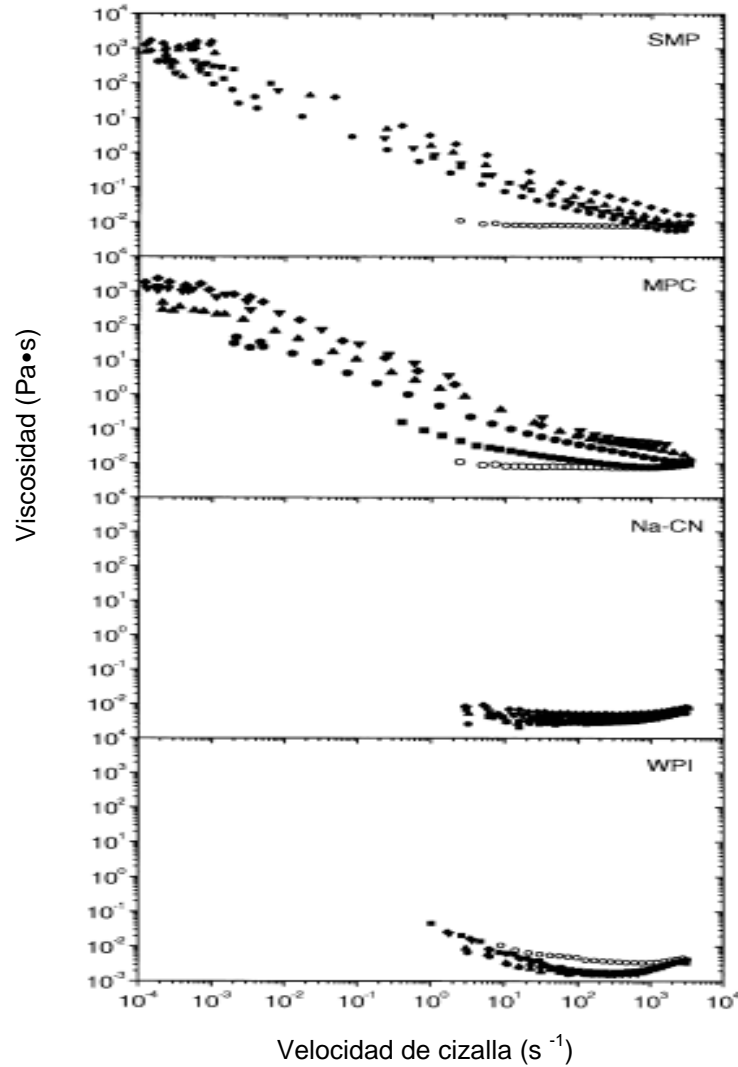


Figura 1.8 Viscosidad en función de la velocidad de cizalla, en mezclas de κ -carragenina al 0.1 %, con diferentes tipos de leche, a concentración de proteína de leche, \circ 0 %; \blacksquare 1 %; \bullet 2 %; \blacktriangle 3 %; \blacktriangledown 4 %; \blacklozenge 5 % (Hemar *et al.*, 2002).

Con este ejemplo se puede corroborar que la carragenina en presencia de proteínas lácteas, aumenta su viscosidad de una manera importante. La presencia de iones como el Ca^{2+} y Na^+ , el uso de hidrocoloides espesantes y el sinergismo que exista entre ellos también contribuyen al aumento de la viscosidad en las disoluciones de carragenina.

1.3.2 Textura

De manera general la textura de un alimento puede ser definida como el conjunto de atributos que, de un modo subjetivo, son apreciados por los sentidos de la vista, el tacto y el oído. Los atributos responsables de la textura de un alimento se relacionan con el sentido del tacto, es decir, son atributos que hacen referencia a las cualidades del alimento percibidas a través del tacto con dedos, lengua, paladar y dientes (Bello, 2000).

La textura es un factor importante para determinar la aceptabilidad de los alimentos. Se puede percibir cuando los alimentos se mezclan, se vierten, se bombean, se moldean y finalmente cuando se comen (Venugopal, 2011). En los alimentos procesados la textura depende de la presencia de ciertas estructuras químicas que corresponden a formas moleculares poliméricas, cuyas propiedades fisicoquímicas determinan las características texturales; los agentes de textura actúan estabilizando las características físicas de los alimentos a los que se adicionan, proporcionan textura, consistencia y estabilidad, permitiendo que el alimento se presente como recién preparado en el momento de su consumo. Los geles lácteos se clasifican según la textura que presenten (Martínez *et al.*, 2008) (Cuadro 1.2).

Cuadro 1.2 Clasificación de geles lácteos.

Tipo de postre	Textura
Pudines instantáneos	Gel débil, espeso pastoso.
Flanes de leches gelificadas	Geles firmes, desde quebradizos a suaves cremosos.
Postres cremosos, natillas	Cuerpos cremosos de fuerte a ligero.
Postres multicapa	Capas de geles desde cremosos hasta firmes.

Las pruebas texturales instrumentales a las que se someten los productos pretenden estimar objetivamente las características texturales, y se basan en la medida de la compresión, la resistencia a la tracción y la fuerza de corte o cizalla

(Saldaña *et al.*, 2015). Además de ser pruebas que buscan imitar el proceso de masticación y deglución de los alimentos para tener una idea de cómo se va a comportar a la hora de ser ingerido (Sancho *et al.*, 1999).

En materiales semisólidos como los gels, se puede determinar la fuerza de gel que es una prueba que consta de un ciclo de compresión, en ésta el dispositivo penetra la muestra y se determinan parámetros como pendiente, fuerza máxima de ruptura, distancia y área. La pendiente corresponde a la resistencia que opone el alimento a ser penetrado. La fuerza máxima del gel es el valor de la fuerza máxima en el pico de la gráfica (Figura 1.9), es la fuerza que opuso el alimento antes de la primera ruptura. La distancia es el trayecto en mm, recorrido por la geometría antes de la fuerza máxima. El área, representa el trabajo requerido para penetrar la muestra hasta la distancia indicada por la prueba (Ortega, 2012).

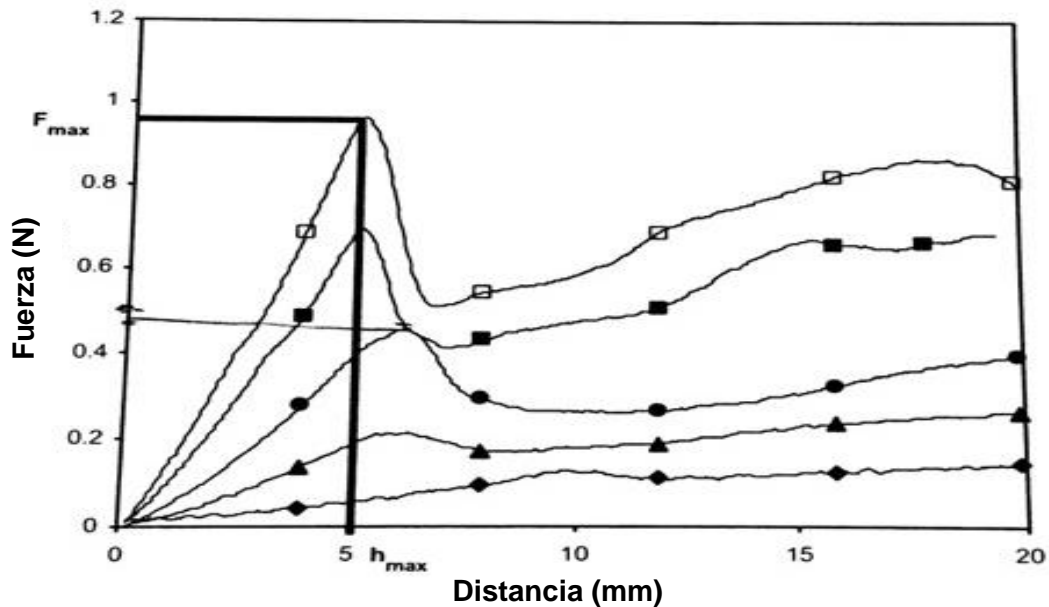


Figura 1.9 Gráfico de fuerza en función de la distancia de penetración, con concentraciones de carragenina de ◆0.1%, ▲0.2%, ●0.3%, ■0.4% y □0.5% (Trckova *et al.*, 2004).

La Figura 1.9 ejemplifica el comportamiento de un gel lácteo al ser sometido a una prueba de fuerza de gel en compresión variando la concentración de

carragenina de 0.1% al 0.5%. La fuerza máxima de gel a una concentración de 0.5% de carragenina fue de aproximadamente 0.95 N con condiciones de prueba de 5 mm de distancia de penetración, con una geometría cilíndrica de 6 mm de diámetro a 10 °C. (Puvanenthiran *et al.*, 2003; Trckova *et al.*, 2004).

Para la caracterización de un postre lácteo es importante determinar el perfil de textura, prueba que consta de dos ciclos de compresión, es una prueba imitativa en la cual se pretende reproducir el masticado de un producto siendo útil en el proceso de control de calidad y manufactura de los alimentos (Tunick, 2000), se obtienen parámetros mecánicos que incluyen dureza, fracturabilidad, adhesividad, elasticidad, cohesividad, gomosidad, masticosidad, entre otros (Caro, 2001).

Pero no todos los parámetros son útiles para todos los sistemas alimenticios. De esta prueba se obtiene una gráfica de fuerza en función del tiempo de la cual se pueden obtener directamente o bien calcular cada uno de los parámetros mencionados anteriormente. La dureza se define como la fuerza necesaria para alcanzar una deformación preseleccionada (Bello, 2000).

La cohesividad es la relación que existe entre el área de fuerza positiva durante la segunda compresión, con el área durante la primera compresión (Saldaña *et al.*, 2015), y se define como el grado con el que el material se desintegra bajo una acción mecánica. También se puede definir como la fuerza que mantienen unidos los enlaces internos que existen entre las distintas partículas que integran un alimento (Bello, 2000). En un análisis de perfil de textura cuando se refiere a áreas, se interpreta como trabajo, por lo que se puede decir que la cohesividad es el trabajo requerido para desintegrar un alimento. La adhesividad es el área negativa por debajo de la línea base del perfil que representa el trabajo necesario para separar la geometría de la muestra de alimento (Caro, 2001).

La gomosidad se define como el producto de dureza por cohesividad y es una característica de los alimentos semisólidos con un menor grado de dureza y un alto grado de cohesividad. La elasticidad está relacionada con la velocidad a la

que un alimento, deformado por una fuerza externa, recupera su condición inicial (altura), una vez que ha desaparecido la acción de dicha fuerza (Bello, 2000), entre el final de la primera mordida y el comienzo de la segunda. La carragenina, brinda elasticidad a sistemas de geles lácteos (Caro-Calderón *et al.*, 2011).

1.3.3 Estabilidad

La estabilidad de los alimentos consiste en lograr mantener sus características físicas, sensoriales y organolépticas desde su envasado hasta el momento de su consumo.

La inestabilidad en los sistemas gelificados se le llama sinéresis, y ésta no es más que la separación de las fases que componen una suspensión o mezcla. Es la extracción o expulsión del líquido contenido. Su medición es muy importante, ya que, durante la transportación y almacenaje del gel lácteo, puede presentar sinéresis en diferentes grados, lo cual es un atributo poco deseable para el consumidor, por lo que preferiblemente se busca su reducción (Caro-Calderon *et al.*, 2011).

La sinéresis en geles se ve influida por varios factores (Badui, 2006):

- Es afectada por el pH del sistema y alcanza su máximo cuando se presenta el punto isoeléctrico, por ejemplo, en la fabricación de yogurt acidificado, la gelificación y firmeza adecuada depende en gran medida de que se logre un pH entre 4.6 y 4.7, un pH más alto causará una estructura muy rígida parecida a la del queso y se presentará sinéresis.
- La temperatura a la que se mantiene el gel puede acelerar la sinéresis; la temperatura puede ser baja o alta, de acuerdo con el tipo de gel y su tendencia a la sinéresis, por ejemplo, al refrigerar la mantequilla ésta muestra sinéresis por medio de gotas de líquido depositadas en su superficie.
- La presión ejercida sobre un gel contribuye a su sinéresis.

- La naturaleza de la fase dispersa tiene un efecto sobre la sinéresis, por ejemplo, al disminuir la concentración de almidón en un gel aumenta su sinéresis.

Numerosos productos lácteos contienen polisacáridos funcionales que aumentan las características estructurales y texturales. Algunas proteínas lácteas, principalmente las micelas de caseína, son altamente incompatibles con los polisacáridos agregados a la mezcla, debido a esto la separación de fases entre polisacáridos y micelas de caseína ocurre casi inevitablemente promoviendo un fenómeno de sinéresis. En este sentido la κ -carragenina es usada frecuentemente para inhibir la separación (Spagnuolo *et al.*, 2005).

II. METODOLOGÍA

2.1 Objetivos

General

Evaluar el efecto de carragenina refinada sola y en mezcla con un hidrocoloide espesante, en la textura y estabilidad de leches gelificadas elaboradas a partir de dos tipos de leche (leche entera fluida o fórmula láctea en polvo), mediante seguimiento de la viscosidad durante el tratamiento térmico, así como la textura determinada instrumentalmente y sinéresis de los geles formados, proponiendo alternativas de mezclas de macromoléculas para la aplicación en postres lácteos tipo flan.

Particulares

1. Determinar el efecto de κ -carragenina refinada (κ I y κ II), sola y en mezcla, con un hidrocoloide espesante, carboximetilcelulosa (CMC), almidón de maíz ceroso entrecruzado (AMCE) o goma guar (GG), en el seguimiento de la viscosidad de una base láctea, durante el calentamiento e hidratación de los hidrocoloides.
2. Determinar el efecto de κ -carragenina refinada, sola y en mezcla, con un hidrocoloide espesante (CMC, AMCE o GG), en las propiedades de flujo de una base láctea a 50 °C y a 25 °C.
3. Determinar el efecto de la κ -carragenina refinada sola, y en mezcla, con un hidrocoloide espesante (CMC, AMCE o GG), en las propiedades texturales de leches gelificadas, mediante la determinación de fuerza de gel y perfil de textura a 10 °C.
4. Determinar el efecto de la κ -carragenina refinada, sola y en mezcla, con un hidrocoloide espesante (CMC, AMCE o GG), en la estabilidad de las leches gelificadas mediante el peso del exudado (sinéresis).
5. Comparar la textura de las leches gelificadas con la obtenida con una formulación base de flan proporcionada por el proveedor de carragenina.

2.2 Materiales

Para la elaboración de leches gelificadas se ocuparon dos tipos de carragenina refinada, kappa I estandarizada con maltodextrina Gelymar Carragel (PGU 5289 lote 47, Chile) y kappa II sin estandarización Gelymar Carralact (DGU 5419 lote 27, Chile), sola y en mezcla con hidrocoloides espesantes como almidón pre-gelatinizado de maíz ceroso entrecruzado (AMCE) Instant Clearjel (Estados Unidos), carboximetilcelulosa (CMC) de alto peso molecular CP Kelco (Cekol 100000, Estados Unidos) y goma guar Gelymar Gely Guar (7012 lote 12, Chile).

Se emplearon dos diferentes tipos de leche, Alpura fluida parcialmente descremada, ultrapasteurizada, adicionada con vitaminas A y D (lote L15 1109 15:00, México), contiene según la etiqueta, leche parcialmente descremada y vitaminas A y D, grasa butírica 28 g/L, proteína propia de la leche 31 g/L y Fortileche fórmula láctea en polvo que contiene según la etiqueta, leche descremada, grasa vegetal, lecitina de soya, vitaminas A y D, grasa vegetal 26 g/L, proteína propia de la leche 26 g/L.

Para la elaboración del producto de referencia flan base, se utilizó una carragenina estandarizada Gelymar Carralact (PPD 5666 lote 24, Chile), azúcar refinada Golden Hills (lote CO 41305, México), sal La Fina (lote L 00942 G-B, México).

2.3 Métodos

2.3.1 Etapas preliminares

Determinación de humedad

Se utilizó una termobalanza (OHAUS MB45, Estados Unidos), para determinar la humedad de cada uno de los ingredientes en polvo de la formulación. Ésta funciona sobre la base del principio termogravimétrico: Al comienzo de la medida, el analizador de humedad determina el peso de la muestra, a continuación, la muestra se calienta rápidamente por medio de la unidad halógena desecadora y la humedad se evapora. Durante la operación de desecación, el equipo determina continuamente el peso de la muestra y presenta el resultado. Cuando la desecación termina, el resultado se muestra cómo contenido de humedad en

porcentaje. Se trabajó con unas condiciones de prueba de 1000 °C de temperatura, con una cantidad de muestra de alrededor de 0.5 g y se realizaron 5 repeticiones por ingrediente, posteriormente se calculó el peso seco de los polvos.

Establecimiento de condiciones de hidratación

Se prepararon disoluciones en medio acuoso con un agitador magnético con 0.1% de carragenina a dos diferentes temperaturas de dispersión (25 °C o temperatura ambiente y 40 °C o mayor, temperatura de solubilización de la carragenina), para establecer condiciones de hidratación de la carragenina sola, dando mejores resultados a temperaturas altas alrededor de 80 °C. Una vez establecida la temperatura de hidratación de la carragenina, las disoluciones se prepararon sustituyendo el agua por leche fluida, estableciendo las condiciones de agitación durante la dispersión cuidando que no haya formación de espuma. El tiempo de dispersión y calentamiento no debe sobrepasar los 20 minutos para evitar la degradación.

Establecimiento de la preparación de leches gelificadas

Se realizaron disoluciones de leche con carragenina a la concentración recomendada por el proveedor para gelificar (0.25%), verificando la gelificación de ésta con las condiciones de hidratación antes establecidas. Posteriormente se disminuyó en un 50 % la cantidad de carragenina sustituyendo con los otros hidrocoloides espesantes. La concentración de estos hidrocoloides espesantes estuvo basada en investigaciones ya realizadas de experimentos similares (Cando, 2010; Kawamura, 2008; Huc *et al.*, 2014) y documentos como fichas técnicas.

Elaboración del producto de referencia

Para la preparación del producto de referencia se utilizó una carragenina estandarizada para la aplicación de un flan en polvo, técnica proporcionada por Gelymar (2004).

Cuadro 2.1: Formulación flan base.

Ingredientes	%
Azúcar	10.42
Carragenina "flan base"	0.25
Sal	0.04
Leche fluida	89.29
Total	100

Se mezclaron los ingredientes secos (azúcar, sal y carragenina), hasta homogenizarlos, se agregaron sobre la leche líquida la mezcla de los ingredientes secos, con agitación constante, hasta dispersar completamente los ingredientes, se calentó la mezcla con una agitación constante con termo balanza y barra magnética hasta alcanzar 80 °C y se mantuvo ésta durante un minuto (para evitar excesiva evaporación), se moldeó en vasos de 48 mm de diámetro y 40 mm de altura. Se le realizaron pruebas texturales a los geles, para tomar los resultados como referencia en las formulaciones experimentales.

2.3.2 Formulación de leches gelificadas

Se prepararon las formulaciones resumidas en del Cuadro 2.2, de leches gelificadas usando como base leche entera fluida. Y posteriormente se realizaron las mismas formulaciones, sustituyendo el porcentaje de leche fluida, por 10 % de fórmula láctea en polvo y el resto de agua.

Cuadro 2.2: Formulaciones en las que se emplea leche fluida.

Ingredientes	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8
	%							
Carragenina κ -II	0.25		0.125		0.125		0.125	
Carragenina κ -I		0.25		0.125		0.125		0.125
Leche entera fluida	99.75	99.75	99.57	99.57	99.57	99.57	97.87	97.87
CMC			0.3	0.3				
Goma guar					0.3	0.3		
AMCE							2	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Cuadro 2.3: Formulaciones en las que se emplea fórmula láctea en polvo.

Ingredientes	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16
	%							
Carragenina κ -II	0.25		0.125		0.125		0.125	
Carragenina κ -I		0.25		0.125		0.125		0.125
Fórmula láctea en polvo	10	10	10	10	10	10	10	10
Agua	89.75	89.75	89.57	89.57	89.57	89.57	87.87	87.87
CMC			0.3	0.3				
Goma guar					0.3	0.3		
AMCE							2	2
Total	100	100	100	100	100	100	100	100

Preparación de la leche gelificada

Se hidrató primero la carragenina a 25 °C en un 10 % del total de la leche para formar una pasta, la leche en polvo se hidrató antes a 25 °C durante 10 min, con el resto de la leche (90 %) se dispersó el otro hidrocoloide a 25 °C para después juntar la pasta formada con la carragenina al resto de la leche, hasta este punto se denominará como “Base láctea”, la cual se ocupó para realizar las pruebas reológicas, posteriormente se llevó a un calentamiento a 80 °C por 5 minutos (en las muestras en que se mezcla con almidón, el calentamiento se realizó a 90 °C). Se vertieron en vasos de 48 mm de diámetro y 40 mm de altura, de aproximadamente 78 g y se refrigeraron durante 24 horas a 10 °C el resultado se denominan “Leches gelificadas” que se ocupan para las pruebas texturales y de estabilidad. Los sistemas se prepararon en un termo-agitador CIMAREC (SP-131325, Estados Unidos) a una velocidad constante de 665 rpm.

2.3.3 Reología

Se utilizó un reómetro marca Anton-Paar Physica Rheolab QC, Austria. El Rheolab QC es un reómetro rotacional de cilindros concéntricos cuya configuración permite seleccionar entre controlar la velocidad de cizalla o el esfuerzo de cizalla (Anton-Paar), en este caso se controló la velocidad de cizalla. Se utilizó un dispositivo de

cilindros concéntricos (diámetro externo 41.75 mm, diámetro interno 38.86 mm, con un espacio entre los cilindros de 2.89 mm).

Evolución de viscosidad durante el calentamiento

En una muestra de 70 g de base láctea, se empleó en un programa de 4 etapas como se muestra en el Cuadro 2.4, en la que se llevó a cabo un calentamiento a 80 °C para promover la gelificación de la carragenina (a 90 °C en el caso de las formulaciones que contenían almidón), a una velocidad de cizalla constante de 500 s^{-1} , con una velocidad de calentamiento y enfriamiento de 2 °C/min, una vez alcanzada la temperatura deseada se mantuvo por 5 minutos y se continuó con el enfriamiento. Se hicieron 3 réplicas de cada formulación.

Cuadro 2.4. Condiciones de prueba de seguimiento de viscosidad.

	1	2	3	4
$\dot{\gamma}$ (1/s)	500	500	500	500
T (°C)	25	25-80	80	80-50
Número de puntos	5	31	5	31
Tiempo (min)	5	30	5	15

Curvas de flujo

Posterior al seguimiento de viscosidad, se obtuvieron curvas de flujo a dos temperaturas, las condiciones se muestran en el Cuadro 2.5. Estas pruebas se realizaron dentro del equipo, durante el enfriamiento de la muestra, a 50 °C y a 25 °C. Se seleccionó la temperatura de 50 °C ya que empieza la gelificación de la carragenina. Se empleó una velocidad de enfriamiento de 2 °C/min. Se realizaron 3 réplicas por formulación.

Cuadro 2.5. Condiciones de prueba para la obtención de curvas de flujo.

$\dot{\gamma}$ (1/s)	500-1	500	500-1
T (°C)	50	50-25	25
Número de puntos	25	20	25
Tiempo (min)	4.2	13	4.2

Las curvas de flujo se ajustaron a una función potencia o a un modelo Herschel-Bulkley con el programa Microsoft Excel. Para determinar el esfuerzo de cedencia se suponen valores hasta obtener el valor de R^2 más cercano a la unidad.

2.3.4 Textura

Se utilizó un texturómetro Texture Analyser TA-XT2i, Inglaterra con una celda de carga de 5 kg.

Fuerza de gel

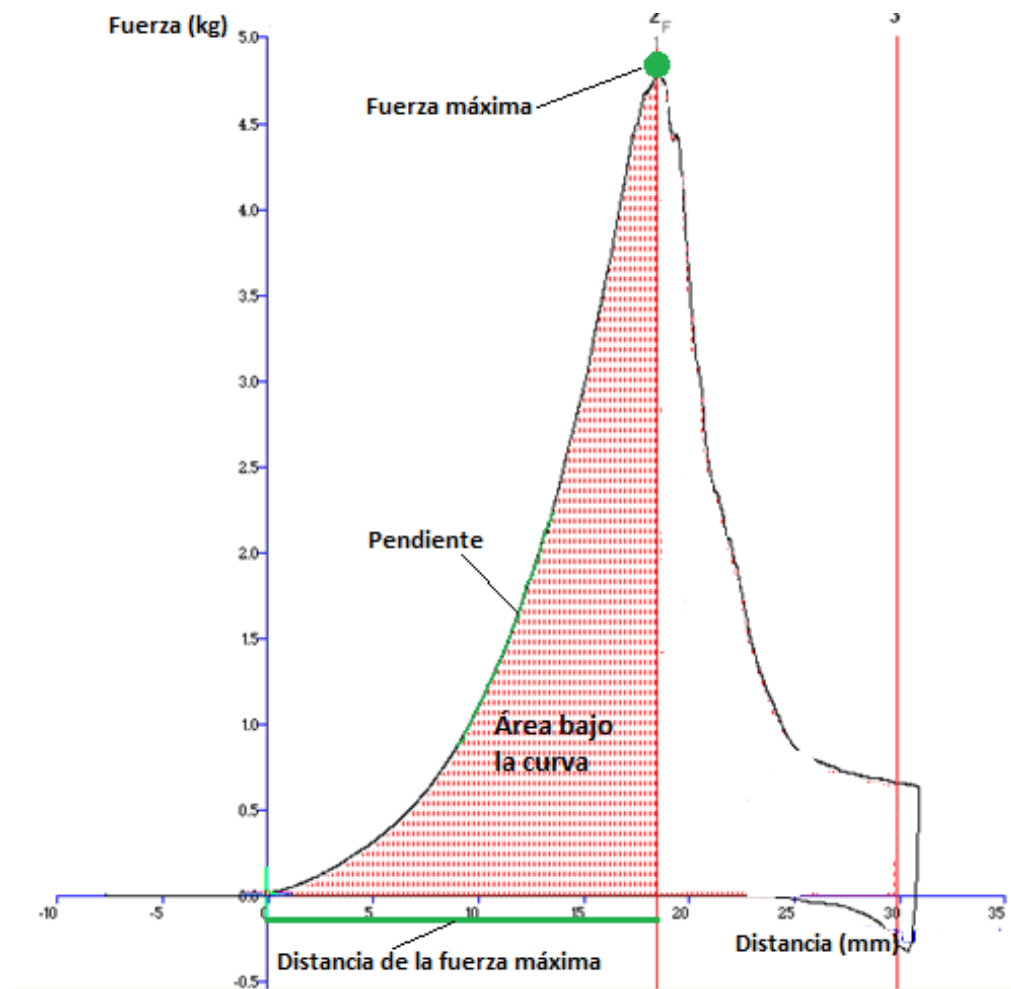


Figura 2.1 Gráfica general de fuerza de gel.

La fuerza de gel se determinó en una prueba que consta de un ciclo de compresión (fuerza en compresión), en la que un dispositivo penetra la muestra. Se realizó en muestras contenidas en vasos de 48 mm de diámetro y 40 mm de altura, de aproximadamente 78 g. Se empleó un dispositivo cilíndrico de acero inoxidable de 1 cm² de área, a una velocidad de acercamiento, prueba y retirada de 1.6 mm/s, con una distancia de penetración de 20 mm, la prueba se realizó a 10 °C controlando la temperatura ambiental del cuarto de prueba; se hicieron 5 réplicas por formulación. Se determinó la fuerza máxima de ruptura, la distancia de la fuerza máxima, el área bajo la curva y la pendiente con un programa de macros del mismo equipo (Figura 2.1).

Perfil de textura

El análisis de perfil de textura se realizó en muestras de un tamaño de 48 mm de diámetro y 40 mm de altura, de aproximadamente 78 g, desmoldados del vaso e invertidos, la prueba se realizó con una placa de acero inoxidable de 75 mm de diámetro, a una velocidad de acercamiento, prueba y retirada de 1.6 mm/s, con una distancia de compresión de 10 mm (25% de deformación relativa aparente). Se determinaron la dureza, cohesividad, elasticidad y gomosidad de cada una de las formulaciones. Se hicieron 5 réplicas por formulación.

Para la dureza se toma el valor directo obtenido en el pico máximo del primer ciclo de compresión, la cohesividad se obtiene con un cálculo, dividiendo el área bajo la curva de la compresión del segundo ciclo entre el área bajo la curva de la compresión del primer ciclo; la elasticidad se calcula dividiendo la distancia que recorre el dispositivo a partir de que empieza la compresión hasta el pico más alto del segundo ciclo entre la distancia del primero; y la gomosidad es el valor de dureza por cohesividad (Figura 2.2).

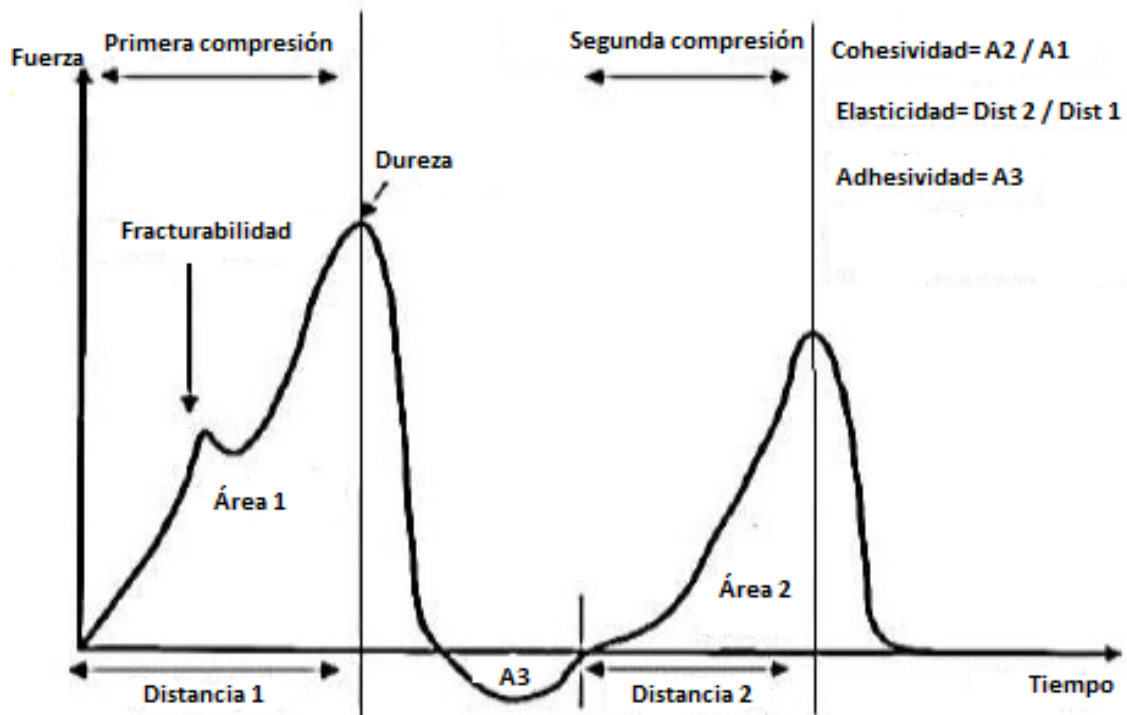


Figura 2.2 Grafica general del análisis de perfil de textura (Hleap *et al.*, 2010).

2.3.5 Estabilidad

La estabilidad se determinó mediante la cuantificación de sinéresis, la sinéresis se puede calcular mediante el volumen de líquido que exudan los productos (sobrenadante) durante su almacenamiento, o evaluarlo por centrifugación, a una velocidad de 3000 rpm por 10 minutos (Mora *et al.*, 2013). En este caso se realizó por el volumen del líquido drenado con una técnica proporcionada por la empresa Gelymar. Se elaboraron los geles de cada formulación como se describió anteriormente, una vez que se logró la total disolución de la muestra se retiró el vaso del termoagitador, se moldeó y se dejó tapado a temperatura ambiente por 2 horas, pasadas las 2 primeras horas se colocó la muestra tapada en refrigeración (5 °C) por 2 horas más, transcurrido ese tiempo se desmoldó separando el gel con espátula de las paredes del vaso, se secó el exceso de agua y se registró el peso del gel, este primer peso representa la P1, se regresó el gel al molde y se dejó en refrigeración a 5 °C por 24 horas, pasado este tiempo se sacó el gel del vaso, se secó el agua libre y se registró nuevamente el peso del gel, representando P2. Se

realizaron 3 réplicas. Se calculó el porcentaje de sinéresis con la siguiente relación (Gelymar, 2005).

$$\text{Sinéresis (\%)} = \frac{P_1 - P_2}{P_1} \times 100 \quad (5)$$

Donde:

P1 = Peso inicial del gel

P2 = Peso final del gel

Análisis estadístico

Se calculó la media y desviación estándar de los resultados de las réplicas. Con el fin de determinar si existen diferencias significativas en los resultados, se realizó un análisis de varianza (Anova) y una comparación de medias (Tukey) con el software Minitab 16.

III. RESULTADOS

3.1 Base láctea

En la primera parte de la experimentación se preparó la “base láctea”, que como se mencionó anteriormente son todos los componentes de la formulación dispersados, pero sin calentamiento previo, el calentamiento se realizará dentro del equipo (reómetro), y se realizaron ambas pruebas reológicas, seguimiento de viscosidad y las curvas de flujo a 50 °C y 25 °C, sobre la misma muestra y sin detener el equipo.

3.1.1 Seguimiento de viscosidad

A continuación se presentan las figuras comparativas del seguimiento de viscosidad de la base láctea, con carragenina sola y en combinación con los 3 hidrocoloides espesantes en función de la temperatura, con el fin de observar el comportamiento que presentan en combinación con carragenina cuando empiezan a hidratarse durante el calentamiento.

En la Figura 3.1 se comparan los 2 tipos de carragenina solas, la carragenina κ -II desarrolló la mayor viscosidad en todas las formulaciones de la experimentación, al inicio del calentamiento la viscosidad mostró una débil dependencia y a 50 °C alcanzó un valor máximo, el cual disminuyó ligeramente al incrementar la temperatura hasta 80 °C.

La base láctea con la carragenina κ -I mostró un comportamiento diferente, la viscosidad disminuyó ligeramente al incrementar la temperatura hasta alcanzar los 49 °C, a partir de esta temperatura comenzó a aumentar la viscosidad hasta alcanzar un valor máximo a 60 °C, y luego disminuyó poco hasta alcanzar los 80 °C

Durante el enfriamiento la viscosidad aumentó ligeramente en función de la temperatura en ambas muestras, pero en la muestra con carragenina κ -I, la

viscosidad fue menor en el enfriamiento al compararla con la obtenida durante el calentamiento.

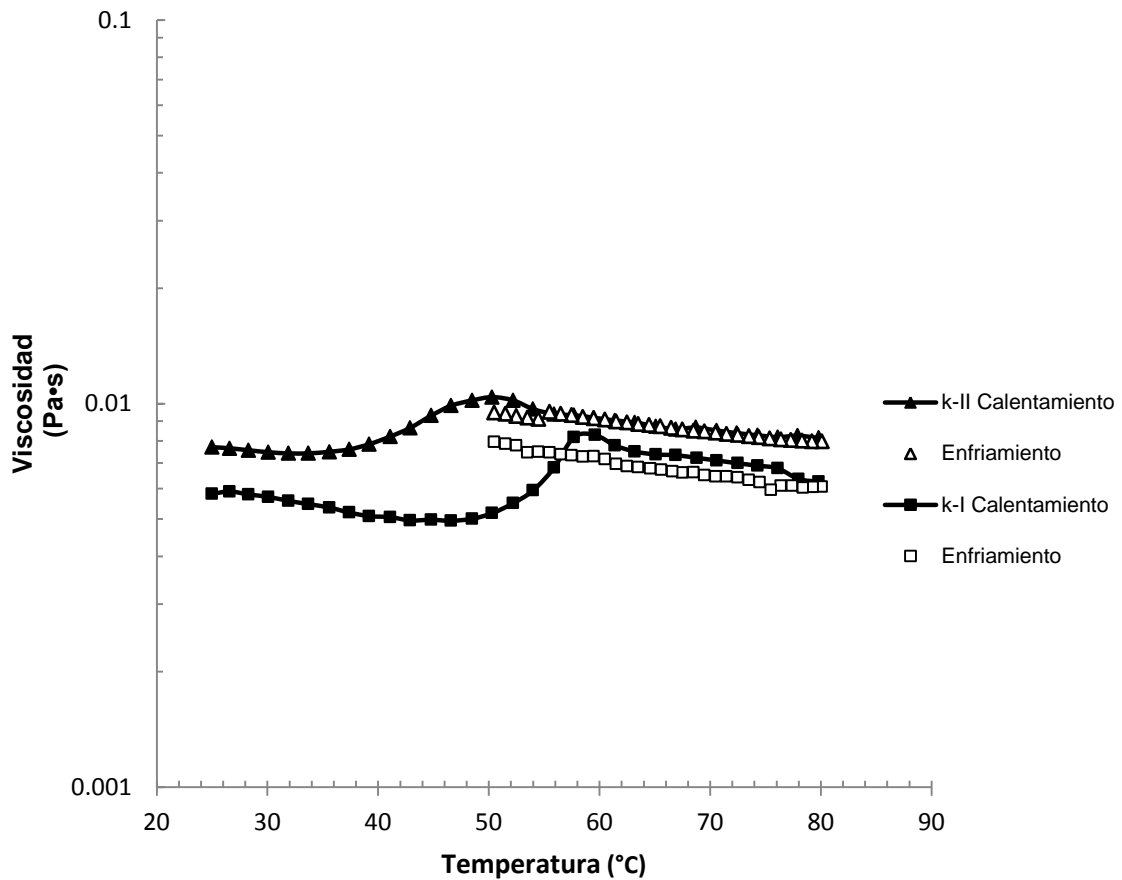


Figura 3.1 Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo leche fluida, carragenina κ -II y κ -I al 0.25%.

En la Figura 3.2 se presentan las bases lácteas con los dos tipos de carragenina usados en combinación con carboximetilcelulosa (CMC), donde se puede observar un comportamiento diferente al de la carragenina sola (Figura 3.1). En este caso, en combinación con la carragenina κ -II, se observó siempre una disminución de la viscosidad con el calentamiento, más característico del comportamiento de la CMC, como es reportado en la investigación de Cando (2010), además de que sólo se observa diferencia entre el calentamiento y enfriamiento entre $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y $60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Por otro lado, con la formulación de carragenina κ -I en combinación con CMC se obtuvo menor viscosidad que en la carragenina κ -II, y mostró una débil dependencia de la temperatura, ya que la viscosidad disminuyó ligeramente con el incremento de ésta; y la viscosidad durante el enfriamiento siempre estuvo por debajo en comparación con la del calentamiento.

Se puede interpretar que a pesar de que la carragenina κ -II desarrolla mayor viscosidad, la carragenina κ -I creó con la carboximetilcelulosa interacciones que resistieron más y que no se modificaron con el aumento de la temperatura y el cizallamiento (velocidad de cizalla constante).

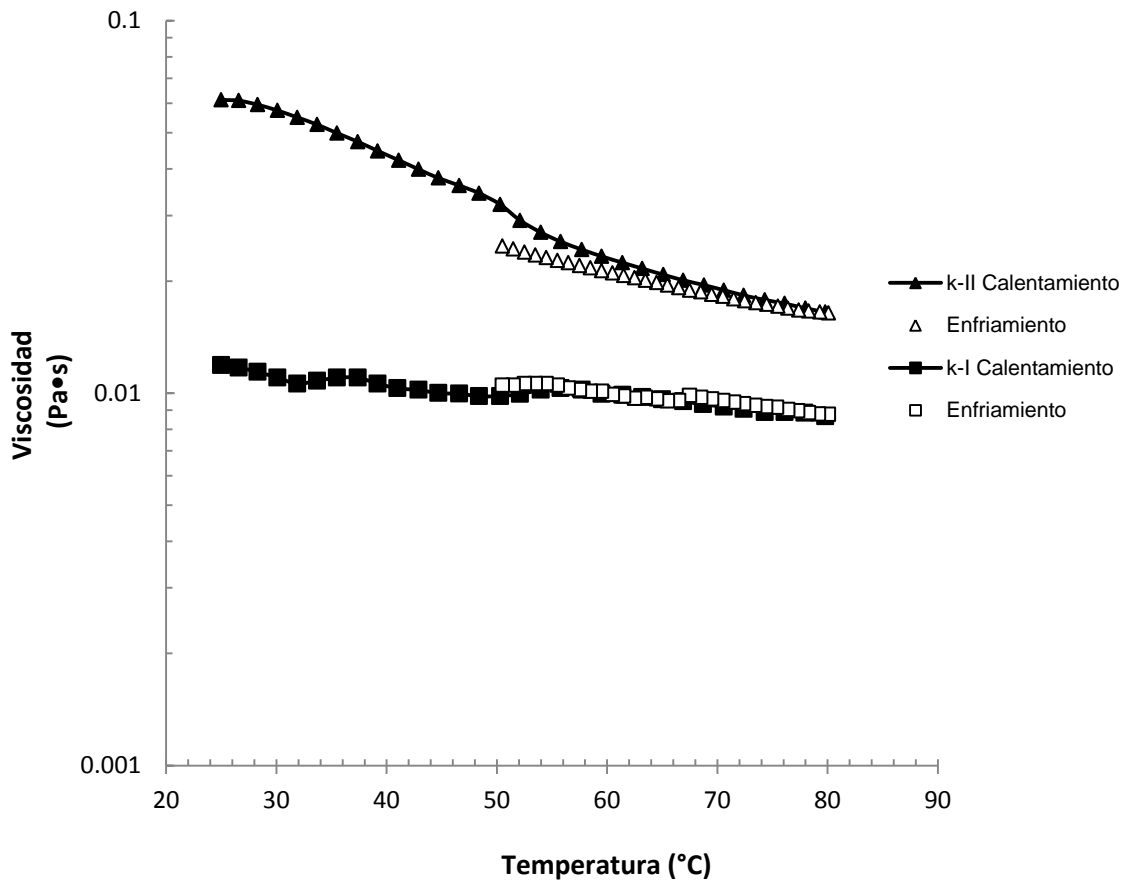


Figura 3.2 Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo leche fluida, carragenina κ -II y κ -I 0.125% con CMC 0.3%.

En la Figura 3.3 se presentan las bases lácteas con los dos tipos de carragenina en combinación con la goma guar. La formulación con carragenina κ -II, presentó mayor viscosidad durante toda la prueba en comparación con carragenina κ -I, y disminuyó en función del incremento de temperatura, como se observó con la mezcla de carragenina κ -II y CMC.

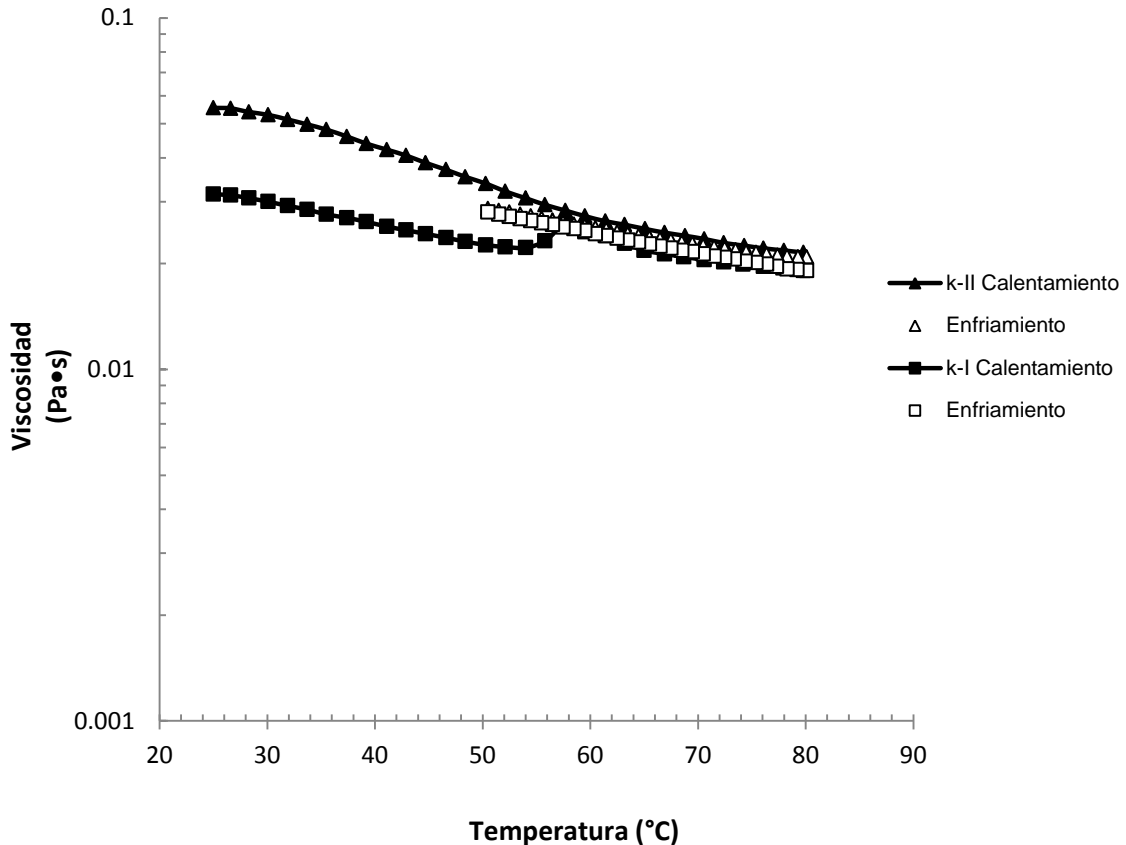


Figura 3.3 Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en base láctea conteniendo fórmula láctea en polvo, carragenina κ -II y κ -I 0.125% con goma guar 0.3%.

Sin embargo, al enfriarse, la viscosidad desarrollada no coincide con la observada en la curva de calentamiento entre $50 \text{ }^\circ\text{C}$ y $80 \text{ }^\circ\text{C}$, implicando cierta destrucción de la estructura, ya que el cizallamiento es constante. La viscosidad de la formulación con carragenina κ -I fue disminuyendo gradualmente durante el calentamiento con excepción de un pico formado a $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (aumento de viscosidad).

Al final del calentamiento la viscosidad en ambas formulaciones casi se igualó, por lo que las líneas del enfriamiento se sobrepusieron entre 50 °C y 55 °C. Cabe destacar que durante el enfriamiento las dos formulaciones coinciden en todo momento por lo que se puede decir que desarrollaron una viscosidad similar.

En la Figura 3.4 se presenta la base láctea con los dos tipos de carragenina en combinación con almidón modificado.

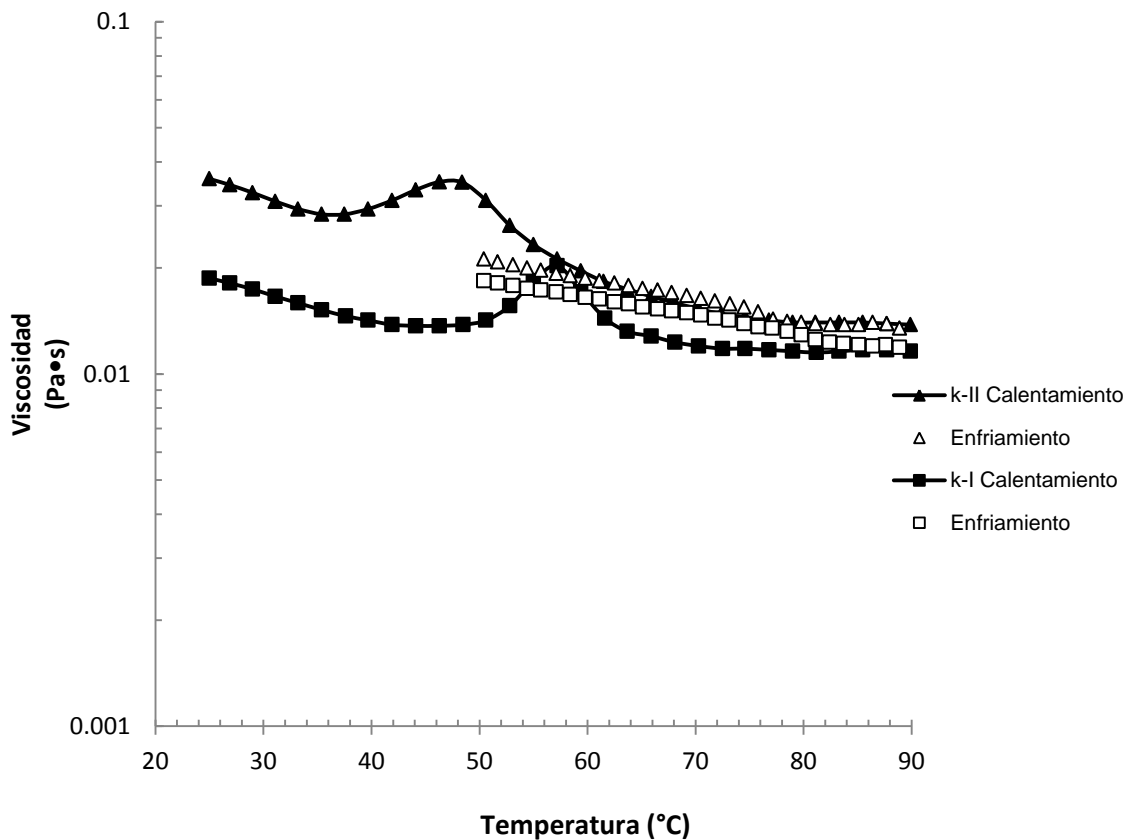


Figura 3.4 Viscosidad a velocidad de cizalla constante (500 s^{-1}), evaluada en el calentamiento y enfriamiento ($2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$), en la base láctea conteniendo leche fluida, carragenina κ -II y κ -I 0.125% con almidón 2%.

En estas formulaciones, el aumento de la temperatura promovió el hinchamiento del gránulo de almidón, por lo que al inicio se puede observar que la viscosidad disminuye por efecto del incremento de temperatura, pero después empieza a

incrementar hasta llegar a una viscosidad máxima, a 48 °C y 58 °C, para carragenina κ -II y κ -I, respectivamente. La viscosidad disminuye al incrementar la temperatura como en los sistemas descritos anteriormente, observándose una viscosidad casi constante entre 80 °C y 90 °C en la mezcla de carragenina κ -II con almidón modificado y entre 70 °C y 92 °C en la mezcla de carragenina κ -I con almidón modificado.

Durante el enfriamiento la viscosidad incrementó conforme la temperatura disminuía; y al igual que en todas las demás formulaciones mostradas, la carragenina κ -II siempre mostró una viscosidad mayor en comparación con la mezcla de carragenina κ -I.

Los resultados del seguimiento de la viscosidad evaluada a una velocidad de cizalla constante que se le realizaron a la base láctea de las leches gelificadas empleando leche fluida y fórmula láctea (polvo rehidratado al 10%) se presentan en el Cuadro 3.1; en este cuadro se muestran las viscosidades puntuales obtenidas en la prueba de seguimiento de viscosidad, a 25 °C al inicio de la prueba, a 80 °C, la temperatura más alta que se alcanzó durante la prueba, en el caso de las formulaciones en mezcla con almidón se presentan a 90 °C, ya que se requiere mayor tratamiento térmico y a 50 °C correspondiente al enfriamiento, antes de realizar la primer curva de flujo.

Esta prueba se realizó para promover la hidratación de la carragenina y de los hidrocoloides espesantes, así como el almidón que requieren el aumento de la temperatura para que se desarrolle su mecanismo de gelificación. El análisis del cuadro se hace con el fin de comparar la variación que presentó la viscosidad de las diferentes formulaciones durante puntos clave de la prueba.

Cuadro 3.1 Viscosidad (Pa•s) a velocidad de cizalla constante (500 s⁻¹) a diferentes temperaturas durante el seguimiento de viscosidad de formulaciones elaboradas con leche fluida y fórmula láctea en polvo.

Formulación		Leche fluida		
		25 °C	80 °C	50 °C
CARRAGENINA κ-II 0.25%	Media	0.008	0.008	0.009
	D. E.	3.66E-04	8.01E-05	1.44E-04
CARRAGENINA κ-I 0.25%	Media	0.006	0.006	0.008
	D. E.	6.16E-05	2.35E-04	7.12E-05
CARRAGENINA κ-II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.073	0.017	0.026
	D. E.	8.23E-03	5.44E-04	5.44E-04
CARRAGENINA κ-I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.014	0.009	0.010
	D. E.	1.52E-03	8.73E-05	1.41E-04
CARRAGENINA κ-II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.057	0.022	0.030
	D. E.	1.49E-03	9.74E-04	2.24E-03
CARRAGENINA κ-I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.034	0.019	0.026
	D. E.	1.77E-03	4.03E-04	1.38E-03
Formulación		25 °C	90 °C	50 °C
CARRAGENINA κ-II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.037	0.013	0.021
	D. E.	1.20E-03	3.30E-04	4.19E-04
CARRAGENINA κ-I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.026	0.013	0.020
	D. E.	5.15E-03	8.29E-04	1.31E-03
Formulación		Fórmula láctea en polvo		
		25 °C	80 °C	50 °C
CARRAGENINA κ-II 0.25%	Media	0.009	0.008	0.009
	D. E.	1.69E-04	2.08E-05	1.17E-04
CARRAGENINA κ-I 0.25%	Media	0.006	0.006	0.007
	D. E.	2.36E-04	1.00E-04	1.80E-04
CARRAGENINA κ-II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.080	0.019	0.028
	D. E.	1.15E-03	1.00E-04	5.03E-04
CARRAGENINA κ-I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.045	0.016	0.023
	D. E.	2.46E-03	4.51E-04	7.09E-04
CARRAGENINA κ-II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.064	0.023	0.032
	D. E.	1.63E-03	1.20E-03	1.34E-03
CARRAGENINA κ-I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.031	0.018	0.025
	D. E.	1.12E-03	4.73E-04	6.08E-04
Formulación		25 °C	90 °C	50 °C
CARRAGENINA κ-II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.088	0.015	0.023
	D. E.	4.60E-03	1.97E-03	1.85E-03
CARRAGENINA κ-I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.0505	0.0135	0.023
	D. E.	0.0038	0.0010	0.0024

Durante la prueba se pudo observar cómo fue cambiando la viscosidad de la base láctea de todas las formulaciones; y se puede apreciar que el comportamiento de las bases lácteas estuvo marcado por la adición del hidrocoloide debido a que el hidrocoloide espesante está en mayor proporción que la carragenina, así que en cada formulación se muestra comportamientos diferentes entre ellos y típicos del hidrocoloide en cuestión.

En cuanto al tipo de leche, no se ve afectado en gran medida los valores de viscosidad por esta variable. Al comparar las viscosidades de las formulaciones realizadas con leche fluida y fórmula láctea (polvo rehidratado), se puede observar que los valores más bajos de viscosidad se obtuvieron con la carragenina sola en ambas leches y los más altos con la mezcla de leche fluida, carragenina κ -II y CMC y fórmula láctea (polvo rehidratado), carragenina κ -II y goma guar a 80 °C y 50 °C.

3.1.2 Curvas de flujo

Las curvas fueron obtenidas al terminar la prueba de seguimiento de la viscosidad en calentamiento-enfriamiento, durante el enfriamiento (50 °C y 25 °C).

El propósito de graficar los datos obtenidos es visualizar el comportamiento del fluido y así decidir qué tipo de ajuste se aplica para obtener el modelo reológico que lo define. En general se observaron 2 comportamientos reológicos diferentes en las formulaciones realizadas, las que fluyeron sin necesidad de esfuerzo de cedencia (fluidificantes) y las que requirieron un esfuerzo de cedencia antes de empezar a fluir (Herschel-Bulkley) (Figura 3.5).

Las formulaciones de carragenina sola presentaron comportamiento fluidificante a la cizalla, como lo reporta Venugopal (2011), indicando que se reduce su viscosidad al aumentar la velocidad de cizalla (Figura 3.5).

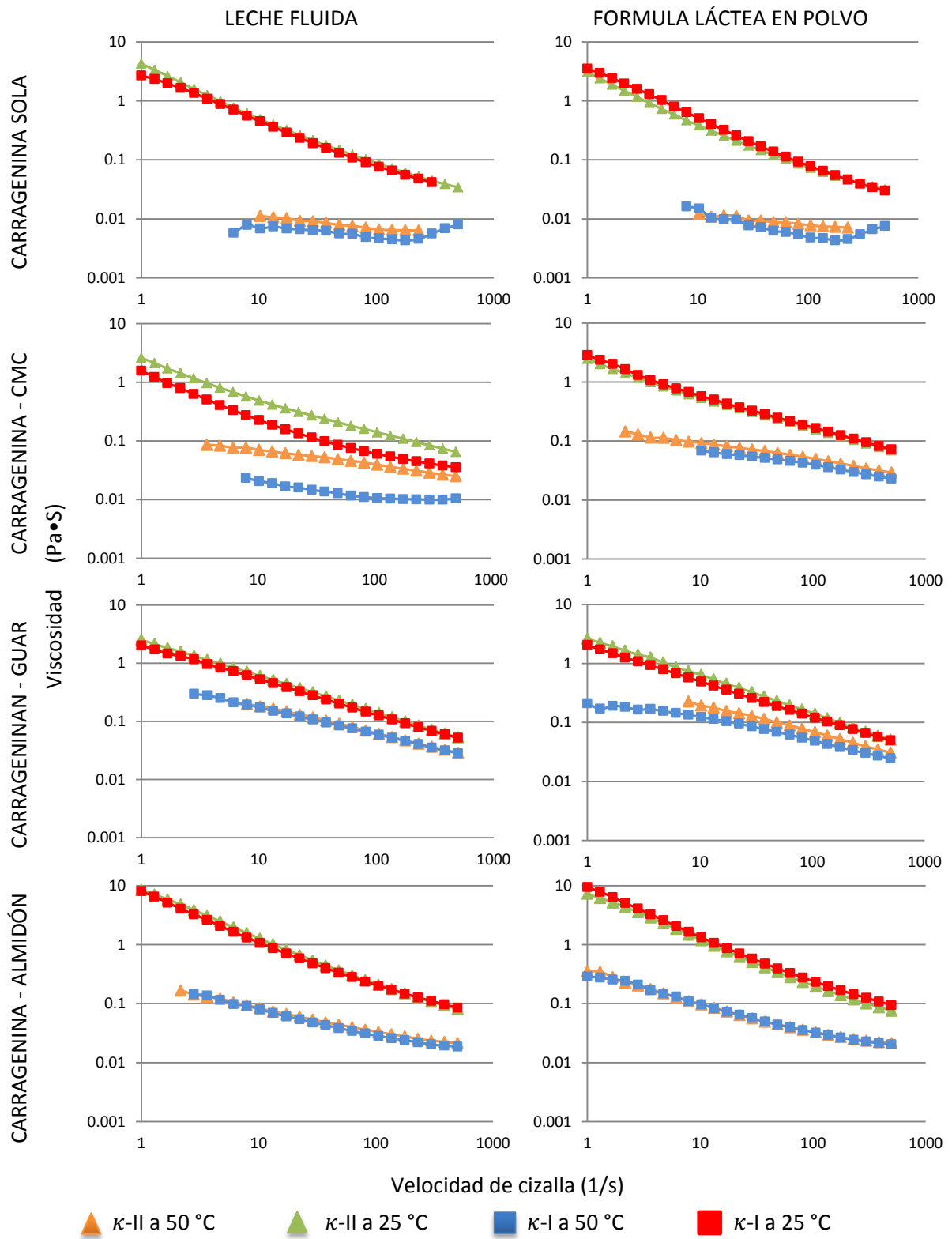


Figura 3.5 Gráficas comparativas de viscosidad en función de la velocidad de cizalla.

Algunas formulaciones, en especial las que contienen carragenina en mezcla con goma guar (Figura 3.5), mostraron comportamiento de la potencia, este modelo se utiliza para materiales fluidificantes y espesantes.

Aunque todas las formulaciones presentaron un comportamiento fluidificante, la mayoría requirió un esfuerzo de cedencia antes de empezar a fluir, en especial las que se realizaron a 25 °C (Cuadro 3.3), esto se debe a que la estructura molecular de los hidrocoloides produce una alta resistencia a fluir a baja velocidad de cizalla (semisólido estructurado), cuando esta velocidad aumenta, el sistema tiende a desestructurarse (rompimiento de enlaces fuertes) y/o desenredarse, haciendo que el fluido se comporte como fluidificante (Ziaee *et al.*, 2015).

El análisis de la reología realizado por Abdelrahim *et al.* (1991) y Ziaee *et al.* (2015), donde se elaboraron geles lácteos con carboximetilcelulosa y almidón en concentraciones superiores a las de este estudio, se observó que las curvas de flujo se ajustaron también a un modelo Herschel-Bulkley, y se atribuyó este comportamiento a los hidrocoloides empleados.

En todos los casos las curvas de flujo (Figura 3.5) a 25 °C y con carragenina κ -I presentaron valores mayores de la viscosidad en comparación a las curvas a 50 °C, lo que se le atribuye a que con la temperatura alta hay una mayor energía cinética que facilita el movimiento y a que la gelificación de la carragenina concluye con el enfriamiento de la mezcla. En las muestras elaboradas con carragenina sola, se observó que tuvieron en general una viscosidad baja durante toda la prueba, independientemente de utilizar leche fluida o fórmula láctea.

En el Cuadro 3.2 se resumen los parámetros de los modelos reológicos que ajustaron las curvas de flujo de las formulaciones elaboradas con leche fluida y fórmula láctea (polvo rehidratado) a 50 °C, sólo las formulaciones en mezcla con almidón se ajustaron al modelo Herschel-Bulkley.

Cuadro 3.2 Parámetros reológicos de las curvas de flujo a 50 °C.

Formulación		Leche fluida			Fórmula láctea en polvo		
		Esfuerzo de cedencia (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n	Esfuerzo de cedencia (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n
CARRAGENINA κ-II 0.25%	Media		0.02 ^D	0.75 ^{AB}		0.02 ^E	0.80 ^A
	D. E.		0.01	0.05		0	0.03
CARRAGENINA κ-I 0.25%	Media		0.03 ^D	0.70 ^B		0.02 ^E	0.67 ^D
	D. E.		0.01	0.09		0	0.03
CARRAGENINA κ-II 0.125%, CMC 0.3%	Media		0.14 ^{CD}	0.73 ^{AB}		0.18 ^C	0.72 ^{BC}
	D. E.		0.01	0.01		0.02	0.02
CARRAGENINA κ-I 0.125%, CMC 0.3%	Media		0.025 ^D	0.83 ^A		0.14 ^{CD}	0.72 ^{BC}
	D. E.		0.006	0.04		0.01	0.01
CARRAGENINA κ-II 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media		0.62 ^A	0.52 ^D		0.66 ^A	0.52 ^F
	D. E.		0.11	0.01		0.04	0
CARRAGENINA κ-I 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media		0.44 ^B	0.55 ^{CD}		0.38 ^B	0.56 ^E
	D. E.		0.07	0.02		0.02	0.01
CARRAGENINA κ-II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.16	0.14 ^{CD}	0.69 ^B	0.47	0.12 ^D	0.76 ^{AB}
	D. E.	0.08	0.03	0.03	0.04	0	0
CARRAGENINA κ-I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.16	0.17 ^C	0.64 ^{BC}	0.47	0.12 ^D	0.71 ^C
	D. E.	0.05	0.03	0.02	0.04	0.01	0.01

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

En estos resultados influye la temperatura a la que se llevó a cabo la prueba (50 °C) ya que la carragenina empieza a gelificar durante el enfriamiento a partir de los 40 °C, por lo que el mecanismo de gelificación no había concluido y la red no estaba formada por completo por lo que puso menos resistencia a fluir, sin embargo la hidratación del almidón ya se había llevado a cabo durante el calentamiento, por lo que a esta temperatura en las formulaciones con almidón ya había un producto estructurado por el almidón hidratado, que necesitó un esfuerzo de cedencia antes de fluir.

Las muestras que presentaron mayor índice de consistencia con diferencias significativas estadísticamente entre medias, fueron las formulaciones con carragenina κ-II y κ-I en mezcla con goma guar, las formulaciones con menor índice de consistencia fueron las elaboradas con carragenina sola y no hay

diferencia significativa entre las formulaciones en mezcla con CMC y almidón; esto se repite en ambas leches, lo que evidencia que la variación del tipo de leche no produce una diferencia significativa en los valores de índice de consistencia.

En cuanto al índice de comportamiento al flujo, no hay diferencia significativa entre las formulaciones a excepción de la elaboradas con goma guar en ambas leches que dieron los valores más bajos y las elaboradas con fórmula láctea en polvo y carragenina sola κ -I.

En el Cuadro 3.3 se presentan los parámetros de flujo obtenidos en las pruebas realizadas a 25 °C.

Cuadro 3.3 Parámetros reológicos de las curvas de flujo a 25 °C.

Formulación		Esfuerzo de cedencia (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n	Esfuerzo de cedencia (Pa)	K (Pa·s ⁿ)	n
		Leche fluida			Fórmula láctea en polvo		
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media	4.50	0.35 ^{DE}	0.60 ^A	2.89	0.32 ^E	0.60 ^A
	D. E.	0.44	0.13	0.06	0.11	0.06	0.03
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media	2.77	0.97 ^{BCD}	0.38 ^A	1.87	1.88 ^{BC}	0.30 ^D
	D. E.	0.75	0.30	0.05	0.70	0.59	0.04
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media	1.43	0.96 ^{CD}	0.56 ^A	0.87	1.15 ^D	0.53 ^B
	D. E.	0.06	0.04	0.01	0.15	0.02	0.01
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media	1.30	0.17 ^E	0.72 ^A	1.30	1.32 ^{CD}	0.53 ^B
	D. E.	0.10	0.04	0.04	0.26	0.06	0.01
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media		2.95 ^A	0.36 ^A		2.85 ^A	0.36 ^D
	D. E.		0.57	0.02		0.14	0
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media		1.73 ^B	0.42 ^A		2.01 ^B	0.40 ^{CD}
	D. E.		0.29	0.01		0.02	0
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	5.90	2.74 ^A	0.38 ^A	6.33	1.70 ^{BCD}	0.44 ^C
	D. E.	0	0.25	0.01	0.35	0.03	0
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	7.23	1.15 ^{BC}	0.55 ^A	7.87	2.31 ^{AB}	0.45 ^C
	D. E.	0.15	0.08	0.01	0.23	0.06	0.02

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

Se puede observar que un mayor número de muestras requirieron de un esfuerzo de cedencia antes de empezar a fluir en comparación con las elaboradas a 50 °C,

a esa temperatura probablemente la red formada por la carragenina ya estaba desarrollada, y fue necesario romperla. La formulación de carragenina κ -I con almidón requirió el mayor esfuerzo de cedencia.

Las muestras que presentaron mayor índice de consistencia, con diferencias significativas estadísticamente entre las medias, fueron la carragenina κ -II con goma guar en ambas leches y con un menor índice de consistencia la formulación de carragenina κ -I y CMC en leche fluida y la formulación de carragenina κ -II sola en fórmula láctea en polvo con una disminución de hasta el 94 % y sin diferencias significativas entre las demás formulaciones.

3.2 Leches gelificadas

En esta segunda parte de la experimentación tanto para las pruebas texturales como para la estabilidad, se trabajará con las leches gelificadas que son muestras de bases lácteas a las que ya se les sometió a un calentamiento y enfriamiento previo para la completa formación del gel y que no son las mismas muestras que se utilizaron en las pruebas reológicas.

3.2.1 Fuerza de gel

Esta prueba se realizó sin desmoldar los geles, cuidando que la geometría penetrara en un punto céntrico a una temperatura de 10 °C. En la Figura 3.6 se presenta una gráfica representativa de la prueba obtenida en las muestras, de ésta se obtienen la fuerza máxima, pendiente, distancia y área.

Las muestras que presentaron mayor fuerza de gel fueron las formulaciones con carragenina κ -I sola y con goma guar, las preparadas con carragenina κ -II sola y el flan base, además la diferencia entre sus valores promedio es estadísticamente distinta. Sin embargo, solamente la fuerza de gel de la formulación con goma guar, fue cercana a la fuerza de gel del flan base.

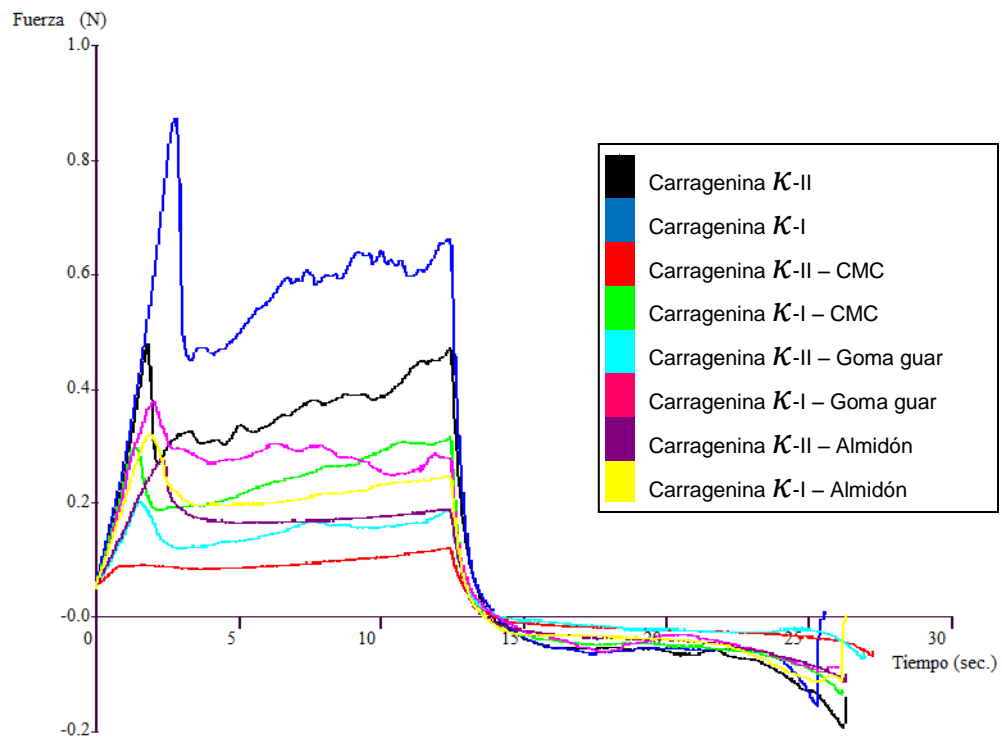
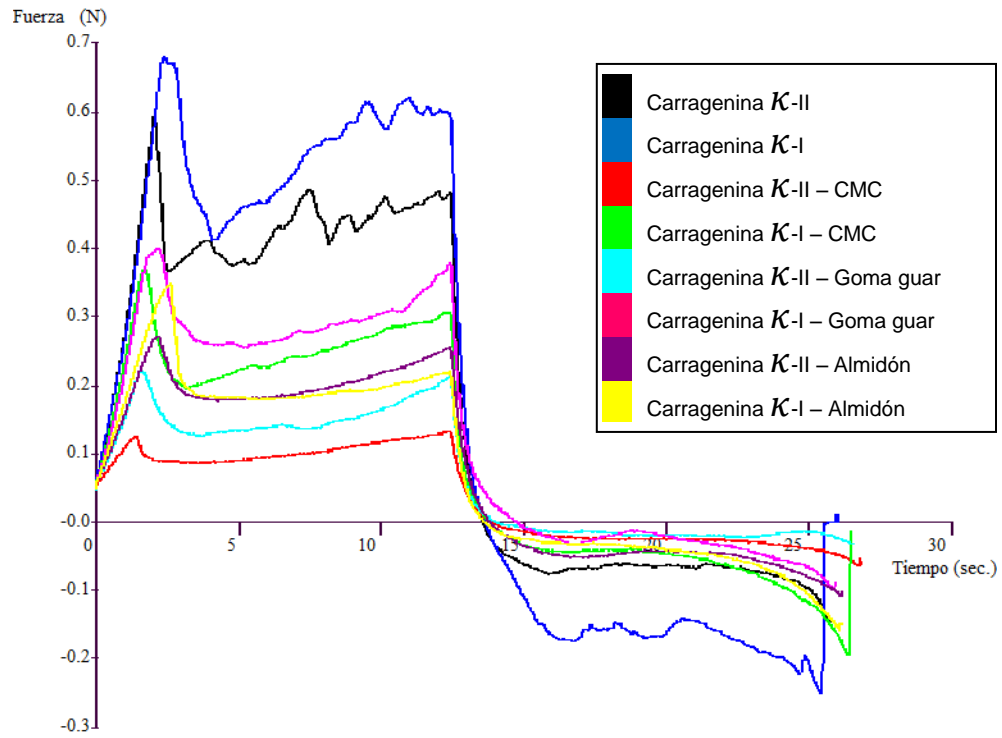


Figura 3.6 Gráficas comparativas de fuerza en función del tiempo de la prueba de fuerza de gel en formulaciones elaboradas con leche fluida (arriba) y formula láctea en polvo (abajo).

Los valores de fuerza máxima en las formulaciones elaboradas con carragenina κ -I fueron mayores respecto a las elaboradas con carragenina κ -II, comportamiento contrario a lo observado en las pruebas de viscosidad, donde las bases lácteas con carragenina κ -II presentaron mayor viscosidad y/o mayor índice de consistencia, lo que se le atribuye a las características propias de cada tipo de carragenina (Cuadro 3.4).

El valor más pequeño de fuerza máxima se obtuvo con la formulación elaborada con carragenina κ -II y CMC con 0.12 N y 0.09 N con leche y fórmula láctea (polvo reconstituido), respectivamente, con lo que se le puede decir que entre la carragenina y el CMC los enlaces formados son más débiles con respecto a los otros hidrocoloides utilizados.

La pendiente indica que las formulaciones que opusieron mayor resistencia a la penetración fueron las elaboradas con carragenina sola siendo los valores más altos, y los elaborados con carragenina κ -II en mezcla con CMC y goma guar los más bajos, disminuyendo casi en un 70%. Las formulaciones elaboradas con carragenina κ -I en mezcla con CMC y goma guar, así como el producto de referencia flan base, no presentaron diferencias significativas en sus valores de pendiente por lo que oponen la misma resistencia a la penetración; mientras que con el uso del almidón la variación del tipo de carragenina es indistinto (Cuadro 3.4).

En el área que muestra el trabajo requerido para penetrar las muestras hasta la distancia fijada, el valor más alto se obtuvo con carragenina κ -I y el más bajo con carragenina κ -II en mezcla con CMC debido a su baja distancia de fractura, por lo que representan el mayor y menor trabajo respectivamente requerido para penetrar la muestra, con una disminución del 87 %, sin mostrar diferencias significativas entre los otros valores de área.

Cuadro 3.4 Parámetros texturales obtenidos en la prueba de fuerza de gel de las formulaciones elaboradas con leche fluida (arriba), fórmula láctea en polvo (abajo).

		Pendiente (N/s)	F máx. (N)	Distancia (mm)	Área (mm ²)
FLAN BASE	Media	0.13 ^B	0.48 ^C	3.61 ^B	0.58 ^B
	D. E.	0.01	0.02	0.15	0.04
CARRAGENINA κ-II 0.25%	Media	0.17 ^A	0.57 ^B	3.31 ^{BC}	0.60 ^B
	D. E.	0.02	0.06	0.33	0.10
CARRAGENINA κ-I 0.25%	Media	0.19 ^A	0.71 ^A	4.10 ^A	0.92 ^A
	D. E.	0.01	0.04	0.28	0.12
CARRAGENINA κ-II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.06 ^E	0.12 ^F	2.13 ^D	0.12 ^F
	D. E.	0.01	0.01	0.14	0.01
CARRAGENINA κ-I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.15 ^B	0.35 ^D	2.91 ^{BC}	0.38 ^{CDE}
	D. E.	0.01	0.05	0.40	0.08
CARRAGENINA κ-II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.07 ^{DE}	0.23 ^E	2.82 ^C	0.24 ^{DF}
	D. E.	0.01	0.02	0.24	0.03
CARRAGENINA κ-I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.14 ^B	0.45 ^C	3.49 ^{ABC}	0.55 ^{BC}
	D. E.	0.01	0.04	0.19	0.06
CARRAGENINA κ-II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.09 ^{CD}	0.27 ^{DE}	3.52 ^{AB}	0.37 ^{DE}
	D. E.	0.01	0.02	0.18	0.04
CARRAGENINA κ-I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.10 ^C	0.33 ^D	4.15 ^A	0.52 ^{BCD}
	D. E.	0.02	0.07	0.62	0.14

		Pendiente (N/s)	F máx. (N)	Distancia (mm)	Área (N/s)
FLAN BASE	Media	0.13 ^{BC}	0.48 ^B	3.61 ^C	0.58 ^B
	D. E.	0.01	0.02	0.15	0.04
CARRAGENINA κ-II 0.25%	Media	0.15 ^{BC}	0.51 ^B	3.20 ^{CD}	0.52 ^B
	D. E.	0	0.03	0.18	0.06
CARRAGENINA κ-I 0.25%	Media	0.19 ^B	0.85 ^A	4.43 ^A	1.11 ^A
	D. E.	0.01	0.04	0.11	0.07
CARRAGENINA κ-II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.16 ^{BC}	0.09 ^F	2.64 ^{DE}	0.13 ^C
	D. E.	0.09	0	0.59	0.03
CARRAGENINA κ-I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.14 ^{BC}	0.32 ^D	2.28 ^E	0.26 ^C
	D. E.	0.02	0.01	0.07	0.01
CARRAGENINA κ-II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.37 ^A	0.19 ^E	2.54 ^E	0.19 ^C
	D. E.	0.07	0.01	0.10	0.01
CARRAGENINA κ-I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.12 ^{BC}	0.37 ^C	3.31 ^C	0.46 ^B
	D. E.	0.01	0.01	0.05	0.02
CARRAGENINA κ-II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.09 ^C	0.30 ^D	4.15 ^{AB}	0.48 ^B
	D. E.	0.01	0.04	0.38	0.10
CARRAGENINA κ-I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.13 ^{BC}	0.37 ^C	3.74 ^{BC}	0.53 ^B
	D. E.	0.01	0.03	0.43	0.11

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

Los valores de la distancia recorrida muestran que todos los geles presentaron la fuerza máxima antes de la primera ruptura entre 2.13 y 4.43 mm y el área varió desde 1.11 N/s correspondiente a la carragenina κ -I sola con fórmula láctea que fue el valor mayor, hasta 0.12 N/s de carragenina κ -II y CMC con leche que fue el valor más bajo de fuerza máxima (Cuadro 3.4).

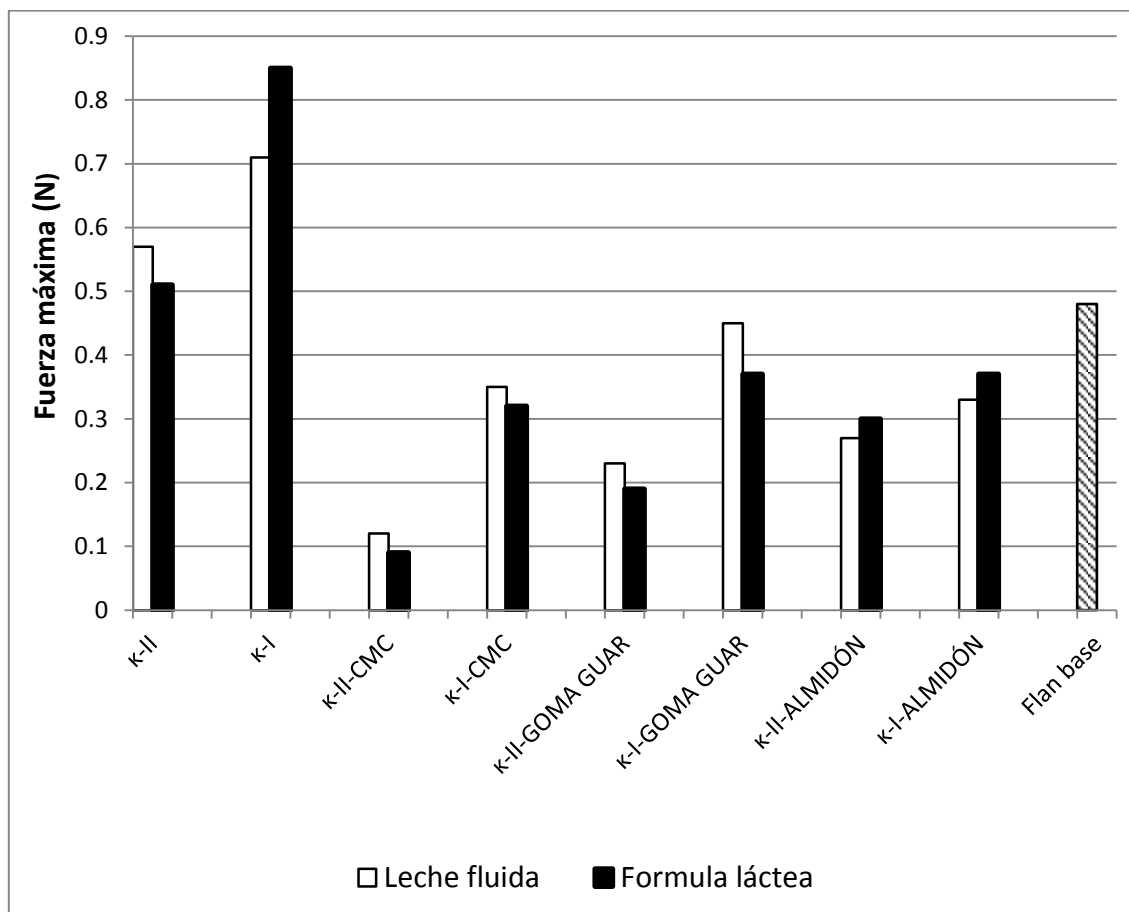


Figura 3.7 Fuerza máxima (N) obtenida en la prueba de fuerza de gel.

Se puede observar que los valores más grandes de cada uno de los parámetros se obtienen principalmente con las formulaciones de carragenina sola. Con la adición de los hidrocoloides espesantes, CMC, goma guar o almidón modificado, se obtienen valores de fuerza de gel que son estadísticamente diferentes con carragenina κ -II, y sin diferencias estadísticas con las formulaciones en mezcla

con goma guar o almidón en las formulaciones con carragenina κ -I, este comportamiento se puede apreciar tanto en la leche fluida como en la fórmula láctea en polvo, por lo que se puede decir que la variación del tipo de leche tuvo poca influencia en los valores texturales.

En la gráfica de la Figura 3.7 se observa con mayor claridad que en el caso del parámetro de fuerza máxima, el uso de dos tipos de leche tuvo poca influencia, y que fue la adición de hidrocoloides espesantes lo que representa el cambio en este aspecto de la textura de las leches gelificadas.

La formulación elaborada con leche fluida, carragenina κ -I y goma guar (Cuadro 3.4), es estadísticamente igual al producto de referencia “flan base” en todos los parámetros texturales calculados con la prueba de fuerza de gel.

3.2.2 Perfil de textura

El perfil de textura se realizó en los geles desmoldados, ubicando el gel de manera que la compresión se diera en un punto céntrico de la placa, ésta prueba se realizó a 10 °C.

En la Figura 3.8 se presenta una figura con las gráficas representativas del perfil de textura obtenido en las muestras. De los parámetros que se obtienen con el perfil de textura, se consideró que los más significativos para las leches gelificadas de este estudio, eran la dureza, cohesividad, elasticidad y gomosidad, los cuales se describen a continuación y se hace una comparación con los resultados obtenidos del producto de referencia flan base.

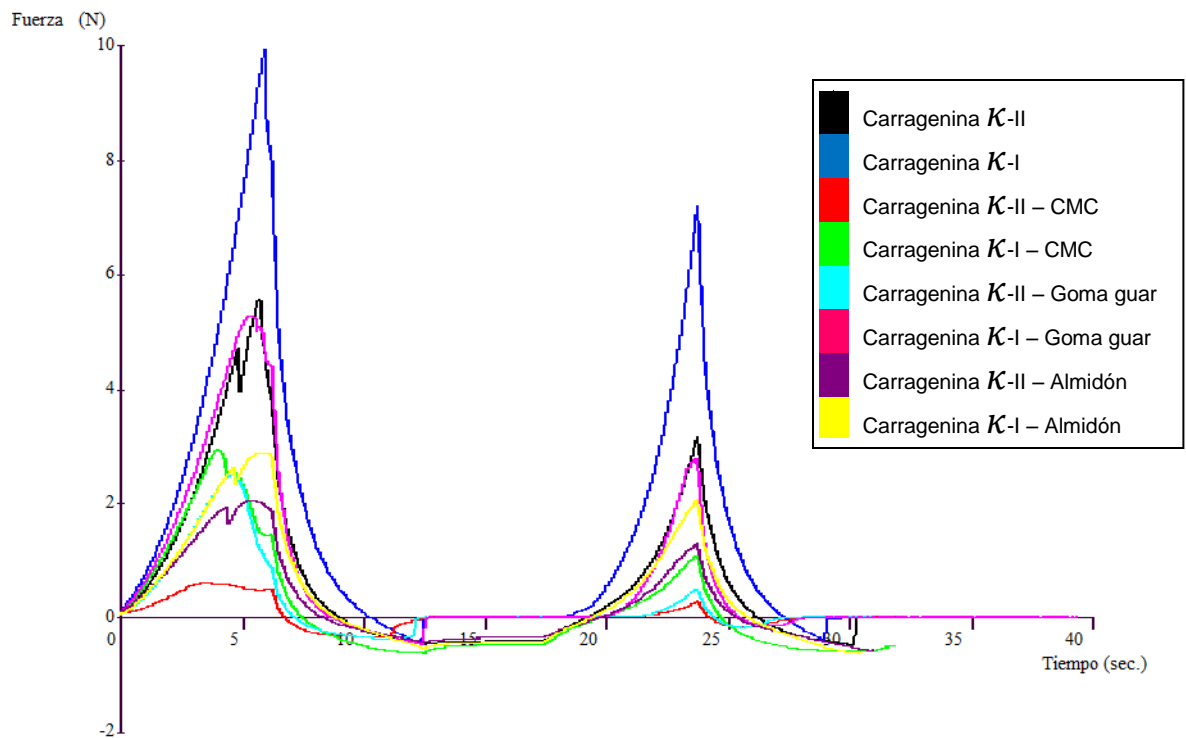
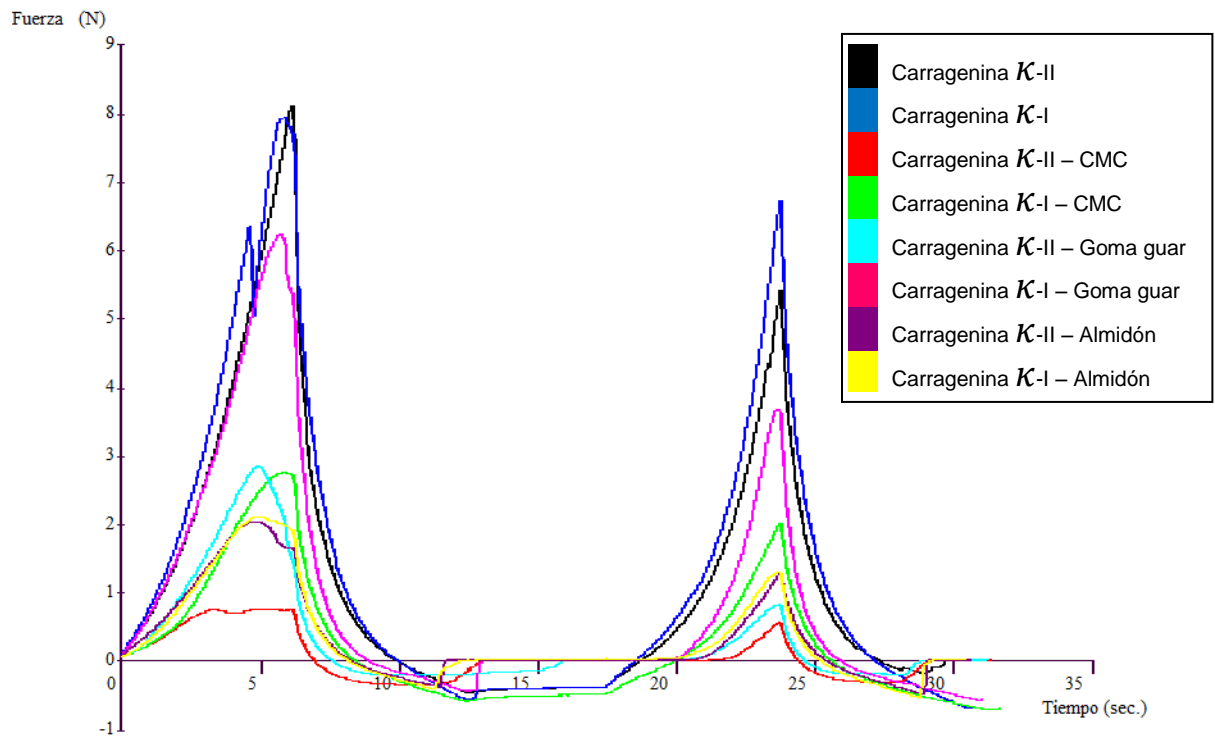


Figura 3.8 Gráficas comparativas de fuerza en función del tiempo de la prueba de análisis de perfil de textura de formulaciones elaboradas con leche fluida (arriba) y con formula láctea en polvo (abajo).

Dureza

En el Cuadro 3.5 se reportan los valores obtenidos de dureza en el análisis de perfil de textura de leche fluida y fórmula láctea en polvo.

Cuadro 3.5 Valores de dureza obtenidos con el análisis de perfil de textura.

FORMULACIÓN		Leche fluida	Fórmula láctea en polvo
		Dureza Fuerza (N)	Dureza Fuerza (N)
FLAN BASE	Media	5.38 ^C	5.38 ^B
	D. E.	0.35	0.35
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media	7.23 ^B	5.17 ^B
	D. E.	0.60	0.39
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media	7.96 ^A	9.04 ^A
	D. E.	0.24	0.71
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.74 ^E	0.61 ^E
	D. E.	0.09	0.07
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media	2.70 ^D	2.77 ^C
	D. E.	0.23	0.29
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	2.52 ^D	2.30 ^{CD}
	D. E.	0.26	0.18
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	5.81 ^C	5.52 ^B
	D. E.	0.61	0.29
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	2.11 ^D	1.88 ^D
	D. E.	0.09	0.09
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	2.25 ^D	2.88 ^C
	D. E.	0.11	0.16

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

El análisis ANOVA ubica a las formulaciones con carragenina sola en grupos independientes con los valores más altos y a las formulaciones elaboradas con carragenina κ -II en mezcla con CMC en el extremo opuesto con los valores de dureza más bajos con una disminución en los valores del 90 al 93%; agrupa a las formulaciones elaboradas con almidón modificado, κ -II con goma guar y a las de κ -I con CMC con valores muy parecidos, por lo que la variación en la adición de estos hidrocoloides es indiferente para los resultados de dureza al igual que el uso de diferente tipo de leche, como se puede observar en la Figura 3.9 donde se

muestra el valor de la dureza con leche fluida y fórmula láctea con los diferentes hidrocoloides.

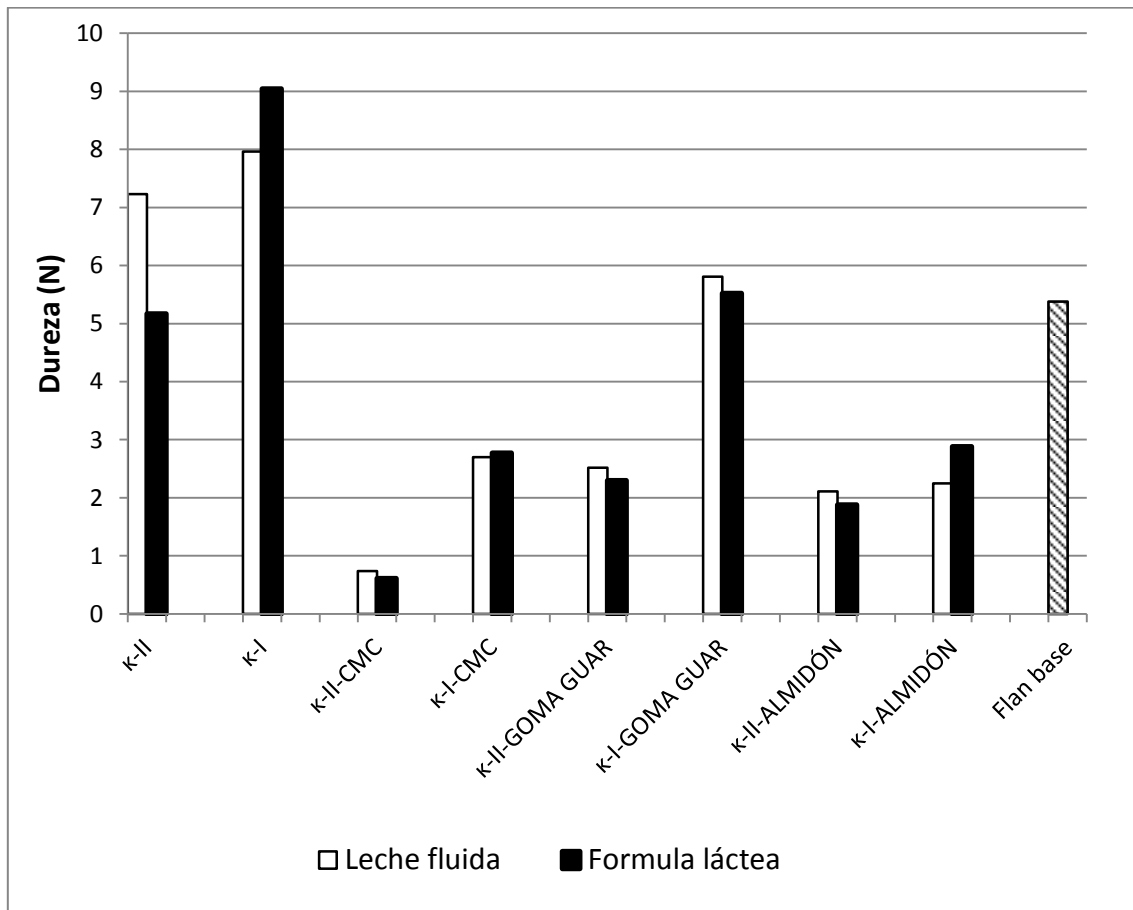


Figura 3.9 Dureza (N) obtenida en la prueba de perfil de textura.

Obsérvese que el valor de dureza más alto se obtiene con la formulación de fórmula láctea y carragenina κ -I al 0.25% con una dureza de 9 N, este tipo de carragenina forma geles más firmes que la κ -II por lo que los valores de dureza de las formulaciones elaboradas con carragenina κ -I fueron mayores siempre en comparación con las formulaciones elaborados con carragenina κ -II, una vez que el porcentaje de carragenina disminuye y se reemplaza con hidrocoloides la dureza de los geles disminuye obteniendo valores de dureza de alrededor de 2 N, a excepción de la formulación carragenina κ -I con goma guar que dio valores de fuerza de 5.81 N y 5.52 N con leche y fórmula láctea, respectivamente y las

elaboradas con carragenina κ -II y CMC, con el que se obtienen los valores más bajos con 0.74 N y 0.61 N con leche y fórmula láctea, respectivamente (Cuadro 3.6), lo que corresponde a una leche gelificada débil tipo natilla (Martínez *et al.*, 2008). La formulación que obtuvo valores más parecidos al producto de referencia flan base fue la elaborada con κ -I con goma guar, con una dureza alrededor de 5 N.

Cohesividad

Los valores de cohesividad más altos se obtuvieron con la carragenina κ -I sola con leche fluida y fórmula láctea en polvo y la κ -II sola con leche fluida (Cuadro 3.6).

Cuadro 3.6 Valores de cohesividad obtenidos con el análisis de perfil de textura.

FORMULACIÓN		Leche fluida	Fórmula láctea en polvo
		Cohesividad	Cohesividad
FLAN BASE	Media	0.28 ^D	0.28 ^{CD}
	D. E.	0.06	0.06
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media	0.53 ^A	0.26 ^{DE}
	D. E.	0.07	0.05
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media	0.57 ^A	0.56 ^A
	D. E.	0.03	0.03
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.24 ^{DE}	0.17 ^{EF}
	D. E.	0.05	0.07
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.41 ^B	0.29 ^{CD}
	D. E.	0.01	0.02
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.17 ^E	0.11 ^F
	D. E.	0.01	0.03
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.32 ^{CD}	0.34 ^{BCD}
	D. E.	0.04	0.04
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.35 ^{BC}	0.36 ^{BC}
	D. E.	0.04	0.03
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.32 ^{CD}	0.38 ^B
	D. E.	0.06	0.03

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

Debido a que la cohesividad se puede definir como la fuerza que mantiene unidos los enlaces internos de las partículas que integran el alimento es posible decir que

los enlaces creados entre la carragenina sola y las proteínas de la leche son más fuertes en comparación con las otras formulaciones, en el otro extremo con enlaces internos débiles están los valores más bajos de cohesividad que se obtuvieron con las formulaciones elaboradas con carragenina κ -II en mezcla con goma guar en ambas leches con una disminución de hasta el 80 % con respecto a los valores más altos obtenidos en la experimentación.

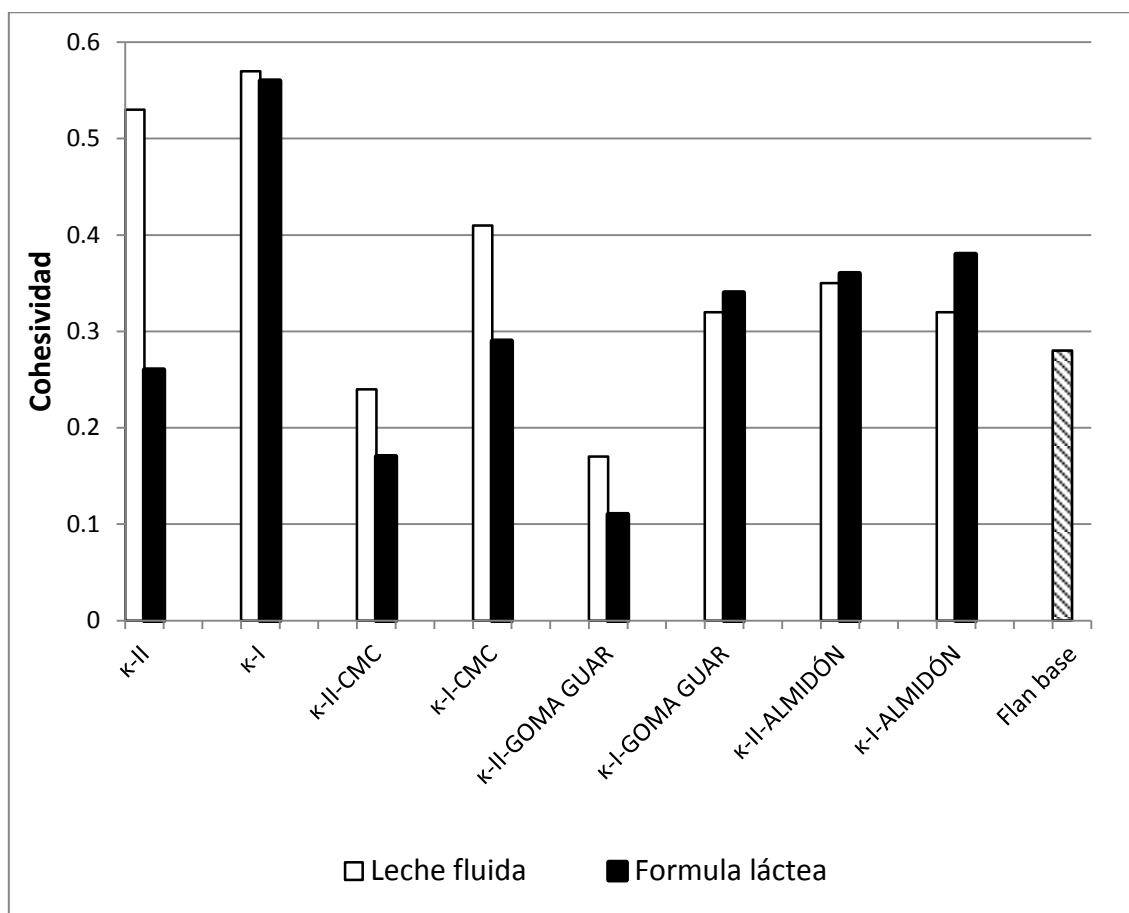


Figura 3.10 Cohesividad obtenida en la prueba de perfil de textura.

Las formulaciones en mezcla con almidón en ambas leches y las elaboradas con carragenina κ -I en mezcla con goma guar no muestran diferencias significativas entre ellas. En los resultados de cohesividad de las formulaciones elaboradas con carragenina κ -II sola, carragenina κ -II en mezcla con goma guar y las elaboradas en mezcla con CMC se puede ver que sí hay diferencia significativa entre el uso

de diferente tipo de leche (leche fluida y fórmula láctea en polvo), mostrando resultados de cohesividad mayores con la leche fluida. La cohesividad del producto de referencia flan base, que se busca igualar es de 0.28, la mayoría de las formulaciones tienen una cohesividad mayor que va desde el 0.3 al 0.5, la formulación de carragenina κ -II con CMC es la más parecida en cohesividad al flan base (Figura 3.10), que a su vez es la formulación, como ya se mencionó antes, con menor dureza, esto se le atribuye a la estructura interna y que los enlaces entre carragenina-CMC son más débiles que entre los otros hidrocoloides utilizados, estos enlaces internos débiles es lo que lleva a una baja dureza y cohesividad.

Elasticidad

Los valores obtenidos de elasticidad se pueden apreciar en el Cuadro 3.7.

Cuadro 3.7 Valores de elasticidad obtenidos con el análisis de perfil de textura.

FORMULACIÓN		Leche fluida	Fórmula láctea en polvo
		Elasticidad	Elasticidad
FLAN BASE	Media	0.81 ^{BC}	0.81 ^B
	D. E.	0.10	0.10
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media	0.99 ^A	0.90 ^{AB}
	D. E.	0.01	0.04
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media	0.97 ^A	0.94 ^A
	D. E.	0.05	0.02
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.71 ^C	0.53 ^D
	D. E.	0.20	0.03
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.96 ^A	0.66 ^C
	D. E.	0.04	0.05
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.77 ^{BC}	0.70 ^C
	D. E.	0.03	0.02
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.92 ^{AB}	0.88 ^{AB}
	D. E.	0.04	0.02
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.86 ^{ABC}	0.84 ^B
	D. E.	0.09	0.06
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.78 ^{BC}	0.93 ^A
	D. E.	0.03	0.05

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

Se puede observar que los valores son muy parecidos entre ellos y no se muestra una disminución significativa con la adición de los hidrocoloides espesantes como se presentan en los parámetros texturales anteriores, esto puede deberse a que la carragenina brinda elasticidad a sistemas de geles lácteos, todas las formulaciones dieron valores de elasticidad por encima de 0.7, con excepción de las formulaciones elaboradas con fórmula láctea y CMC.

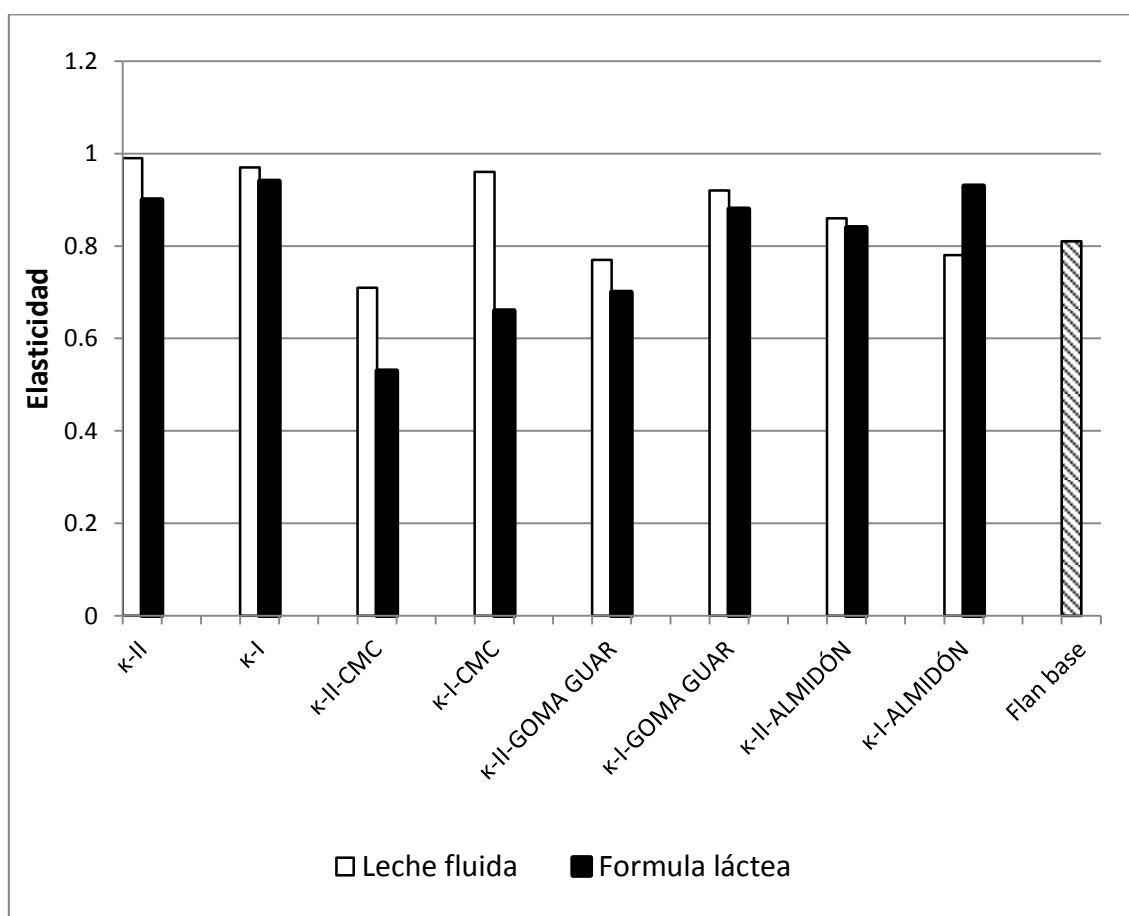


Figura 3.11 Elasticidad obtenida en la prueba de perfil de textura.

Debido a que la elasticidad se calcula con una división entre distancias, mientras más cercanos a 1 sean los valores de elasticidad indica una mayor recuperación de los geles lácteos, en general se obtuvieron valores altos de elasticidad. En la Figura 3.11, se observa que los valores más altos se obtienen en las formulaciones donde se utilizó la carragenina sola y en la mayoría de las

formulaciones preparadas con la leche fluida, en comparación con las formulaciones elaboradas con fórmula láctea. El análisis ANOVA los valores de elasticidad demostraron no tener diferencias significativas con el producto de referencia flan base, son las elaboradas con leche fluida, carragenina κ -II y goma guar, leche fluida carragenina κ -I y almidón, y fórmula láctea, carragenina κ -II y almidón.

Gomosidad

Debido a la relación de gomosidad con la dureza y la cohesividad, los valores de la gomosidad presentan la misma tendencia (Cuadro 3.8) que los de cohesividad.

Cuadro 3.8 Valores de gomosidad obtenidos con el análisis de perfil de textura.

FORMULACIÓN		Leche fluida	Fórmula láctea en polvo
		Gomosidad (N)	Gomosidad (N)
FLAN BASE	Media	1.48 ^C	1.48 ^C
	D. E.	0.37	0.37
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media	3.85 ^B	1.33 ^C
	D. E.	0.45	0.34
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media	4.51 ^A	5.02 ^A
	D. E.	0.31	0.16
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media	0.18 ^F	0.11 ^F
	D. E.	0.04	0.04
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media	1.12 ^D	0.79 ^{DE}
	D. E.	0.12	0.08
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GUAR 0.3%	Media	0.43 ^{EF}	0.24 ^F
	D. E.	0.04	0.07
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GUAR 0.3%	Media	1.84 ^C	1.86 ^B
	D. E.	0.39	0.22
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.73 ^{DE}	0.68 ^E
	D. E.	0.08	0.06
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media	0.72 ^{DE}	1.11 ^{CD}
	D. E.	0.13	0.14

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

Los valores de gomosidad obtenidos con las formulaciones en las que se ocupó carragenina κ -I sola son considerablemente más altos con 4.5 y 5 N y distan

mucho de los valores obtenidos con las formulaciones en las que se ocupó la carragenina κ -II en mezcla con CMC que fueron los valores más bajos con 0.18 y 0.11 N, con una disminución de hasta el 98 %. Los valores de gomosidad más parecidos al producto de referencia flan base fueron los obtenidos con leche, carragenina κ -I y goma guar y la formulación elaborada con fórmula láctea y carragenina κ -II sola. Se puede observar (Figura 3.12) que no hay diferencia significativa entre las demás formulaciones y la variación del tipo de leche.

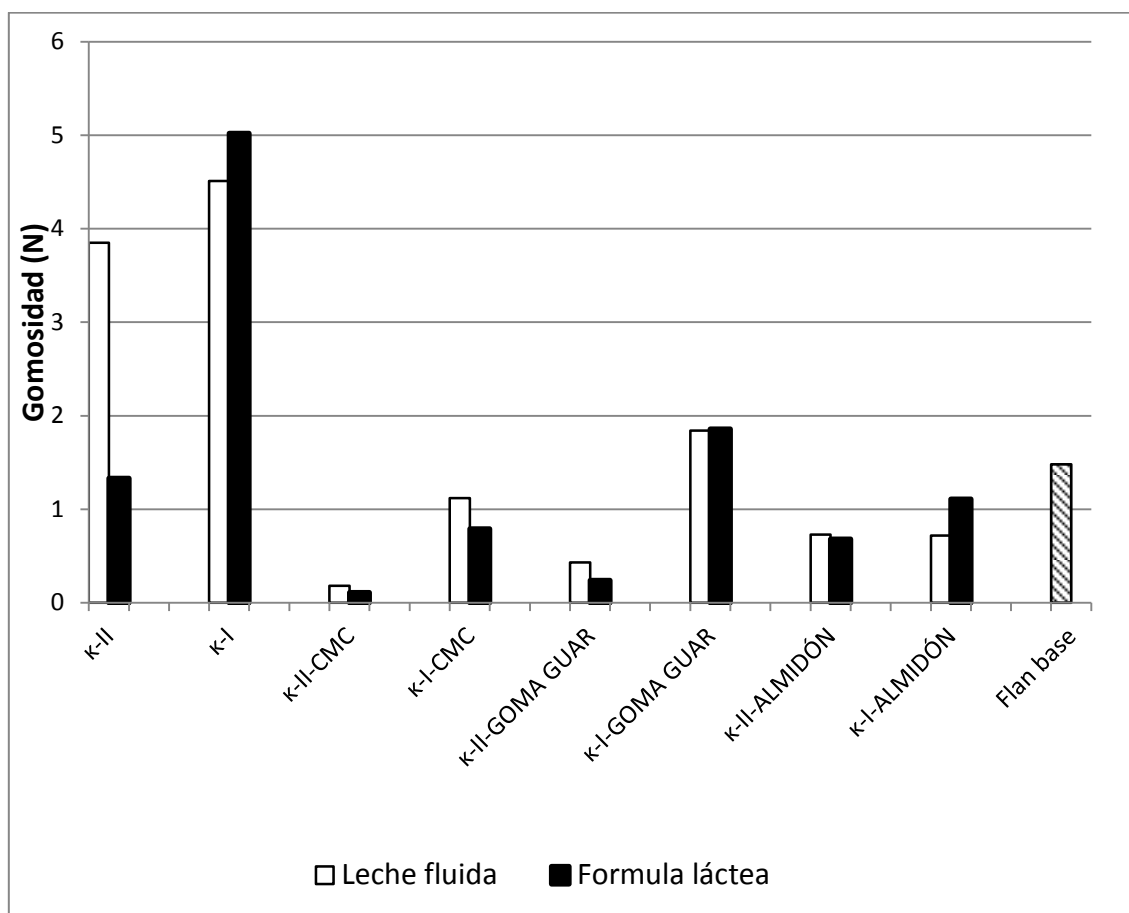


Figura 3.12 Gomosidad (N) obtenida en la prueba de perfil de textura.

3.2.3 Estabilidad

Se determinó la estabilidad de las leches gelificadas calculando el porcentaje de sinéresis durante la refrigeración por 24 horas. Debido a que algunos de los geles

tenían una consistencia más suave, no soportaron el proceso de desmolde, los resultados presentados sólo son de las formulaciones en las que se pudo llevar a cabo la prueba completa, que en este caso fueron las formulaciones realizadas con carragenina sola y en mezcla con goma guar que resultaron ser las más consistentes. En el Cuadro 3.9 se resumen los valores del porcentaje de sinéresis obtenidas en la prueba de estabilidad.

Cuadro 3.9 Sinéresis de las leches gelificadas.

FORMULACIÓN		Leche fluida	Fórmula láctea en polvo
		Sinéresis (%)	Sinéresis (%)
CARRAGENINA κ -II 0.25%	Media D. E.	1.364 ^B 0.236	1.276 ^B 0.077
CARRAGENINA κ -I 0.25%	Media D. E.	2.454 ^A 0.158	2.313 ^A 0.166
CARRAGENINA κ -II 0.125%, CMC 0.3%	Media D. E.		*****
CARRAGENINA κ -I 0.125%, CMC 0.3%	Media D. E.		*****
CARRAGENINA κ -II 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media D. E.	0.208 ^C 0.145	0.219 ^C 0.172
CARRAGENINA κ -I 0.125%, GOMA GUAR 0.3%	Media D. E.	0.404 ^C 0.141	0.231 ^C 0.057
CARRAGENINA κ -II 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media D. E.		*****
CARRAGENINA κ -I 0.125%, ALMIDÓN 2%	Media D. E.		*****

Exponentes diferentes indican diferencia significativa en las medias (Tukey $\alpha=0.05$)

En todas la muestra analizadas, la adición de cualquiera de los hidrocoloides espesantes disminuyó la cantidad de exudado en las leches gelificadas (Figura 3.13), aunque por la naturaleza de la prueba no sea posible mostrar todos los resultados, es importante mencionarlo, la leche gelificada con carragenina sola κ -II presentó un exudado muy notorio y abundante que disminuyó drásticamente en mezcla con los hidrocoloides.

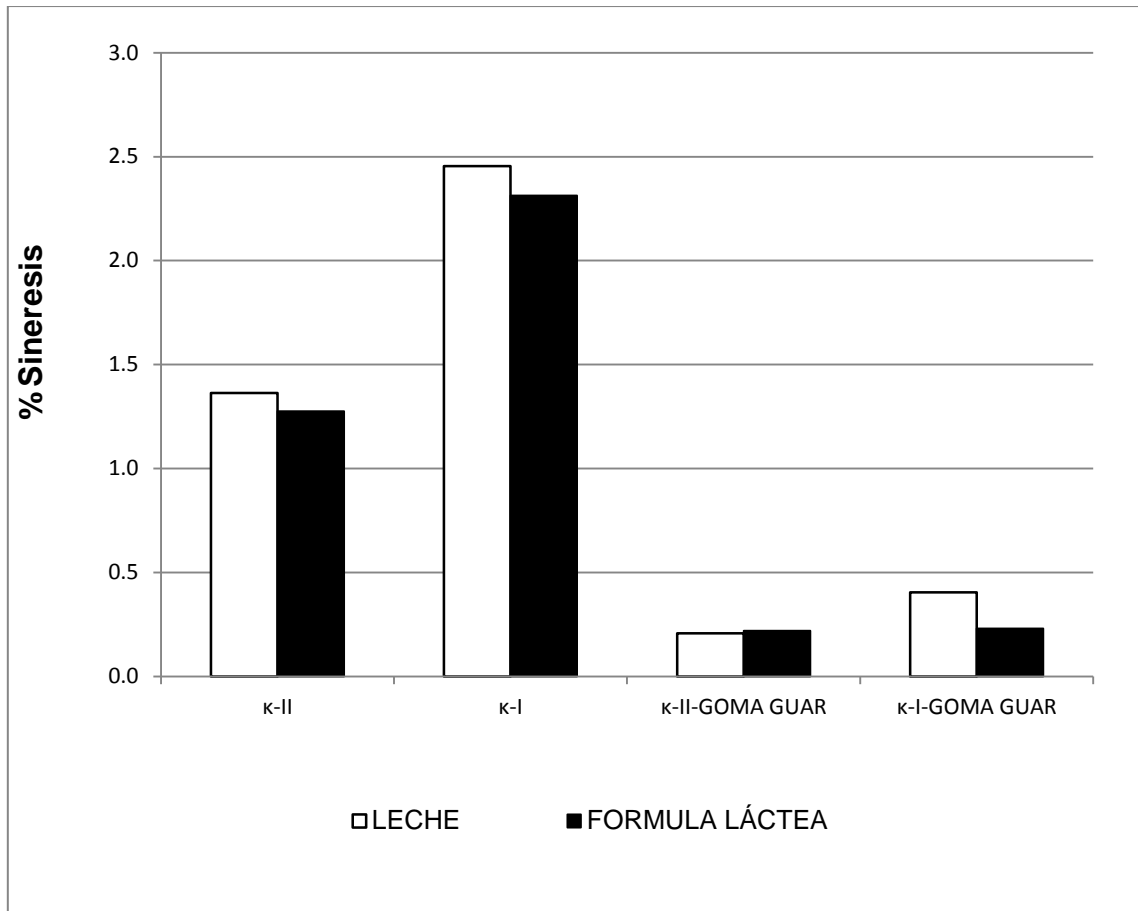


Figura 3.13 Porcentaje del exudado (sinéresis) por las leches gelificadas.

El porcentaje de sinéresis siempre fue mayor en las formulaciones preparadas con carragenina κ -I, aún las que están en mezcla con goma guar.

Esta prueba resume bien los resultados de la experimentación, y aunque no se puede basar todo en la estabilidad, si fue la que proporcionó valores más claros para la selección de una formulación aplicada a una leche gelificada tipo flan.

CONCLUSIONES

La viscosidad de las formulaciones elaboradas con carragenina sola en el seguimiento de viscosidad fue considerablemente más baja que en las mezclas con hidrocoloides durante toda la prueba (sin importar el cambio de temperatura). Los valores de viscosidad aumentaron con la adición de los hidrocoloides espesantes, esto se debe a que los hidrocoloide espesantes utilizados no requieren del incremento de temperatura para hidratarse como es el caso de la carragenina.

Todas las formulaciones presentaron un comportamiento reológico característico de un material fluidificante, a 50 °C las formulaciones en mezcla con almidón requirieron un esfuerzo de cedencia y a 25 °C solo las formulaciones elaboradas con goma guar no necesitaron esfuerzo de cedencia descrito por el modelo Herschel-Bulkley, esto se debe a que las propiedades gelificantes de la carragenina se desarrollan durante el enfriamiento a una temperatura de alrededor de 40 °C, a ésta temperatura es que se forma la red tridimensional que da paso a la gelificación, por lo que se puede decir que a 25 °C la red tridimensional de la carragenina ya estaba formada y requirió de un esfuerzo extra para romperla.

En cuanto a la textura, se obtuvieron valores más altos de dureza y fuerza de gel con las formulaciones elaboradas con las carrageninas solas (κ -I y κ -II), los valores de estos parámetros disminuyeron con la adición de los hidrocoloides espesantes, comportamiento contrario a lo ocurrido con la viscosidad en las pruebas reológicas, el objetivo era igualar las características texturales de un producto de referencia, flan base, elaborado con una carragenina estandarizada para leches gelificadas tipo flan, se obtuvieron mejores resultados con las formulaciones elaboradas con fórmula láctea y carragenina κ -II, y las formulaciones en mezcla con goma guar.

La variación del tipo de leche (leche fluida y fórmula láctea en polvo) tuvo menor influencia que el tipo de hidrocoloide en los resultados, tanto en pruebas reológicas como curvas de flujo y viscosidad, y en pruebas texturales como fuerza de gel y análisis de perfil de textura.

Otro efecto importante fue el aumento de la estabilidad al disminuir el porcentaje de sinéresis con la adición de hidrocoloides, esto se logra debido a que el agua se encuentra ligada con éstos, por lo que se reduce el exudado. Obteniendo los mejores resultados con la adición de goma guar.

Con esto se le atribuyen las mejores características de textura y estabilidad de una leche gelificada tipo flan (comparado con el producto de referencia), a las mezclas elaboradas en combinación con goma guar.

REFERENCIAS

- Abdelrahim K., Awuah G., Ramaswamy H. 1991. Rheological properties of carboxy methyl cellulose as influenced by concentration and temperature. *Canadian Institute of Food Science and Technology Journal*, 24, 194.
- Anton-Paar. Especificaciones del reómetro rotacional para control de calidad. Consultado 2 octubre 2015 disponible en: <http://www.anton-paar.com/?elID=documentsDownload&document=53547&L=6>
- Aristizábal J., Sánchez T. 2007. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. Boletín de servicios agrícolas de la FAO. Roma (en línea) Consultado 17 octubre 2015, disponible en: <ftp://193.43.36.93/docrep/fao/010/a1028s/a1028s.pdf>
- Avanza M. V., Puppo M. C., Añon M. C. 2004. Propiedades reológicas de geles de proteínas de amaranto. *Universidad Nacional del Norte*, 57, 1-4.
- Badui S. 2006. *Química de los alimentos* 4° ed. México: Pearson Addison Wesley. 716 pp.
- Bello J. 2000. *Ciencia bromatológica: Principios generales de los alimentos*. España: Díaz de Santos. 596 pp.
- Benavides P. 2011. Técnico en producción de lácteos, Módulo 2. Centro de servicios para la Capacitación Laboral y Desarrollo. Perú (en línea) Consultado 17 septiembre 2015, disponible en: [https://www.scribd.com/doc/67323151/11/ POSTRES-LACTEOS](https://www.scribd.com/doc/67323151/11/POSTRES-LACTEOS)
- Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N., 1960. *Transport Phenomena*. USA: John Wiley and Sons, Inc. 780 pp.
- Boatella R. J., Codony S. R., López A. P. 2004. *Química y bioquímica de los alimentos II*. España: Edicions de la Universitat de Barcelona. 158 pp.
- Cando M. P. 2010. El empleo de CMC y carragenina en leche saborizada de cocoa. Tesis de Ingeniería en alimentos. Universidad Técnica de Ambato. Ecuador
- Caro C. D. A. 2001. Efecto de la adición de transglutaminasa y carragenina en geles lácteo inducidos por renina. Tesis para obtener el grado de maestría en tecnología avanzada. Instituto Politécnico Nacional. México

- Caro-Calderón D. A., Pedroza R., Aguilar-Méndez M. A. 2011. Estudio de la concentración de calcio y la presencia de hidrocoloides, en la micro estructura y propiedades de textura en geles de proteínas lácteas a base de renina. *Revista Academia Mexicana de Investigación y Docencia en Ingeniería Química*. 2975-2981
- Casas-Alencáster N. B., Pardo-García D. G. 2005. Análisis de perfil de textura y propiedades de relajación de geles de mezclas almidón de maíz ceroso entrecruzado-gelana. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 1, 107-121.
- Fennema O. R. 1993. *Química de los alimentos 2ªed.* USA: Acribia. 1280 pp.
- Fernández R. C. 2013. Elaboración de leche de consumo y productos lácteos: Postres lácteos. España: IC Editorial. 190 pp.
- Gelymar. 2004. Flan base, Métodos de aplicación Gel-AA-004. Santiago, Chile: Gelymar.
- Gelymar. 2005. Sinéresis en agua al 1.5 %, Métodos de análisis Gel-AR-013. V1. Santiago, Chile: Gelymar.
- Gelymar sitio oficial (en línea). Consultado 5 de noviembre de 2015. Disponible en <http://www.gelymar.com/es/carrageninas/>.
- Gładkowska-Balewicz I., Norton I. T., Hamilton I. E. 2014. Effect of process conditions, and component concentrations on the viscosity of κ -carrageenan and pregelatinized cross-linked waxy maize starch mixed fluid gels. *Food Hydrocolloids*, 42, 355-361.
- Gliksman M. 1969. *Gum technology in the food industry*. USA: Academic Press, Inc. 590 pp.
- Heinze T., Pfeiffer K. 1999. Studies on the synthesis and characterization of carboxymethylcellulose. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*. 266, 37-45.
- Hemar Y., Hall C. E., Munro P. A., Singh H. 2002. Small and large deformation rheology and microstructure of κ -carrageenan gels containing commercial milk protein products. *International Dairy Journal*, 12, 371-381.

- Hleap J. I., Velasco V. A. 2010. Analysis of properties of the texture during the storage of sausage made from red tilapia. *Biotecnología en el sector Agropecuario y Agroindustrial*, 8, 1-11.
- Huc D., Matignon A., Barey P., Desprairies M., Mauduit S., Sieffermann J. M., Michon C. 2014. Interactions between modified starch and carrageenan during pasting. *Food Hydrocolloids*, 36, 355-361.
- Juan-Mei L., Shao-Ping N. 2016. The functional and nutritional aspects of hydrocolloids in foods. *Food hydrocolloids*, 53 46-61.
- Kawamura Y. 2008. Guar gum: Chemical and technical assessment (en línea) Consultado 17 octubre 2015, disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/agns/pdf/jecfa/cta/69/Guar_gum.pdf
- Langendorff V., Cuvelier G., Launay B., Parker A. 1997. Gelation and flocculation of casein micelle/carrageenan mixtures. *Food Hydrocolloids*, 11, 35-40.
- Martínez B. F., El-Dash A. A. 1993. Elaboration of instant corn flour by hydrothermal process. *Archivos latinoamericanos de Nutrición*. 43, 310-315.
- Martínez O. L., Roman M. O., Gutierrez E. L., Medina G. B., Cadavic M., Flores O. A. 2008. Desarrollo y evaluación de un postre lácteo con fibra de naranja. *Vitae*, 15, 219-225.
- Matignon A., Michan C., Reichl P., Barey P., Mauduit S., Sieffermann J. M. 2016. Texture design based on chemical-physics knowledge of dairy neutral desserts: Instrumental and sensory characterizations. *Food Hydrocolloids*, 52, 289-300.
- Mleko S., Li-Chan E. C., Pikus S. 1997. Interaction of k-carrageenan with whey proteins in gels formed at different pH. *Food Research International*, 30, 427-433.
- Mora F., Barraza G., Obregon J. 2013. Sinéresis, características reológicas y consistencia sensorial de salsa de alcachofa. *Scientia Agropecuaria*, 4, 163-172.
- Olsen R. L. 1989. Effects of polysaccharides on rennet coagulation of skim milk proteins. *Journal Dairy Science*, 72, 1695-1700.

- Ortega A. 2012. Desarrollo de un método analítico para la cuantificación de la dureza de gel en postres. Tesis de Licenciatura en Química, España. Facultad Experimental de Ciencias y Tecnología.
- Ospina M., Sepulveda J., Restrepo D., Cabrera K., Suarez H. 2011. Influencia de goma xantán y goma guar sobre las propiedades reológicas de leche saborizada con cocoa. *Bioteología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 10, 51-59.
- Prajapati V. D., Maheriya P. M., Jani G. K., Solanki H. K. 2014. Carrageenan: A natural seaweed polysaccharide and its applications. *Carbohydrate Polymers*, 105, 97-112.
- Puvanenthiran A., Goddard S. J., McKinnon I. R., Augustin M. A. 2003. Milk-based gels made with κ -carrageenan. *Journal of Food Science*, 68, 137-141.
- Ramírez N. J. S. 2006. Introducción a la reología de los alimentos. *ReCiTeIA*, 6, 1-46.
- Rodríguez M. 2013. *Envasado y acondicionamiento de productos lácteos*. España: IC Editorial. 272 pp.
- Ruiz A. V. 2007. Aplicación de hidrocoloides en queso procesado untado. Tesis de Licenciatura en Ciencias de los alimentos. Universidad Austral de Chile
- Sancho J., Bota E., De Castro J. J. 1999. *Introducción al análisis sensorial de los alimentos*. España: Edicions Universitat de Barcelona. 336 pp.
- Saldaña E., Behrens J. H., Serrano J. S., Ribeiro F., Almeida M. A., Contreras C. J. 2015. Microstructure, texture profile and descriptive analysis of texture for traditional and light mortadella. *Food Structure*, 6, 13-20.
- Snoeren T. H. M., Payens T. A. J. 1976. On the sol-gel transition in solutions of kappa-carrageenan. *Biochimica et Biophysica Acta*. 437, 264-272.
- Spagnuolo, P. A. Dalgleisha, D. G. Goffa, H. D. Morrisb, E. R. 2005 Kappa-carrageenan interactions in systems containing casein micelles and polysaccharide stabilizers. *Food Hydrocolloids*, 19, 371-377.
- Spreer, E. 1991. *Lactología industrial*. España: Acribia. 634 pp.
- Stainsby G. 1980. Proteinaceous gelling systems and their complex whit polysaccharids. *Food Chemistry*, 6, 3-14.

- Steffe J. F. 1992. *Rheological methods on food process engineering*. USA: Freeman Press. 418 pp.
- Trckova J., Stetina J., Kasnky J. 2004. Influence of protein concentration on rheological properties of carrageenan gels in milk. *International Dairy Journal*, 14, 337-343.
- Tunick M. H. 2000. Rheology of dairy foods that gel, stretch, and fracture. *Journal Dairy Science*, 83, 1892-1898.
- Varnam, A. H. 1994. *Leche y productos lácteos*. España: Acribia. 488 pp.
- Venugopal V. 2011. *Marine polysaccharides: Food applications*. USA: CRC Press. 396 pp.
- Ziaee, H., Arabloo, M., Ghazanfari, M. H., Rashtchian, D. 2015. Herschel–Bulkley rheological parameters of lightweight colloidal gas aphron (CGA) based fluids. *Chemical Engineering Research and Design*, 93, 21-29.