



Trabajo Final de Grado

Experimental study of the additives influence on the forming process, stability and rheology of the whipped cream.

Estudio experimental de la influencia de aditivos en la formación, estabilidad y reología de la crema de leche batida.

Any J. Chavarrio Colmenares

Enero 2014



Dos campus d'excel·lència internacional



Aquesta obra esta subjecta a la llicència de:
Reconeixement–NoComercial–SenseObraDerivada



<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/>

*Not everything that can be counted counts, and
not everything that counts can be counted.*

Albert Einstein

I sincerely thank every single one of those who have accompanied me on this journey, especially my husband for the unconditional support during the last years. I thank also my advisor Prof. Dr. José M. Gutierrez, for his guidance and great support throughout my graduate studies.

REPORT

CONTENTS

SUMMARY	3
RESUMEN	5
1. INTRODUCTION	7
1.1. Dispersed systems in foods	7
1.2. Foams	9
1.2.1. <i>Foam's life</i>	9
1.2.2. <i>Whipped cream structure</i>	13
2. OBJECTIVES	16
3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	17
3.1. Materiales y equipos	17
3.1.1. <i>Materiales</i>	17
3.1.2. <i>Equipos</i>	18
3.2. Metodología	20
3.2.1. <i>Cremas de leche comerciales</i>	20
3.2.2. <i>Formación</i>	21
3.2.3. <i>Estabilidad</i>	21
3.2.4. <i>Reología</i>	22
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	23
4.1. Cremas de leche comerciales	23
4.2. Formación	25
4.3. Estabilidad	34
4.4. Reología	45
5. CONCLUSIONS	51

6. REFERENCES AND NOTES	53
ANEXOS	57
ANEXO 1: EXPERIMENTOS PRELIMINARES	59
ANEXO 2: GRÁFICAS DE RESULTADOS	61
ANEXO 3: REOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS	73

SUMMARY

This study focuses on the data obtained through experimental study of the formation process, stability and rheological behavior of the foam formed by whipping cream. The goal of this work is to correlate the influence of different variables to the formulation of a whipped cream with low fat content, without modifying the characteristic properties of commercial whipped creams.

A market study was conducted in order to know the whipping cream that can be found in the Barcelona area looking for the different additives used for this type of product and the respective fat contents. Different experiments with commercial whipped cream were performed to find the influence the temperature, beater speed, beating time and the fat concentration in the formation process. It was found that each one of these variables has an effect on the amount of air trapped in the foam or overrun and the time taken for the foam to achieve the stiffness, opacity and texture characteristic of the whipped cream. Temperature is the variable that has the greatest influence on the foam formation with high overrun at low temperatures condition.

Once production variables were studied, formulation of cream with low fat content with additives which permit the stabilization of its foam was studied. The compounds selected to improve stability were proteins such as hydrolyzed milk protein and ovalbumin. These ones helped the whipping process because of its sparkling character, and also did not have influence on the stability. Addition of a thickener, xanthan gum, to have a synergistic effect with protein, was studied. The two combinations, xanthan gum-ovalbumin and xanthan gum-hydrolyzed milk protein showed great improvements in stability. The storage temperature is decisive for the stability due to drainage.

The rheological behavior of the formulated whipped cream follows the same trends as commercial whipped creams ones. Due to the variations of viscoelastic properties, a consumer study should be carried out for the adoption as product.

RESUMEN

En el presente trabajo se analizaron datos obtenidos a través del estudio experimental de la formación, estabilidad y comportamiento reológico de la espuma formada por la crema de leche batida. La meta de este trabajo es correlacionar la influencia de diferentes variables para la formulación de una crema de leche batida con bajo contenido de grasa, sin modificar las propiedades características que tienen las cremas existentes en el mercado.

Se realizó un estudio de mercado con el fin de conocer los diferentes aditivos que se utilizan y los contenidos de grasa, de las cremas de leche para batir que se pueden encontrar en el área de Barcelona. Se realizaron diferentes experimentos con cremas comercializadas para encontrar la influencia de la temperatura, la velocidad de agitación, el tiempo de batido y la concentración de grasa en el proceso de formación. Cada una de estas variables tiene efecto sobre la cantidad de aire retenido en la espuma u overrun y en el tiempo que tarda la espuma en conseguir la rigidez, opacidad y textura característica de la crema batida. La temperatura es la variable que tiene mayor influencia en la formación, se pueden formar espumas con alto overrun a bajas temperaturas.

Una vez estudiadas las variables de formación, se realizó la formulación de la crema de bajo contenido en grasa con aditivos que permitan la estabilización de su espuma. Los compuestos seleccionados para la mejora de la estabilidad fueron proteínas, específicamente hidrolizado de proteína de leche y proteína de huevo, que ayudaron al proceso de formación debido a su carácter espumante, pero no tuvieron gran influencia en la estabilidad. Se agregó un espesante, goma xantana, para obtener un efecto sinérgico con la proteína. Las dos combinaciones proteína de huevo-goma xantana e hidrolizado de proteína de leche-goma xantana mostraron grandes mejoras en cuanto a la estabilidad. La temperatura de almacenamiento es determinante para la estabilidad debida al drenaje.

El comportamiento reológico de la crema formulada sigue la misma tendencia que el de las cremas comercializadas. Debido a las variaciones de las propiedades viscoelásticas se debe hacer un estudio para la aprobación del consumidor como producto.

1. INTRODUCTION

Given the subject of this work, whipped creams, in this introduction, main features of dispersed systems are commented, foams and their stability are analyzed in more detail, and finally the specific system whipped cream is described.

1.1. DISPERSED SYSTEMS IN FOODS

A great part of human food products are dispersed systems. A dispersed system contains two or more immiscible substances, simples or compounds, in which one or some of them behave as dispersed phase, and the others as a continuous phase. The dispersed systems are physically heterogeneous and their properties are not completely determined by its chemical composition. These systems lack the thermodynamic equilibrium and their structures and properties depend on the manufacture process and storage conditions.

Dispersed systems are classified in eight types depending on the nature of the dispersed phase (see table 1), and also the nature of the continuous phase. All these systems exist in nature, but only some of them are important in the food industry: the Sols, foams, gels and emulsions are the most common. And within these emulsion (liquid-liquid system) and foams (liquid-gas systems) are the most used.

Dispersed food systems can be formed through different methods: mechanical, chemical and enzymatic. Many products, obtain their characteristic properties due to the method of manufacture and the materials used.

Continuous phase	Dispersed phase	Type	Examples
Liquid	Solid	Liquid sol or suspension	Paints, toothpaste, Jelly
	Liquid	Liquid Emulsion (emulsion)	Mayonnaise, Milk, Asphalt

	Gas	Liquid emulsion (espuma)	Whipped cream, Beer foam
Solid	Solid	Solid sol (solid suspension)	Black diamond, pigmented plastic
	Liquid	Solid emulsion	Cheese, Buttermilk
	Gas	Solid foam	Styrofoam, Polyurethane foam
Gas	Solid	Solid aerosol	Smoke, Dust
	Liquid	Liquid aerosol	Fog, Aerosol

Table 1. Types of dispersed systems with examples.

The most important characteristic of dispersed systems is their large specific surface area. This has an impact on their physical and chemical properties; these are very different from those of the rest of systems that are found in food. These conditions mean there is a large area of contact between the dispersed and continuous phases with particles adsorbed dispersants in this area. That generates a high interfacial energy on the surface that separates them. The stability of dispersed systems depends directly on the formation and the nature of the interactions that occur on this surface.

These complex dispersions are usually unstable (if a system is physically heterogeneous it can also be physically unstable), and its stability depends on the presence of compounds such as proteins or surfactants that can accumulate in the interface stabilizing it. These compounds have an amphiphilic character (a term describing a chemical compound possessing hydrophilic and hydrophobic properties), and this behavior through an excess of these molecules is generated in the interface. In particular, in the case of emulsions, these amphiphilic molecules are located at the interface of drops of oil in water or drops of water in oil, on the other hand in foams are concentrated at the interface of liquid with gas bubbles. In this way creates a molecular barrier, which is intended to stabilize and promote the formation of these dispersed systems. Therefore appears the need to study the effect of the addition of surfactants in these characteristics of dispersed systems.

1.2. FOAMS

Foam is defined as a dispersion of gas in a liquid or a solid (in this work the continuous phase is a liquid). The gas phase or bubbles are separated by liquid films. The stability of these films determines the overall stability of the foam. As the amount of gas increases more ordered and more stable structure is established. In these systems, usually most of the gas fraction is equal or higher than the liquid. Normally, the morphology of the bubble is determined by the fraction of gas, the bubbles exhibit a spherical shape when the gas fraction is relatively low, on the contrary if it is high, cells are created polyhedral see Figure 1.

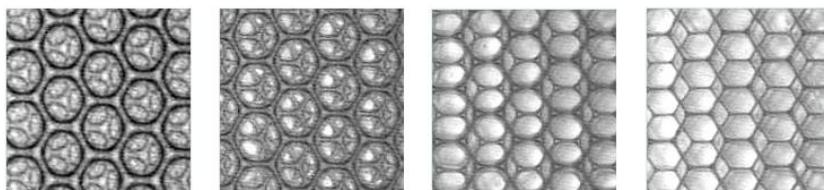


Figure 1. Form of foam. Left to right, variability of air concentration increases. (taken from <http://www2.univ-mlv.fr/lpmdi/RHE/research.html> 27/09/2013)

Due to the large amounts of free surfaces having foams, the energy surface of the system is very high and thus is thermodynamically unstable. The presence of a surfactant in the aqueous solution, promotes the formation of a layer of amphiphilic molecules adsorbed on surfaces of the bubbles so that the energy surface of the system decreases.

1.2.1. Foam's life

The foams have three different life stages, in each of which different physical and chemical phenomena that occur named below:

- i) **Formation:** There are three feasible methods to form foams (Walastra, 2003):
 - **Supersaturation:** A gas can be dissolved in a liquid under pressure, and then the pressure is released, so gas bubbles that are formed. The gas should be well soluble in water to Obtain a substantial businesses volume of bubbles.
 - **Injection:** Gas is injected through small openings, for instance in a porous sheet, into the continuous phase.

- **Agitation:** the mechanical energy is transferred from the two phases to the interfacial region; this movement leads to formation of large bubbles, which are then beaten to split into smaller bubbles. This is the most common method for manufacturing food foams.

The phenomena involved in the formation of foam are named:

- The adsorption of surfactant and / or protein in the gas-liquid surface: Dynamic adsorption of molecules has an important role in foaming capacity. When a surface, the speed with which the molecules are placed in this shielding is created is a determining factor in the foam formation. So surfactants, which spread rapidly to the surface, have a high foaming capacity. To create a surface for the formation of foam, in a sufficiently concentrated solution of surfactant, the molecules migrate to grab the new surface of the micelle mainly come¹. Therefore, the amount of formed foam is directly correlated with the half life of the micelles (Oh & Shah, 1991). On the other place, small, flexible and disordered proteins have greater foamability than large globular proteins due to its rapid diffusion to the surface (Martin et al., 2002).
- Gas by gravity separation and accumulation of bubbles: When bubbles are formed, due to their density difference with the continuous phase, tends to rise and collect in the top of the system. The liquid films between the bubbles are subjected to shear and elongation is necessary not to break, because the foam is formed by the accumulation of these.
- Gibbs-Marangoni effect: when approaching two bubbles tend to deform and increase the gas-liquid, thus surface area which surrounds the film is subjected to a stretching effort frequently. The surfactant concentration decreases in the region where the film is thinner, and accordingly increases the surface tension in this area. The concentration gradient created, produces a force in the area where there is an excess of surfactant, which again moves the bubbles and the surfactant molecules trying to reach the surface of the bubbles (see the figure 2 shows the effect Marangoni Gibbs).

¹ Aggregates of surfactant molecules, formed in solutions with an excess of these molecules, their morphology depends on the environment where they are.

This mechanism gives certain elasticity to the stretched film between two bubbles, and support to the existence of the foam.

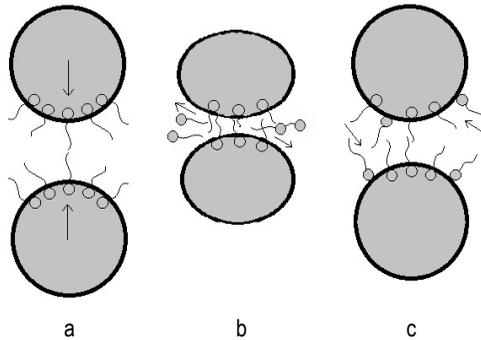


Figure 2. The effect Marangoni Gibbs a) Two droplets approach stabilized with the surfactant molecules, b) draining fluid and reducing the concentration in the film, c) flows in the region devoid of surfactant and droplet separation

ii) **Maturation:** once the foam already formed, undergoes degradation or rupture, which involves three mechanisms (Salager et al., 1999):

- Segregation of bubbles and gravity drainage of liquid: in foaming gravity segregation of the bubbles takes place, following the thrust of Archimedes which establishes a relevant force on the large bubbles which in effect and leads to small bubbles to rise to the surface of the system. The gravity drainage is present throughout the life of the foam, the mechanism by which the continuous phase tends to fall by the interface (see Figure 3).

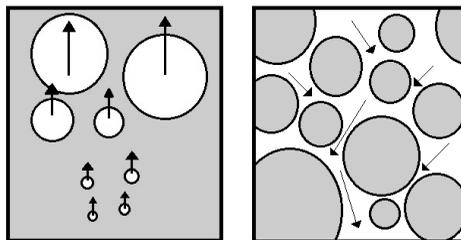


Figure 3. Left to right: segregation of bubbles and gravity drainage of liquid (image reproduced of Salager J.L.; Andérez J.M.; Forgiarini A., L'actualite chimique. 1999, 10-21)

- **Capillary suction:** The capillary suction is another phenomenon by which the liquid is displaced from the interfaces formed. Over time, the bubbles begin to deform, producing a pressure gradient at the edges of Plateau and the flat part of the interface, the pressure gradient remains the law of Laplace. This pressure gradient displaces the liquid film center toward the edges of Plateau (see Figure 4), and then is drained by gravity towards the bottom of the foam (Salager et al., 1999). Thus the foam starts to degrade, and movies can get to thin to break if the effect is not satisfied Gibb-Marangoni or no stabilization mechanisms in the interface.

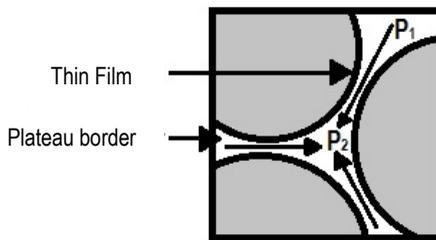


Figure 4. Capillary suction. (image reproduced of Salager J.L.; Andérez J.M.; Forgiarini A., *L'actualite chimique*. 1999, 10-21)

- **Intra-bubble gas diffusion:** When bubbles are polyhedral, the films in the planar interfaces behave as thin films and as a result of the law of Laplace greater pressure is exerted on, in small and large bubbles. Consequently, there is usually a pressure gradient across the liquid film, inducing a gas diffusion therethrough. Small bubbles lose the air slowly, and this is introduced in big bubbles consequently bubbles disappear (this phenomenon is known as Ostwald ripening).
 - Persistence and stability:** Foams are inherently unstable systems. And foam stability generally refers to the ability of the foam to maintain its properties constant over time. The previously mentioned phenomena cause the film thickness of liquid in the interface is thin, and having little thickness slows drained. Consequently, if there is a way that the drain rate is slower the foam persists for the time of use. If the films become very thin, have great influence colloid, such as interactions: attractive Van Der Waals forces, which attract neighboring bubbles and thus favors the effect of

drainage, the repulsive forces (presence of a layer adsorbed surfactant), which are opposed to attraction, again giving way to effect drainage. DLVO theory handling the forces balance effect on colloidal stability, it is applicable to qualitatively between bubbles film (Ivanov & Dimitrov, 1988).

Therefore, the mechanisms that produces instability of the foam are: gas diffusion in the bubble coalescence which is usually slower than diffusion mechanism and occurs even in stabilized systems, and is finally drained hydrodynamic rapid emptying of liquid between the bubbles leading to a rapid collapse (in the absence of any stabilizing mechanisms). The three mechanisms are in operation during any stage of collapse so that the analysis of the stability of the system is no simple task.

The factors controlling the stability of the foam with respect to coalescence are the colloidal forces of surface adsorption of surfactant molecules (faster adsorption formations lead to more stable films), the compressive force pushing the bubbles against each other, the diameter of the film, etc. (Denkov, 2004; Denkov et al., 2006; Exerowa et al., 1998).

1.2.2. Structure of whipped cream.

A disperse system widely used in the food industry is the whipped cream (a product that may be regarded as daily use), this foam brings a big problem of instability shown rapidly with time and temperature. To understand this instability phenomenon, to know about his compositions and physicochemical properties.

These are the different types of milk creams, which are differentiated by the fat on them. These types are: simple cream containing about 18% fat, half-fat cream with 12% fat, a simple sour cream to which bacterial cultures added, whipped cream with about 35% fat, double cream with 48% fat, and finally the lumpy cream having a fat content of 55%.

The approximate composition of the whipping cream is 35% fat, 2% protein, 3.1% carbohydrates, fiber 0.03% and the remainder is called an aqueous phase serum. Globally the cream is an emulsion of fat globules crystallized in an aqueous phase called serum (an O / W), and which is stabilized by whey protein disposed on the surface of the fat globules or fat droplets. When beating this emulsion, air is introduced and it produces the whipped cream, a

foam form, as the emulsion is stabilized by the proteins in serum and at fat globules, which are arranged on the surface of the bubble. The energy supplied to the system through the stirring process, achieves the fat globules are partially melted, and joined forming molecular networks that protect air bubbles, creating a bubble net. The whipped cream begins to have a stiff, dry appearance and takes on a smooth texture. In the air-serum interface are water, lactose and protein, this interface is often unstable primarily by drainage mechanism of the liquid film between the bubbles. Features such as fluid viscosity, geometry of the bubble, the film thickness, influence this mechanism, as shown by theoretical-experimental previous studies (Leser et al., 1999; Aken, 2001; Jakubczyk et al., 2006; Myers, 1999).

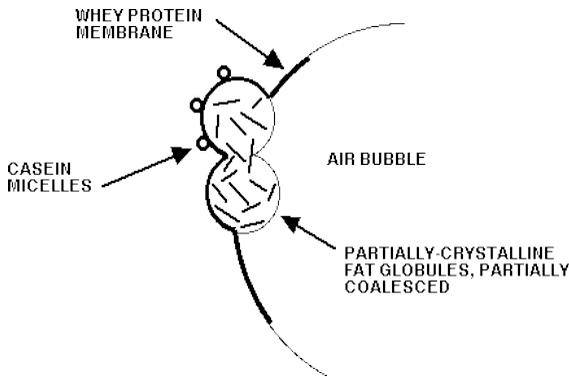


Figure 5. Structure of whipped cream (taken from <https://www.uoguelph.ca/foodscience/dairy-science-and-technology/dairy-products/whipped-cream-structure> 6/10/2013).

Different studies on the stability improvement of whipped cream, show that the addition of a single surfactant such as gums or proteins, fails to meet the expectations of a stable foam. The solution to this problem may be to find the synergy of several surfactants, as has been achieved in the stabilization of other foods such as ice cream. However, these studies have been able to differentiate the thermal process in which milk is subjected prior to marketing, pasteurization, have great importance in the amount of foam that can be achieved, the ultra-pasteurized milk (UHT), has a lower yield compared to the overrun (amount of air into the foam), the flash pasteurized, since in the first treatment and the proteins were heated to high temperatures when it was processed, and this causes a decrease in their ability to form elastic networks around these bubbles. But in the current market, this procedure is most commonly used pasteurization

UHT, so the study focuses on cream with this heat treatment (Chang et al., 2002; Green et al., 2013).

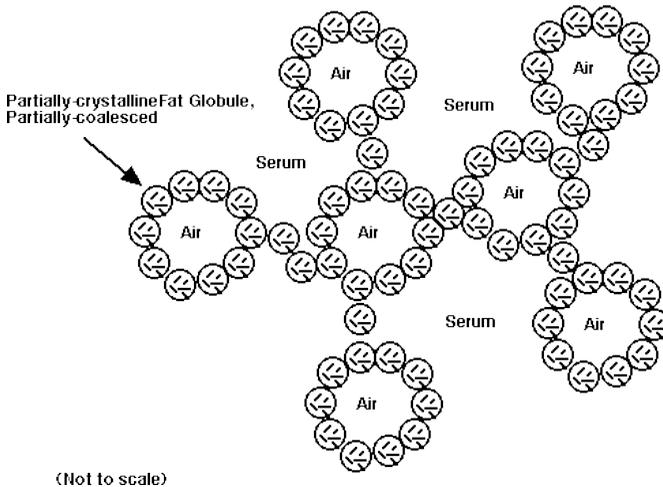


Figure 6. Structure of whipped cream (taken from <https://www.uoguelph.ca/foodscience/dairy-science-and-technology/dairy-products/whipped-cream-structure> 6/10/2013).

The overrun is an important feature of the foam and depends on the effectiveness of the introduction of gas during the first stage of beating. A whipped cream must have an overrun of about 50-60% (Graf & Muller, 1965). The overrun can be determined after a fixed period of time or until the cream is whipped to maximum overrun. Maximum overrun corresponds to maximum stability and rigidity of the foam, and all air bubbles in this point are encapsulated for a fat coalesced droplets adsorbed on the air- whey interface (Jakubczyc & Niranjan, 2006). The overrun of each sample can be calculated with the following equation:

$$O = \frac{\rho_{liquid}}{\rho_{foam}} - 1$$

Equation 1. Overrun

Where: ρ_{liquid} = Unwhipped cream; ρ_{foam} = Whipped cream.

As conclusion of this introduction, it can be admitted that whipped creams are good products for consumers, used by a long time, but present a series of problems, stability, healthy factors, acceptance, etc. which make interesting to study possible ways of solution, which will be the subject of this final degree work.

2. OBJECTIVES

The whipped cream is an important and interesting product in the food industry and gastronomy, and as can be seen in the introduction of this thesis exist many problems to be solved in order to improve their composition, structure and stability. Usually, food manufactures add food additives to facilitating the preparation and stability of commercial whipped creams.

The ultimate goal of this work is to study the preparation and stability of whipped creams in order to improve themselves by diminishing the fat content and assuring their formation and enough stability.

In order to achieve this goal, there are specific objectives to be accomplished:

- Selection of creams through a study of the composition of commercial creams that can be found in the Barcelona area.
- Experimental determination of temperature and agitation influence on formation of whipped creams.
- Experimental determination of minimum fat content to produce whipped cream without additives.
- Identification of the main mechanisms of destabilization for whipped cream.
- Selection of types of additives to improve stability of the whipped cream with a lower fat content.
- Experimental study of preparation of whipped creams with additives and less fat content in order to obtain new formulations.
- Comparison of stability of whipped creams obtained from new formulation with the obtained from several commercial creams.
- Comparison of rheology, as consumer acceptance feature, of different whipped creams obtained.

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1. MATERIALES Y EQUIPOS

3.1.1. Materiales

- Crema de leche:
 - Crema de leche con aditivos: se utilizó la crema de leche ultrapasteurizada central lechera Asturiana. Sus ingredientes son proteínas lácteas, estabilizante (E-407²), tiene un contenido de grasa del 35.1%.
 - Crema de leche sin aditivos: se utilizó la crema de leche producida y envasada por la granja Armengol, tiene una concentración de grasa del 37.5%.
- Leche descremada:
 - La leche descremada utilizada para diluir la concentración de la crema de leche sin aditivos, es leche ultrapasteurizada central la lechera Asturiana. Con una concentración de grasa de 0,25%.

Los anfifílicos más utilizados para agregar a las espumas alimentarias son las proteínas. Se utilizan con el fin de de obtener espumas suficientemente estables. Las proteínas tienen la propiedad de adsorberse más rápido en la interface. El sistema posee una energía libre y tensión interfacial alta, por lo cual, la proteína se desnaturaliza, se desenrolla y adopta una posición en el sistema de tal manera que disminuye en gran medida la inestabilidad. Para este trabajo, se utilizaron proteínas de leche y proteína de huevo. Esta última posee en su estructura dos proteínas que brindan propiedades espumantes: ovoalbúmina y ovoglobulina.

Los espesantes son sustancias que aumentan la viscosidad de una solución o de la mezcla líquido/sólido sin modificar sustancialmente sus otras propiedades. Estos son frecuentemente aplicados a alimentos en los que la propiedad de destino es el gusto o la estabilidad. Principalmente son polisacáridos, o proteínas. Para este trabajo, se utilizó la goma Xantana, un polisacárido natural que fue descubierto en la década de 1950 (Margaritis & Zajic, 1978). Este heteropolisacárido se compone de glucosa, manosa y ácido glucurónico, además

² El estabilizante E-407, hace referencia al carragenano.

es aniónico (García et al., 2000). La molécula de goma de xantana en solución acuosa tiene dos conformaciones, hélice y espiral que son totalmente aleatorias, y dependen de la temperatura de la disolución (García & Casas, 1994). La interacción con otros polisacáridos es una propiedad importante de la goma de xantana, la cual conduce a un aumento sinérgico en la viscosidad (Casas & García, 1999). La goma de xantana se utiliza en la industria alimentaria debido a su estabilización para emulsiones y espumas, estabilidad de temperatura, compatibilidad con los ingredientes de los alimentos y las propiedades reológicas pseudoplásticas (Zhao et al., 2009).

- Hidrolizado de la proteína de la leche:
 - El hidrolizado de la proteína que se utilizó es de marca sosa.
- Proteína de huevo en polvo:
 - La proteína de huevo que se utilizó es de marca sosa.
- Goma Xantana (E-415):
 - De marca Albert y Ferran Adrià.

3.1.2. Equipos

- Turbiscan MA 2000 (Meunier, 1994; Meunier & Mengual, 1996).

Permite el análisis de estabilidad de dispersiones concentradas (cinéticas de floculación, coalescencia, sedimentación, flotación, separación de fases, etc.). Se compone de un cabezal que se mueve de arriba abajo, a lo largo de un tubo de cristal con fondo plano. El cabezal se dispone de infrarrojos que van por pulsos (con una longitud de onda de 850nm), y dos detectores síncronos. El detector de transmisión recibe la luz que pasa a través de la muestra (0° desde el haz incidente), mientras que el detector de retrodispersión o backscattering recibe la luz dispersada por la muestra a 135° desde el haz incidente. El cabezal de detección explora toda la longitud de la muestra (aproximadamente 71 mm), la adquisición de la transmisión y los datos de retrodispersión se realiza aproximadamente cada 40 μm .

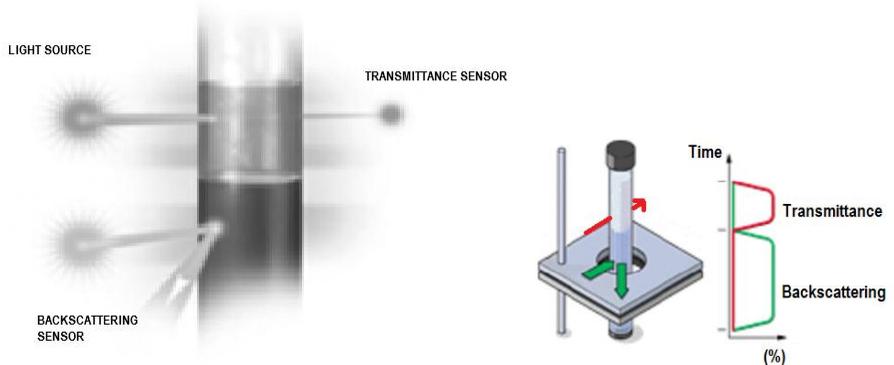


Figura 7. Funcionamiento del turbiscan. (tomado de <http://www.iesmat.com/Productos-FO-EES.htm> 20/11/2013; <http://www.fullbrooksystems.co.uk/Turbiscan/how.html> 20/11/2013)

- Microscopio óptico cámara digital con el software Motic Images Plus 2.0.
- Thermo Scientific, Haake Mars III. Modular Advanced Rheometer System (evaluación de propiedades reológicas de las diferentes muestras).

Se utilizó el software Haake Rheowin 3, dentro de este software existen varios componentes, de los cuales se utilizaron: RheoWin JobManager, con el cual se logra administrar tareas, el control manual del instrumento, las rutinas de medición automatizadas y el informe de impresión o exportación; el segundo componente es RheoWin DataManager realiza la evaluación interactiva de los datos medidos.

El dispositivo de montaje de crema de leche batida se compone de (ver figura 8):

- Agitador EUROSTAR power control-visc IKA- WERKE.
Maneja una velocidad de 50 a 2000 rpm, además de medir el torque.
- Baño termostático HAAKE F6 adaptado a un reactor con camisa de capacidad 100 mL.
- Reactor de 100 mL con camisa



Figura 8. Dispositivo utilizado para el montado de la crema de leche.

El dispositivo con el que se realizaron pruebas de drenaje a temperatura ambiente, está compuesto por un embudo de vidrio, papel filtro, y una probeta de 25 o 10 mL, como se muestra en la figura 9.

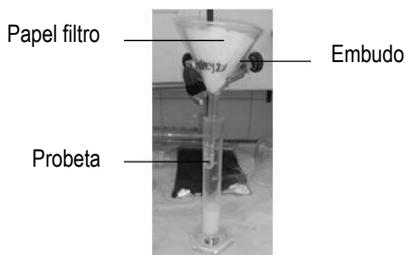


Figura 9. Montaje para la prueba de drenado.

3.2. METODOLOGÍA

3.2.1. Cremas de leche comerciales

Para el estudio de las diferentes cremas de leche que puede encontrar un usuario en el comercio de Barcelona, se visitaron las cadenas más grandes de supermercados de los distritos Sants Montjuic, Les Corts y Poble Nou (Carrefour, Alcampo, Mercadona, Spar, Día, Consum, Corte Inglés, Condis, Caprabo). También se visitaron los mercados de cada distrito,

para obtener información de cremas de leche sin aditivos, ya que dentro de las grandes cadenas no se encuentran este tipo de cremas de leche.

3.2.2. Formación

Se procede a tomar muestras de crema de leche, determinando la densidad de ésta antes de batirla. El agitador se dispone aproximadamente a 3 mm del fondo del reactor, enseguida se vierte la muestra en el reactor. Una vez alcanzada la temperatura de trabajo se procede a encender el agitador, el cual ya debe estar ajustado a la velocidad de trabajo. Al mismo tiempo se pone en marcha el cronómetro y se procede a tomar datos en intervalos de cada 30 segundos.

Se toman muestras de crema de leche sin aditivos de aproximadamente 40 gr, y se montan³ a diferentes velocidades (800, 900, 1000, 1100, 1200), determinando el tiempo y el overrun, para observar la influencia de la velocidad de agitación en el montado. Seguidamente, se determina la velocidad a la cual se realizará todo el trabajo. Con esta velocidad se procede a batir las cremas a diferentes temperaturas (5°C, 10°C, 15°C, 20°C), para comprobar la dependencia de la formación con la temperatura (tiempo y overrun). Ya estudiadas estas influencias, se toma la temperatura y velocidad de agitación que presenten un tiempo de agitado y un overrun adecuados. Estas condiciones se mantendrán durante toda la experimentación. Para la evaluación de las etapas del proceso de montado, se estudia la influencia del tiempo de batido en las condiciones anteriormente halladas.

Finalmente, se evalúa la influencia de la concentración de grasa en el montado. La prueba consiste en montar cremas de diferente concentración de grasa sin aditivos, hasta lograr una concentración tal que no se forme espuma en todo el sistema.

3.2.3. Estabilidad

En este apartado, la primera tarea constituye la elección de aditivos para la estabilización de la crema para la cual su concentración de grasa imposibilita la formación de la espuma. Primero se realiza un estudio de adición de proteínas (0.5-2% p/p). Posteriormente se lleva a cabo el estudio de la sinergia de las proteínas añadidas y el espesante (0.05-0.2% p/p).

³ El término montado se refiere a la formación de una espuma rígida con todo el volumen de crema de leche agregada.

Una vez batidas las muestras se procede a la evaluación de la estabilidad de las muestras con el equipo turbiscan MA 2000. Los tubos con fondo plano están provistos de una goma que se puede extraer. Para no modificar el sistema se extrae la goma, y se incorpora la muestra desde la parte inferior del tubo. Se tomaron datos correspondientes a la crema sin aditivos, la crema comercializada en las grandes cadenas y de la crema a la cual se le formularon aditivos. La estabilidad se examina a diferentes baños de temperatura (10°C, en algunos casos a 15°C, 25°C), durante 24 horas. En este caso, la crema de leche, es una muestra opaca, por lo cual se notaran cambios en el backscattering y no en la transmisión de luz como se muestra en la figura 7.

3.2.4 Reología

Se evalúa la reología de las cremas de leche ya batidas (sin aditivos, con aditivos, estabilizadas con proteínas de leche o proteína de huevo y goma xantana). Se realizan ensayos de esfuerzo umbral, esfuerzo oscilatorio, frecuencia oscilatoria y gradiente. Todas las pruebas se realizan con los métodos ya estipulados en la memoria de trabajo RheoWin JobManager utilizados para pruebas de alimentos.

Para esta evaluación se utiliza el sensor de platos paralelos, llamado Serrated 9500 PP35 (ver figura 10), conformado por dos platos, uno estático en el que se deposita la espuma y uno móvil.

La distancia⁴ entre ambos sensores es de 1mm y las condiciones de cada prueba se indican a continuación:

- Esfuerzo umbral: el rango de esfuerzo es de 0.01 a 1000 Pa.
- Esfuerzo oscilatorio: se fija la frecuencia a 1 Hz y el esfuerzo varío de 0.1 a 20 Pa.
- La prueba de frecuencia oscilatoria: Para esta prueba previamente se realizó la prueba de esfuerzo oscilatorio. De esta se extrajo el esfuerzo tal que el comportamiento del componente elástico (G') y el componente de viscosidad (G'') sea constante. Normalmente se trabajo a un esfuerzo de $\tau = 5$ Pa y la variación de frecuencia fue de 0.01 a 100 Hz.

⁴ Para los ensayos de esfuerzo umbral y frecuencia oscilatoria, esta distancia se fija manejando el cabezal del reómetro, para el resto de pruebas la distancia se toma de manera automática.

- La prueba de gradiente: se trabajó hasta que el gradiente de velocidad fuese 100 1/s.



Figura 10. Sensor Placa-Placa. (tomada de <http://www.iesmat.com/Productos-MI-Viscosímetros-Cono.htm> 27/11/2013)

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN⁵

4.1. CREMAS DE LECHE EXISTENTES EN EL MERCADO

Las cremas de leche que se encuentran normalmente en la población de Barcelona se muestran a continuación:

Marca	Contenido en grasa (v/v%)	Ingredientes
Kaiku	38	Nata, estabilizante carragenano E-407.
President	35.1	Nata, proteína de leche, estabilizante carragenano E-407.
Auchan	35	Nata, estabilizante carragenano E-407.
Asturiana	35.1	Nata, proteína de leche, y estabilizante carragenano E-407.
Anderchser natur	32	Nata biológica sin aditivos.

⁵ De ahora en adelante cuando se nombren porcentajes de grasa, este hará referencia a un porcentaje v/v% y si el porcentaje nombrado es respecto a la proteína de leche, la proteína de huevo y la goma xantana el porcentaje nombrado estará referenciado a p/p%.

Pascual	35.1	Nata, estabilizante carragenano E-407.
Hacendado	35	Nata, carragenano E-407, Esteres lácticos de los mono y diglicéridos de los ácidos grasos E-472b.
Eroski	35	Nata, proteínas de leche y estabilizante carragenano E-407.
ATO	36	Nata, emulgente Esteres lácticos de los mono y diglicéridos de los ácidos grasos E-472b, estabilizante, carragenano E-407.
Corte inglés	33.5	Nata, emulgente Esteres lácticos de los mono y diglicéridos de los ácidos grasos E-472b estabilizante carragenano E-407.
Aliada	35.1	Nata, emulgente Esteres lácticos de los mono y diglicéridos de los ácidos grasos E-472b estabilizante carragenano E-407.
Granja Armengol	37.5	Nata sin aditivos.

Tabla 2. Cremas de leche existentes en el comercio de Barcelona.

Se puede apreciar que en la mayoría de las cremas de leche comercializadas en Barcelona se le añade el aditivo E-407. Este número corresponde a los aditivos clasificados como espesantes y específicamente al Carragenano o Carragenato. El carragenano no solo actúa como espesante además es gelificante, emulsionante y estabilizante. Por esta razón se encuentra en muchos productos alimenticios (lácteos, cárnicos, aves, pescados, pastelería, salsas, bebidas). El carragenano se obtiene a partir de algas rojas (Rhodophyceae), una de sus propiedades más relevantes es su hidrosolubilidad, por esta razón se puede añadir a la crema de leche (emulsión aceite en agua). Es capaz de formar geles con la leche ya que interactúa con las micelas de caseína (Langendorff et al., 2000; Schipunov et al., 2003). También es termorreversible, al mezclarlo en un sistema frío mantiene la forma de la de la suspensión o espuma, evitando que los líquidos sean expulsados de esta.

La principal observación al destapar el brick de la crema de leche que contiene este tipo de aditivo, es la separación de la grasa del suero. Este comportamiento hace que sea necesario montar la totalidad de la crema de leche para asegurar la concentración de grasa que informa

el fabricante. Con concentraciones menores de grasa, la espuma presenta problemas de formación y de estabilidad.

Para una utilización parcial del contenido del brick se hace necesario mezclar el contenido, para lograr una homogeneidad del producto. Posteriormente se almacena nuevamente a bajas temperaturas (en la nevera). Al transcurrir más de 12 horas de almacenamiento, toma una consistencia gelatinosa. Este efecto puede ser debido a la propiedad gelificante que posee el carragenano al estar sometido a temperaturas bajas.

La crema sin aditivos, aunque tiene un rango de fecha de caducidad más corto (cerca de una semana, mientras la de carragenano mas de tres meses), en el tiempo de almacenaje en la nevera no presenta separación de fases, y la textura de la crema en ningún momento se torna gelatinosa.

4.2. FORMACIÓN

Se batieron diferentes muestras de crema de leche (40 gr aproximadamente), hasta que su apariencia fuese opaca, presentaran consistencia de espuma y no fluyera por las paredes del reactor, además de un aumento en el torque que ejercía el agitador (Aken, 2001). Se realizaron tres réplicas de cada experimento, el orden de la experimentación fue aleatorio.

Se realizó la visualización de las diferentes muestras con el microscopio óptico. Los resultados observados no mostraron gran diferencia de morfología, como las fotografías mostradas en la figura 11.

La luz emitida por el microscopio colapsa rápidamente la espuma, debido a que causa un incremento de temperatura. Se añadió a la crema sudan IV, para la visualización de la membrana de los glóbulos de grasa. El sudan IV, es un colorante que sirve para la identificación de lípidos, al añadirlo la muestra se torna ligeramente rosa, pero este cambio no se logro observar en el microscopio.

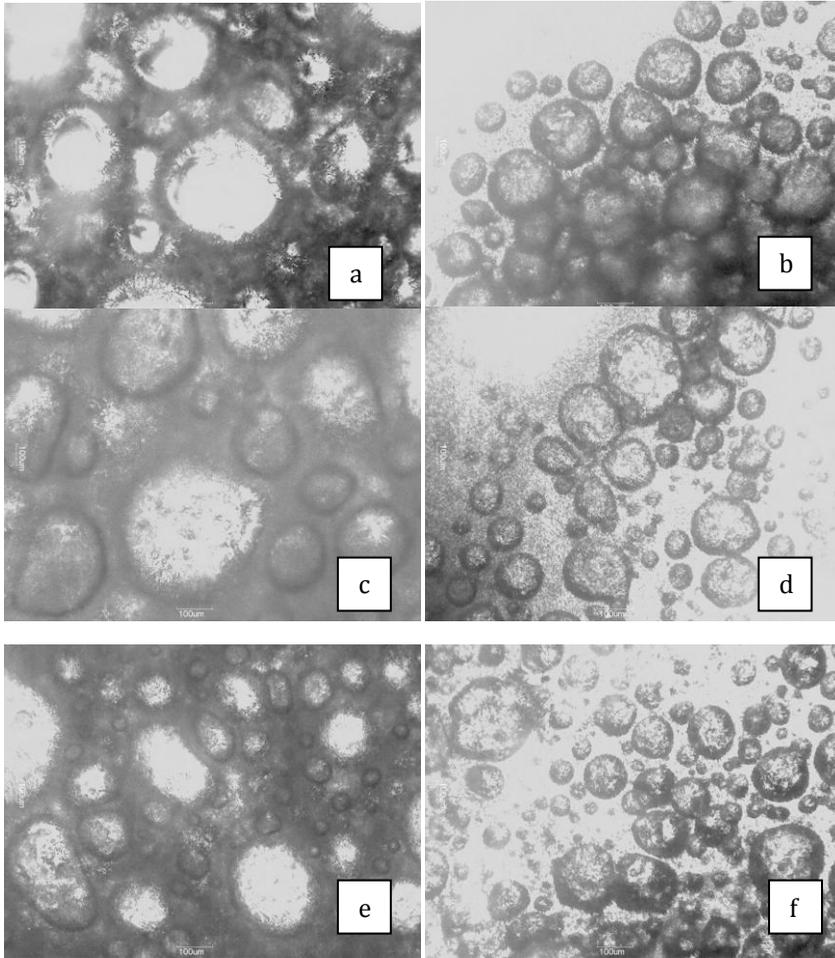


Figura 11. Fotografías tomadas del microscopio óptico a 10x, a y b muestran la crema de leche sin aditivos, c y d muestran la crema con carragenano, e y f muestran la crema con proteína de leche y goma de xantana

Influencia de la velocidad de batido:

Se debe recalcar, que el tiempo de batido en este caso podría considerarse como el tiempo en el cual se llega a la rigidez deseada, basado en la inspección visual, cuando las aspas del agitador dejan un surco con cada movimiento rotatorio, incluyendo un cambio en el color de la crema de leche y una apariencia seca (además del incremento rápido del torque).

En primer lugar se estudió la influencia que tiene la velocidad del batido en el tiempo de montado de una crema de leche sin aditivos con una concentración de grasa de 37.5% (\approx 40 gr), la gráfica 1, muestra dicho efecto. A velocidad baja (800 r.p.m.), se formaron desde el inicio del batido pequeñas burbujas en la superficie del vórtice inducido por el movimiento giratorio de la crema de leche. Las burbujas formadas fueron incorporadas al seno del fluido para lograr así la matriz de la espuma. Una vez se proporciona un aumento de velocidad, se forman burbujas cada vez más grandes, que posteriormente se golpean dividiéndose en burbujas pequeñas, de manera que la velocidad de entrada del aire en el sistema es más alta y por ende el tiempo en el que la emulsión pasó a la estructura de espuma es más corto. El tiempo de batido puede depender de la rapidez con la cual se forma la red de glóbulos de grasa (parcial coalescencia de los cristales de grasa), ya que estos además de dar estabilidad a la burbuja de aire logran la unión de una burbuja con otra. Los tiempos de batido más cortos se consiguieron cuando la crema se bate a una velocidad alta, este fenómeno puede producirse porque la cizalla producida por el agitador a velocidades favorezca la incorporación de aire en forma de burbujas. El agua, las proteínas y la lactosa quedan atrapadas en los espacios entre las superficies de las burbujas. Se cree que las proteínas se ubican donde no hay glóbulos de grasa y sobre ellos, brindando ayuda a la estabilidad, reduciendo la tensión de la interfase entre la grasa, el suero y el aire.

Finalmente, se pudo observar que durante el batido, el vórtice formado por la crema de leche sufría diferentes etapas que se pueden visualizar en la figura 12. Inicialmente la fuerza que proporciona el batidor de cuatro aspas, hace que la emulsión suba por las paredes del reactor en un nivel alto, es decir, la altura que alcanza en la pared es la máxima que tiene el sistema durante toda la experimentación (la fuerza centrípeta experimentada por la crema de leche inicialmente es muy alta, y al ser un líquido sufre un gran empuje). Después de un tiempo (que depende de la velocidad de agitación), el vórtice forma un perfil plano en las paredes del reactor. Al transcurrir el tiempo va cambiando de aspecto mojado y brillante, a seco y mate. Al acercarse a la apariencia final de la crema de leche batida, la muestra es difícil de deformar y el sistema de batido requiere más torque y, por tanto, más potencia para seguir proporcionando la misma velocidad. Visualmente se identifica con una disminución de nivel de contenido en el reactor (a bajas velocidades, existe un fenómeno de succión por parte del batidor, cuando cambia la estructura a espuma rígida).

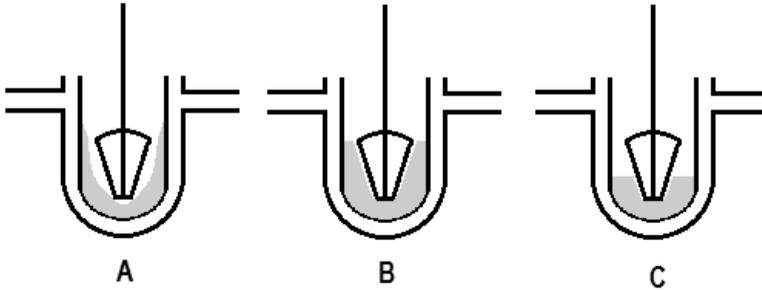
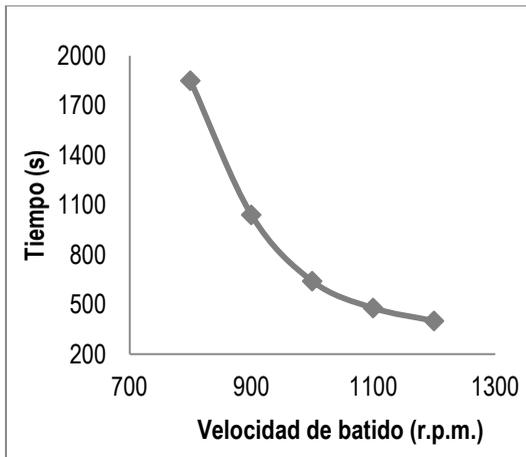


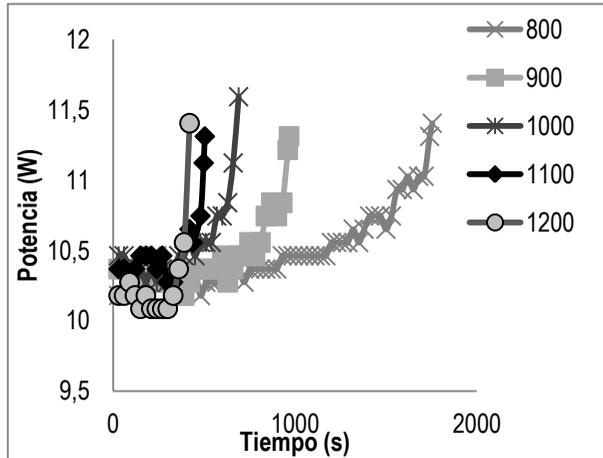
Figura 12. Etapas del batido. A) inicio del batido, la fuerza del agitador crea un vórtice, B) Intermedio del batido formación de un perfil plano, y primeros cambios del sistema, C) Finalización del batido, se muestra una disminución de volumen del sistema.



Gráfica 1. Influencia de la velocidad de batido en el tiempo de montaje.

La gráfica 2, muestra la potencia absorbida por las muestras de crema de leche batidas, durante el batido como función del tiempo de montaje, para varias velocidades de rotación. El incremento de potencia absorbida, a través del tiempo, es debido al incremento de viscosidad al irse transformando la emulsión en espuma (transformación de un líquido a un semisólido, necesita de más potencia para mantener la velocidad, ya que tiene más resistencia a fluir). Las potencias absorbidas al final de cada experimentación, sin importar la velocidad de rotación, aproximadamente tienden al mismo valor, el trayecto hasta llegar a esta tiene ciertas fluctuaciones propias de la heterogeneidad del sistema. A velocidades bajas tarda más en

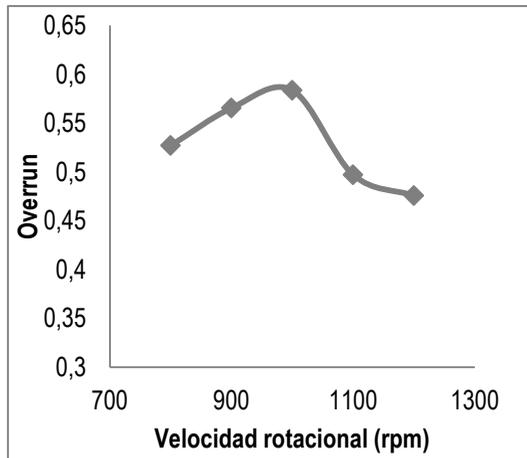
alcanzarse la potencia máxima absorbida (tarda más en formarse la espuma), ya que requiere más tiempo en alcanzar la viscosidad característica de la crema de leche batida.



Gráfica 2. Potencia absorbida en función del tiempo de batido.

El overrun se encuentra dentro de las propiedades más relevantes de la crema de leche. La crema de leche batida está estructurada por partículas de glóbulos de grasa que se adhieren a la interfase aire-suero, y pueden hacer puentes entre las burbujas de aire, formando de este modo la red de burbujas. Estos glóbulos de grasa cubren las burbujas de aire y también hacen una red continua en la fase acuosa, generalmente el valor del overrun es 0,5 (Walastra, 2003). Como resultado de la experimentación se obtiene relación una entre el overrun y las velocidades de rotación del batidor y los resultados se muestran en la gráfica 3, el overrun tiene un máximo a 1000 revoluciones por minuto y un valor aproximado de 0.58. Las otras velocidades estudiadas muestran un overrun dentro lo esperado (cercano al 0.5). El overrun máximo se obtuvo a 1000 rpm, se consiguió en un tiempo de batido considerado como razonable (el tipo del agitador influye en tiempo de montaje, posiblemente por el método de introducción de aire), para el tipo de agitador que se ha utilizado⁶, ésta fue la velocidad escogida para el resto de la experimentación.

⁶ Se determinó que el tipo de agitador utilizado influye en el tiempo de montaje, ya que la forma de las aspas, el número de ellas, el movimiento rotatorio y de traslación de este, son las características que podrían influir en el tiempo de montaje. El agitador utilizado es de cuatro aspas, son planas,



Gráfica 3. Influencia de la velocidad de batido en el overrun.

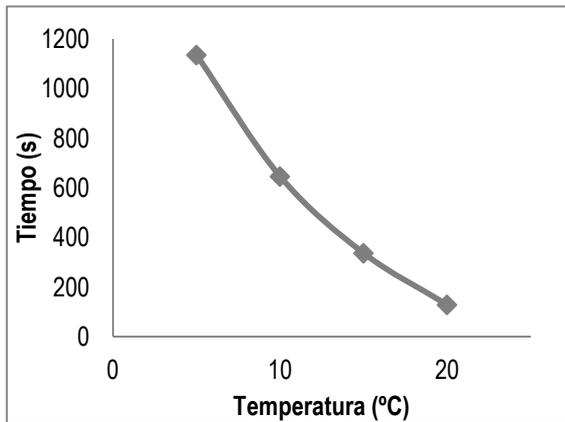
Influencia de la temperatura de montado.

La temperatura es un factor importante dentro del montado de la crema de leche, ya que depende de ésta la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa. A una temperatura más baja de 3°C los cristales de grasa serán sólidos y no permitirán agregarse para dar una cobertura a la burbuja de aire. Aunque el método de montado sea mecánico y gran parte de la energía suministrada se pierda en calor, estas pérdidas no logran fundir parcialmente los glóbulos. Los glóbulos de grasa deben conservar su identidad, para formar redes en tres dimensiones, pero es su fusión parcial la que permite que se unan unos con otros y formen esa red. Que ocurra o no esa fusión parcial durante el proceso de batido depende fundamentalmente de la temperatura.

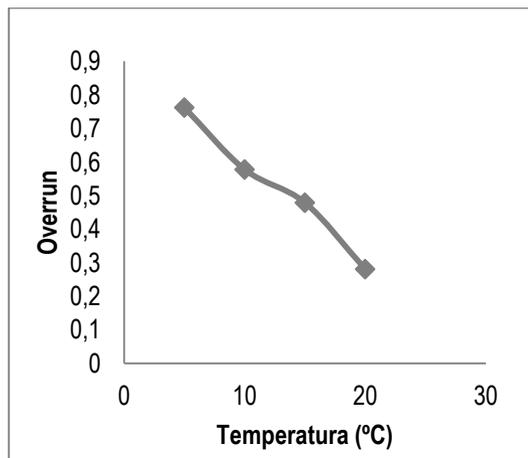
Las temperaturas de ensayo fueron: 5°C, 10°C, 15°C y 20°C. A menores temperaturas se evidenció un tiempo de montado más alto que a altas temperaturas como se muestra en la gráfica 4. Se evidencia que a 5°C, el overrun es aproximadamente 0.76 con un tiempo de montado aproximadamente de 1134 segundos, los dos parámetros van decreciendo hasta llegar a un valor de 0.28 con un tiempo de montado de aproximadamente 128 segundos a 25°C

normalmente este tipo de agitadores está acompañado de otro igual, para ser más efectivo, por esta razón al utilizar solo uno, se determinó como tiempo razonable un tiempo menor o igual a 40 minutos.

(para ver la influencia de la temperatura en el overrun ver gráfica 5). Para escoger la temperatura de trabajo de la experimentación, además del overrun, se tomó en cuenta la temperatura de la nevera donde se guarda la crema de leche líquida, y la temperatura que puede alcanzar mientras se procede a su montado. Se estima que esta temperatura ronda aproximadamente de 8-12°C. Se escogió una temperatura dentro de este intervalo, ya que el sistema no tarda en llegar al equilibrio a dicha temperatura. También influyó en la elección el tiempo de montado, a 5°C el tiempo de montado es muy alto. Por este orden de ideas, la temperatura que se escogió para la experimentación fue 10°C.



Gráfica 4. Influencia de la temperatura en el tiempo de montado.



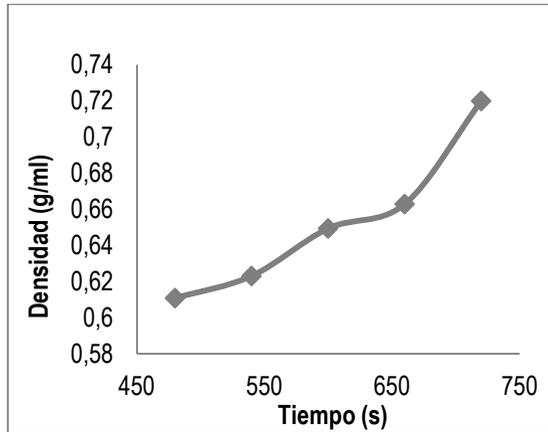
Gráfica 5. Influencia de la temperatura en el overrun 10°C y 1000 r.p.m.

Influencia del tiempo de montado.

Teniendo en cuenta las condiciones de montado, 1000 revoluciones por minuto y 10°C, se evaluaron los cambios que se producen a diferentes tiempos de batido. Durante el batido de la crema de leche, existen varios cambios hasta la formación de la espuma. Se midió la densidad de la totalidad de la muestra a distintos tiempos de batido. Los resultados se pueden ver en la gráfica 6. Cuando se forman las primeras burbujas (generalmente son las más grandes), se evidencia una disminución de densidad, pero la espuma formada hasta este momento es totalmente inestable. Si se frenara la agitación, en las lamelas se experimentaría una velocidad de drenado alta, que causa un rápido colapso de la espuma. A medida que avanza el tiempo, el sistema va adecuándose y transformándose, las burbujas grandes se dividen en otras más pequeñas más estables. La rigidez del sistema va aumentando, la crema va tomando apariencia mate, y la densidad del sistema va aumentando. Una vez logrado el montado, si continúa el batido, los glóbulos de grasa migran de la interfase aire-suero y se aglomerarán, lo que conlleva a la separación del sistema en dos fases, grasa y suero (formación de mantequilla).

El tiempo de montado a las condiciones de la experimentación, es cercano a los 11 minutos (660 segundos), por lo que al batir la crema más de este tiempo es normal que aumente la densidad. Como ya se ha comentado anteriormente, se aglomeran los glóbulos de grasa por acción de la cizalla que produce el batido, se pierde el aire de la red de la espuma y por lo tanto hay un aumento de densidad.

Por el contrario, si se bate menos del tiempo de montado, se tiene una densidad menor en el sistema. Esto es debido al gran tamaño de las burbujas formadas, lo que significa que encapsulan cantidades grandes de aire y hacen que la densidad disminuya. Pero el sistema seguirá siendo líquido, y la espuma formada, por diferencia de densidades subirá hasta la superficie del sistema, y se desestabilizará en un tiempo corto. Si el sistema sigue siendo líquido no tiene ningún sentido hablar de overrun, ya que no se formó ninguna red de burbujas en todo el sistema, y además no se llega a la apariencia de una crema montada.

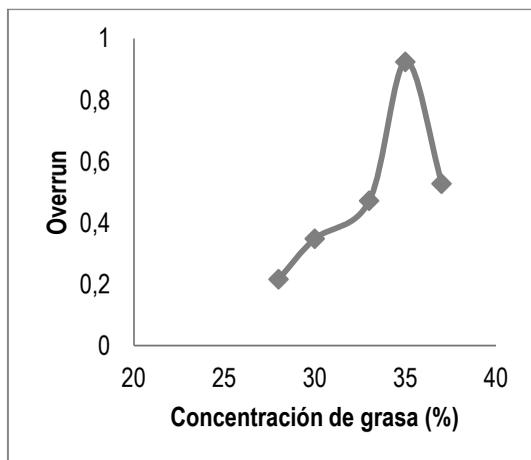


Gráfica 6. Influencia del tiempo de batido en la densidad del sistema 10°C y 1000 r.p.m.

Influencia de la concentración de grasa

Finalmente, para evaluar la influencia de la concentración de grasa en la formación, se diluyó la crema de leche de 37.5%. La dilución se realizó hasta la concentración donde la espuma formada, tuviese una velocidad de drenado tan rápida que causara el colapso de la espuma en menos de un minuto, además de mostrar una espuma fluida, es decir, que no se sostuviera en la espátula. Este fenómeno se evidenció a una concentración de 28%. A una concentración de 25%, pasó más de media hora y no montó. Entonces, la adición de aditivos para lograr una mejora en la formación y estabilidad se realizó con la crema de contenido en grasa de 28%.

Puede ser que un 28% de concentración de grasa, no sea suficiente para lograr la estabilización de la red de burbujas, ya que no posee la cantidad de glóbulos de grasa necesarios para formar la estructura de la espuma. Se evidenció que la espuma formada colapsaba una vez se paraba el proceso de batido. Asimismo, para una concentración de 28% no tiene sentido hablar de overrun, ya que al medir la densidad, se observaba líquido drenado.



Gráfica 7. Influencia de la concentración de grasa en el overrun a 10°C y 1000 r.p.m.

4.3. ESTABILIDAD

El requerimiento de estabilidad en sistemas alimentarios está determinado por el tiempo de utilización que el alimento posea (es una propiedad importante la velocidad con la que ocurren los cambios, para que el producto se mantenga aceptable), en el caso concreto de la crema de leche corresponde a una cuantas horas, por lo tanto, el estudio de estabilidad se realizó hasta 24 horas. Existen dos puntos de vista dentro de la estabilidad: el termodinámico y el cinético (Dickinson & Semenova, 1992).

La estabilidad termodinámica informa sobre si un proceso ocurrirá o no, está relacionada con la variación de energía libre que presenta un sistema disperso antes y después de su formación⁷, y define si es estable o no. Mientras que la estabilidad cinética informará sobre la velocidad a la que se presentarán cambios en la propiedades del sistema, tipos de cambios que ocurren y el mecanismo físico responsable de dichos cambios (Malysa et al., 2008).

⁷ Como la estabilidad termodinámica está influenciada por la variación de energía libre (ΔG), que se expresa de la siguiente manera: $\Delta G = \sigma(\Delta A) - T(\Delta S_{\text{configuracional}})$; donde ΔA es el área interfacial, σ es la tensión superficial, T es la temperatura y $\Delta S_{\text{configuracional}}$ la entropía configuracional. La mayoría de sistemas dispersos tiene una entropía configuracional despreciable, frente a la energía libre interfacial, por lo que solo el primer término de la ecuación tiene importancia y debido a que siempre hay un aumento de área interfacial, lo que conlleva a que la mayoría de sistemas dispersos sean termodinámicamente inestable.

Una crema batida es un producto medianamente estable, ya que hay presencia de partículas de grasa que ejercen una acción estabilizadora, mediante la coalescencia parcial de ellas mismas. Como ya se ha establecido anteriormente, durante el batido, la pared de los glóbulos de grasa se rompe, la cizalla que crea el batido provoca choque entre ellos y da lugar a la fusión parcial de estos. En este proceso se forma una red reticular entre glóbulos de grasa, y burbujas de aire arrastradas por el batido. Las proteínas presentes en el sistema, también juegan un papel importante, desplazándose a las partes de la superficie de las burbujas donde no hay glóbulos, y así lograr la estabilización del sistema. La estabilidad está determinada por la tensión superficial y la viscosidad de la fase continua, las propiedades del líquido de la interfase, la temperatura, las fuerzas a las que se somete y la naturaleza de la fase gaseosa dispersa (la mayoría de estas propiedades dependen de la naturaleza de las moléculas que están presentes en la fase acuosa, como proteínas, los glóbulos de grasa, azúcares, sales, e.t.c.).

De los principales mecanismos de desestabilización, para una espuma creada por crema de leche, el mecanismo de maduración de Ostwald puede ser inhibido por dos causas: a) la presencia de una capa adsorbida insoluble, en este caso, la presencia de proteínas absorbidas en la superficie de las burbujas; b) la presencia de partículas sólidas microscópicas (insolubles en el líquido), en este caso, los glóbulos de grasa y las moléculas de proteína. Consecuentemente, se produce una reducción de tensión suficiente para compensar la diferencia de presión debida a la ley de Laplace (la presión es más grande en una burbuja más pequeña que en una grande, por lo cual se crea un gradiente a ambos extremos de la película de la interfase). Por lo tanto, la inestabilidad de la espuma estudiada no estará determinada por este mecanismo.

De los mecanismos de desestabilización implicados, el que tiene mayor importancia es el drenado, ya que este se desencadena al presentarse cualquier otro mecanismo. Un claro ejemplo de este fenómeno es la coalescencia, en el cual, las burbujas van aumentando de tamaño, y siguen el principio de Arquímedes, las burbujas grandes tienden a ascender a la superficie. La desaparición y movimiento de burbujas en la red, crea grandes distancias entre burbuja y burbuja, y estas distancias facilitan el drenado. En el estudio de la estabilidad, se correlaciona el backscattering, con la inestabilidad creada por el drenado, ya que se observó

una pequeña cantidad de líquido en el fondo de ciertos tubos. Además se realizó la prueba de drenado a temperatura ambiente a algunas de las cremas.

Uno de los objetivos de este trabajo es estabilizar una espuma formada de crema de leche de inferior contenido de grasa. Como se evidenció en el apartado 4.2 *Formación*, el límite de grasa a trabajar fue de 28%, a este porcentaje la espuma colapsaba muy rápido, por lo que se pretende mejorar su estabilidad mediante la utilización de aditivos. Como ya se ha mencionado anteriormente, los sistemas dispersos son inestables termodinámicamente, pero su estabilidad desde el punto de vista cinético se puede modificar. Debido al movimiento browniano y la acción de gravedad, las burbujas se encuentran en constante movimiento y chocan entre sí, provocando constantes cambios a la estructura de la espuma. Para limitar este efecto se debe adicionar un agente anfífilico y/o un agente espumante. En este caso los agentes anfífilicos y/o espumantes que se utilizaron son: las proteínas de huevo, que son obtenidas de la clara de huevo mediante liofilización o secado convencional, dentro de estas proteínas se encuentran la ovoalbúmina y la ovoglobulina, que tienen un alto carácter espumante, además de distribuirse en la superficie de las burbujas creadas proporcionando estabilidad; y el hidrolizado de proteínas de leche, resultado de la rotura enzimática de proteínas grandes en otras más pequeñas, lo cual favorece su adsorción en la interfase. Este fenómeno se evidenció por comparación con los tiempos de montado de la crema de leche con proteína de huevo.

Para frenar el drenado de gravedad, se utilizó como aditivo la goma de xantana, un polisacárido con un peso molecular muy alto. La goma de xantana, logró una disminución de volumen de líquido drenado en las cremas de leche a las que se le adicionaron proteínas. La adición de este aditivo no supuso cambio alguno en el overrun de las muestras.

Dentro del gráfico del backscattering se presentan dos zonas diferenciadas (ver figura 13), una zona en donde se puede estudiar los cambios en el área interfacial (zona plana), y también una zona de cambios en la base del tubo que podría relacionarse con el drenado de la espuma.

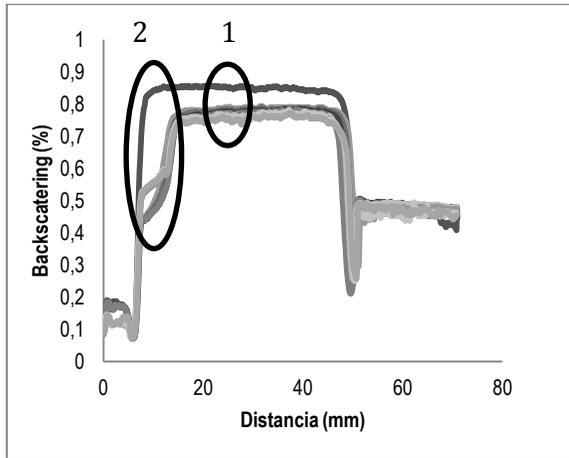


Figura 13. Zonas del Backscattering que se pueden relacionar con la estabilidad de la espuma. La zona uno muestra la estabilidad respectiva a él área interfacial, y la zona 2 muestra la estabilidad relativa al drenado.

Área interfacial.

A continuación se muestran las gráficas relativas a la estabilidad del área interfacial. En las gráficas 8 y 9, se muestran las cremas de leche sin aditivos y con carragenano respectivamente. Se denota la tendencia a la no estabilidad de la espuma formada, con una disminución del porcentaje de la luz retrodispersada con el tiempo, y con la temperatura, siendo más estable a 10°C y menos estable a 25°C. A 10°C la estructura de la espuma no varía demasiado, es decir, esta temperatura sirve para almacenar la crema de leche montada sin que muestre grandes cambios. A 15°C, el sistema presenta una variación alta⁸ de la retrodispersión durante los primeros 60 minutos, luego a través del tiempo se mantiene aparentemente constante. Finalmente, a 25°C se presentan las variaciones más grandes de la estabilidad del sistema. Como ya se había comentado en el apartado de formación la existencia de la espuma formada por crema de leche batida está altamente influenciada por la temperatura, ya que de ésta depende la coalescencia parcial de los glóbulos de grasa, por lo que a una temperatura relativamente alta como lo es 25°C, una parte de los glóbulos de grasa se funden y migran de la superficie de la burbuja haciendo que ésta sea más vulnerable a la desestabilización.

⁸ Con respecto a las variaciones que tiene durante el experimento a 10°C.

Después de 24 horas en todas las temperaturas la superficie de la espuma almacenada en los tubos para el backscattering, se tornaba amarilla, por lo que se puede suponer que los glóbulos de grasa fundidos migran a la superficie de la espuma por capilaridad.

Comparando el backscattering inicial con el final a 10°C, la espuma formada por crema de leche sin aditivos es más estable que la espuma formada por crema de leche sin aditivos. Esta estabilidad podría ser generada gracias a que la crema de leche sin aditivos tiene un mayor contenido de grasa, y como ya se ha nombrado anteriormente la aglomeración de grasa parcialmente fundida da estabilidad a la espuma. En 24 horas de almacenamiento a 15°C y 25°C, las dos cremas no exhiben gran diferencia de estabilidad una de la otra.

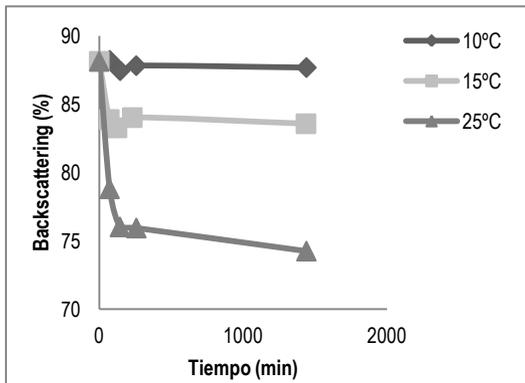


Gráfico 8. Estabilidad de la crema de leche sin aditivos a diferentes temperaturas.

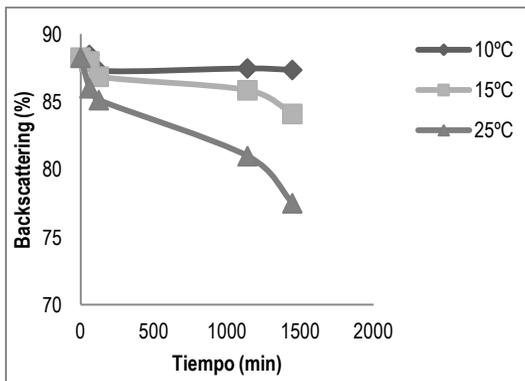
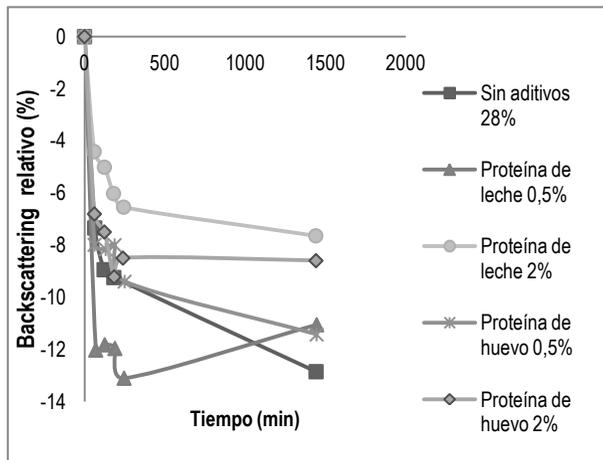


Gráfico 9. Estabilidad de la crema de leche con carragenano a diferentes temperaturas.

En cuanto a las cremas formuladas, esta disminución en la cantidad de luz retrodispersada, se evidencio en todos los experimentos. A una temperatura de 15 °C, los resultados arrojados para la crema de 28% en grasa, no mostraron grandes diferencias, por lo cual las cremas formuladas, solo se almacenaron a 10°C y a 25°C.

En el anexo 2, se pueden encontrar las representaciones gráficas de la estabilidad de las cremas a 10°C. La evaluación de la estabilidad a 25°C presenta los cambios más drásticos, por lo cual en la gráfica 10, se muestra el comportamiento de las cremas antes de adicionar goma de xantana. Evidentemente de estas cremas, la que posee más estabilidad es la crema que contiene 2% de proteína de leche, con una variación de backscattering relativo algo menos del 8%, seguida de la crema que contiene proteína de huevo al 2%. Mientras que las cremas que presentan mayor inestabilidad son la crema de 28% de grasa sin aditivos (variación de casi el 13%), y a las que se le se adiciono solamente 0.5% de cualquiera de las proteínas.

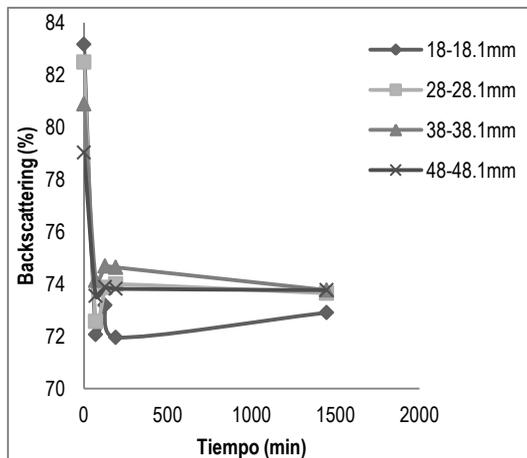


Gráfica 10. Comparativa del backscattering relativo de las cremas de concentración de grasa de 28% a 25°C y estabilizadas con proteínas.

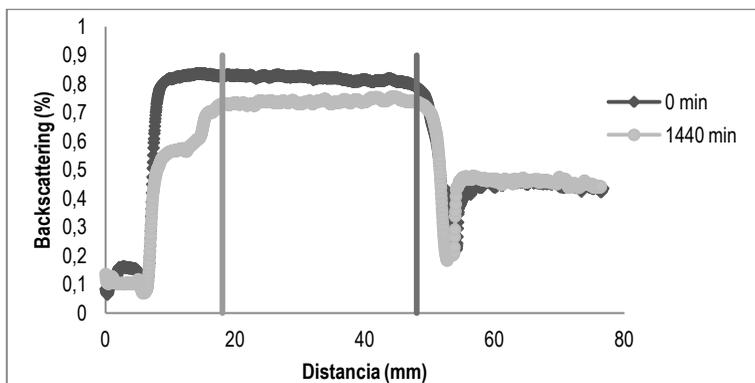
Aunque las proteínas facilitan la formación y brindan una variación menor de backscattering relativa frente a la crema sin aditivos, sigue presentando el problema de drenado, por lo que posteriormente, se les agregó goma de xantana en cantidades de 0.05% a 0.2% p/p, con incrementos de 0.05, para impedir inestabilidad inducida por el drenado. Se realizó una comparativa en la zona del área interfacial y se apreció un comportamiento inesperado, al aumentar el contenido de goma de xantana se evidencia un aumento en la variación de

backscattering en la zona correspondiente al área interfacial, pero a la vez se evidencia que no existen cambios drásticos en el fondo del tubo. Por lo cual, se deduce que la comparación de los cambios de backscattering en la zona del área interfacial no aporta información relevante a la estabilidad en presencia de goma xantana.

Debido a este resultado, se estudió el comportamiento referido al backscattering de una de las cremas en diferentes partes del tubo, a los 20, 28, 38 y 45 milímetros, lo cual se muestra en la gráfica 11a. Se presentan variaciones relativas al backscattering inicial de 10.6% a 5.7%, para 20 y 45 milímetros respectivamente. En la gráfica 11b, se muestra el comportamiento de la crema de 28% en grasa y 2% de proteína de leche, en el momento inicial y durante 24 horas. Se delimitó la zona en donde se observa un comportamiento horizontal, de 18 mm a 48mm, mostrando diferencias más grandes respecto al backscattering inicial, en las zonas más cercanas a la base. Este comportamiento se presenta en todas las muestras y puede indicar que ocurre el fenómeno de segregación y drenado, las burbujas en la parte inferior se mueven por diferencias de presión y de densidad a través del sistema creando más diferencia en la retrodispersión de la luz. Por otra parte en la parte superior las burbujas no pueden desplazarse, solamente experimentan coalescencia y el drenado inicial.



Gráfica 11a. Comparativa del promedio de backscattering, de la crema con 28% de concentración de grasa y 2% de proteína de leche, a 25°C, en diferentes zonas.



Gráfica 11b. Comparativa del backscattering en el momento inicial y a 24 horas, de la crema con 28% de concentración de grasa y 2% de proteína de leche, a 25°C, en todo el tubo.

Ya que se observaron estos cambios, no se hicieron más comparaciones entre el promedio de backscattering en zonas localizadas de diferentes cremas de leche, puesto que no es un método adecuado para comparar la estabilidad entre diferentes sistemas. Se tendrán en cuenta los datos de la misma muestra a diferentes temperaturas y el backscattering cercano a la base del tubo para observar si se evidencia el fenómeno de drenado en la parte baja del tubo. A la concentración de 0.2% en xantana, no se evidenciaron grandes cambios en la forma del backscattering de la base del tubo (mostradas en el anexo 2), por lo cual esta fue la concentración que se le añadió a las cremas que estabilizadas por proteínas.

Drenado:

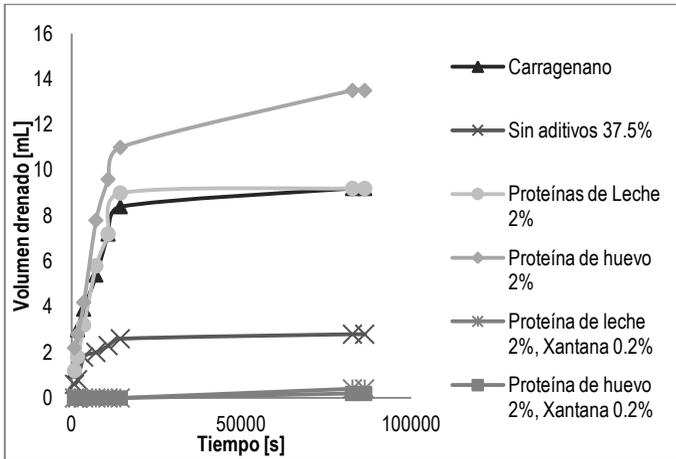
Se realizaron pruebas de drenado para las siguientes cremas: la crema sin aditivos y concentración de 37.5%, la crema que contiene carragenano, las cremas formuladas que presentaron mejor estabilidad al añadirle proteínas y finalmente las cremas formuladas que presentan mejor estabilidad después de la adición de goma de xantana (comportamiento del backscattering en la base del tubo). En la gráfica 12 se puede ver el comportamiento de drenado, se muestra el volumen en mililitros de líquido drenado en función del tiempo.

Durante las cuatro primeras horas, la mayoría de cremas con la excepción de las cremas que contienen xantana, presentan un comportamiento creciente. El drenado puede presentarse por acción de la gravedad de forma directa e indirecta. La forma directa tiene que ver con el efecto de la gravedad sobre las películas no horizontales que estén presentes en el sistema, y la forma indirecta, es por succión y se presenta cuando existen diferencias de presión entre los

bordes de Plateau. El líquido drenado hasta este momento, es aproximadamente la totalidad de líquido que se extrae del sistema. Las interacciones moleculares de la interfase y la viscosidad de la fase continua determinan la velocidad con la cual el líquido se desliza por los diferentes bordes de Plateau y abandona el sistema. Como se puede observar en la gráfica 12, la muestra que presenta un mayor volumen de drenado es la estabilizada por proteína de huevo aproximadamente 14 ml, y las que presentan velocidades de drenado suficientemente bajas son las que contienen xantana alrededor de 0.3 ml. Por lo tanto, la adición de goma xantana disminuye el volumen drenado de las cremas de leche de concentración de 28% en grasa estabilizadas por proteínas.

Por otra parte, la comparación entre la crema de leche sin aditivos y una de las cremas comercializadas, muestra una gran diferencia en el volumen de líquido drenado, mostrando un valor de 2.8 mL para la crema sin aditivos y de 9.2 mL para la crema estabilizada con carragenano.

Se realizó un estudio en la zona inferior del tubo observando los cambios en el backscattering. Esta zona se puede relacionar con la inestabilidad inherente al drenado. Se utilizaron los datos obtenidos del backscattering, en los milímetros del tubo donde se presentaba el fenómeno mencionado en la figura 13, zona 2. Una vez identificada la zona se procedió a utilizar métodos numéricos para referenciar la diferencia de área bajo la curva que presentaba la base del tubo. Se utilizó la integración numérica Simpson 3/8. El comportamiento de las diferentes muestras respecto al área inicial, se presenta en la gráfica 13. Como era de esperar, se confirma que las cremas más estables en cuanto al fenómeno de drenado son las que contienen goma de xantana, mientras que las más inestables son aquellas a las que solo se le añadió proteína. El comportamiento de los datos obtenidos en la integración numérica en la zona inferior del tubo, es similar al comportamiento del backscattering.



Gráfica 12. Volumen de drenado en función del tiempo de las diferentes cremas de leche a 25°C.

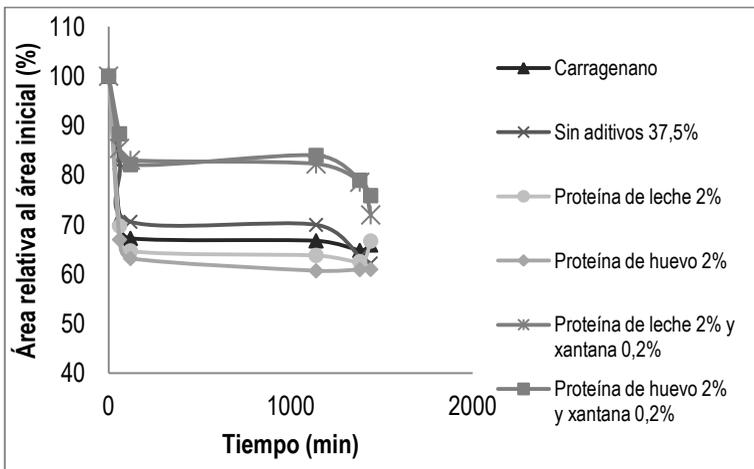


Gráfico 13. Porcentaje de área relativa al área inicial bajo la curva en la zona 2 indicada en la figura 13, que hace referencia a la estabilidad debida al drenado a 25 °C.

4.4. REOLOGÍA

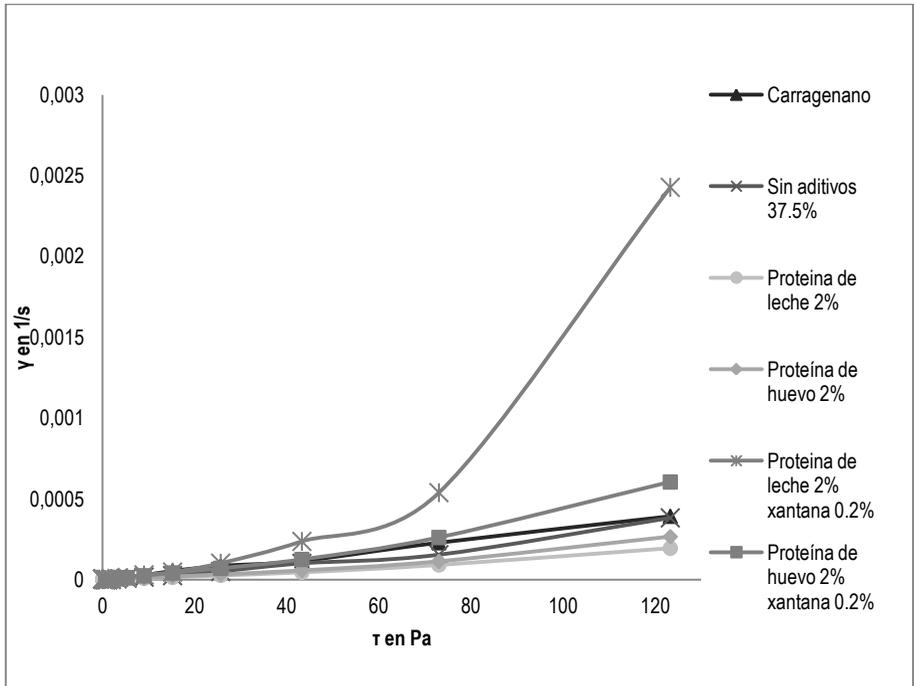
La crema de leche es un fluido no newtoniano, por tal motivo no tiene un valor de viscosidad constante con el gradiente. La crema de leche es considerada como un “soft solid”, sistemas considerados como semi-sólidos. Exhibe principalmente deformación elástica al aplicar una tensión, pero requiere de una tensión relativamente pequeña para lograr una deformación importante, esto puede derivarse de que el material posea un modulo elástico

bajo, o la tensión de fluencia sea pequeña. La crema de leche está considerada como un sistema empaquetado, en el cual las partículas deformables, componen una gran parte del volumen, con lo que se deforman entre sí (burbujas). Cuando una espuma es sometida a esfuerzo comienza a comportarse como un sólido elástico, la red de las paredes de las burbujas soporta el esfuerzo sin modificaciones estructurales. Seguidamente, la componente plástica sufre un pequeño aumento, exhibiendo un comportamiento más plástico que en el inicio, esto puede ser debido al reordenamiento de las burbujas, unas respecto a las otras, y puede estar asociado a la desaparición de alguna de ellas. Por último, cuando se alcanza un esfuerzo límite, la espuma fluye.

Se hicieron cuatro pruebas reológicas a las siguientes cremas de leche:

- A. Comercializada por las grandes cadenas que contiene como aditivo carragenano.
- B. Sin aditivos.
- C. Cremas con concentración de 28% y
 1. Concentración de proteína de leche de 2%.
 2. Concentración de proteína de huevo de 2%.
 3. Concentración de proteína de leche de 2%, y una concentración de 0,2% de goma de xantana.
 4. Concentración de proteína de huevo de 2%, y una concentración de 0,2% de goma de xantana.

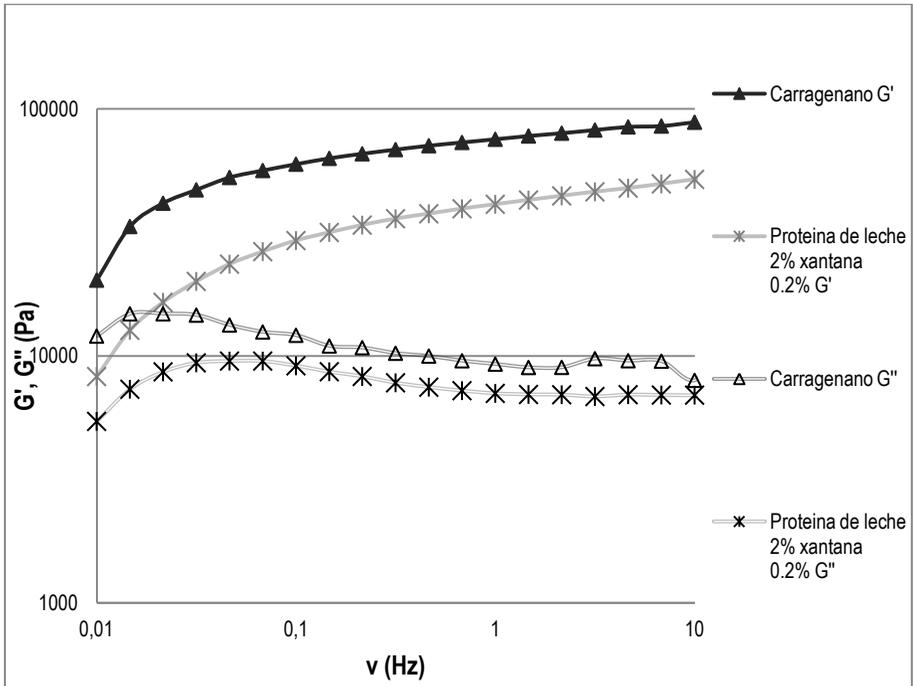
La primera prueba correspondió al esfuerzo de fluencia. Esta prueba se realiza para determinar si la espuma posee un esfuerzo umbral de deformación, es decir, si necesitan un mínimo valor de esfuerzo cortante para que el fluido se ponga en movimiento. Como se puede ver en la gráfica 14, no existe un esfuerzo umbral para ninguna de las cremas estudiadas, se evidencia un cambio al aplicar un esfuerzo a partir de 15 pascales. La espuma formada por la crema C3, tiene la velocidad de deformación más alta de las cremas estudiadas. Este comportamiento puede que se deba a la existencia de la goma de xantana, que aunque en sistemas de base acuosa logra un aumento de viscosidad, también ejerce como agente gelificante. Los geles, al someterse a un esfuerzo rompen y desgarran su estructura más rápido, mostrando una velocidad de deformación rápida. La crema que evidenció una menor velocidad de deformación fue la formulada con un 2% de proteína de leche.



Gráfica 14. Esfuerzo de Fluencia o umbral.

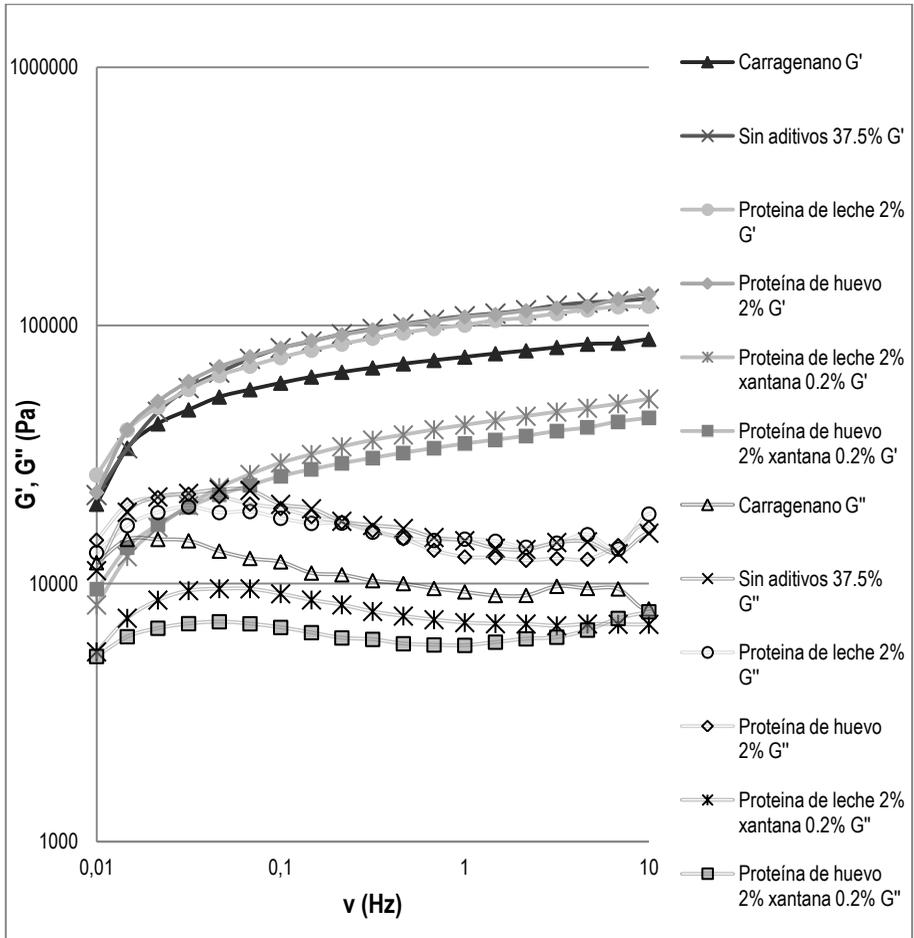
La segunda prueba sirvió para determinar el valor del esfuerzo cortante que se utilizaría para la prueba de comportamiento viscoelástico a diferentes frecuencias (tercera prueba). La gráfica se puede encontrar en el apéndice 2. En la tercera prueba, se demuestra que las diferentes cremas de leche tienen un comportamiento de semi-sólidos, en los cuales, la componente de almacenamiento de energía G' es más alta que el componente de energía disipada G'' (gráfica 15).

En la gráfica 15a, se muestra la tendencia que tiene la crema comercial que contiene carragenano y la crema formulada de proteína de leche 2% y xantana 0,2%, donde se ve claramente que siguen la misma tendencia.



Gráfica 15a. Ensayo frecuencia oscilatoria, comparativa de módulo de pérdida de energía G'' y de almacenamiento G' .

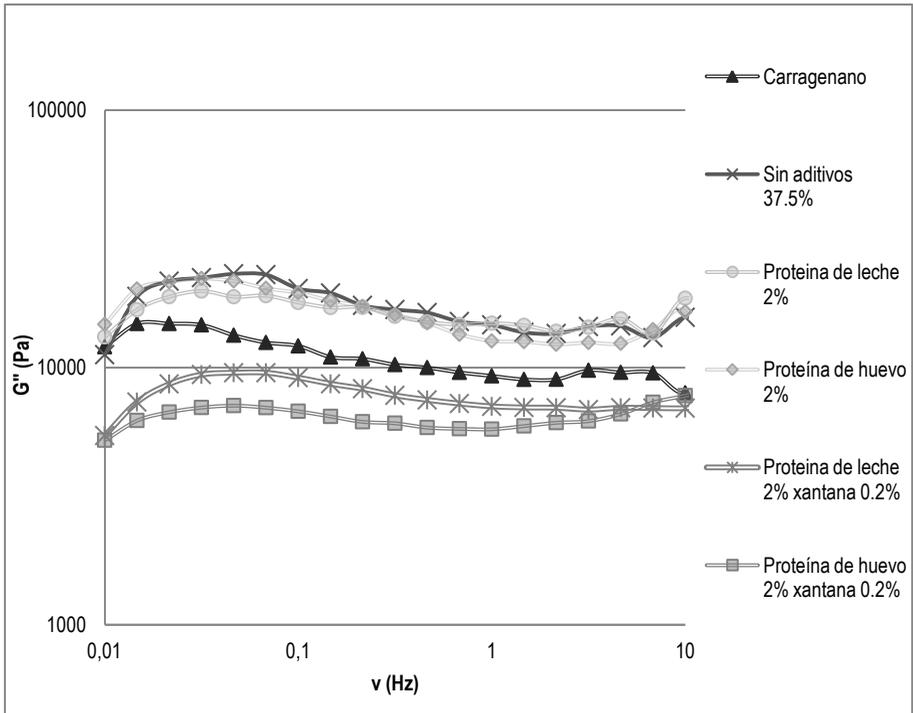
En la gráfica 15b, se muestra un pequeño incremento en el módulo elástico G' , con la frecuencia en todas las muestras. Este incremento se produce a frecuencias bajas lo que nos indica nuevamente que el sistema tiene un comportamiento mayoritariamente de sólido. Los módulos elásticos más altos, lo presentan las cremas a las que se le agregaron proteínas y tienen un bajo contenido de grasa, además de la crema que no posee ningún tipo de aditivo y con la concentración de grasa de 37.5%. Por otra parte las que presentan los módulos más bajos son las correspondientes a las que se les añadió goma de xantana. Estas diferencias pueden presentarse debido a que las interacciones moleculares entre las burbujas de aire y la interfase de suero que pueden provocar un aumento de resistencia al cizallamiento, debido a la acción de las proteínas y un alto contenido de grasa, muestras C1, C2 y B respectivamente.



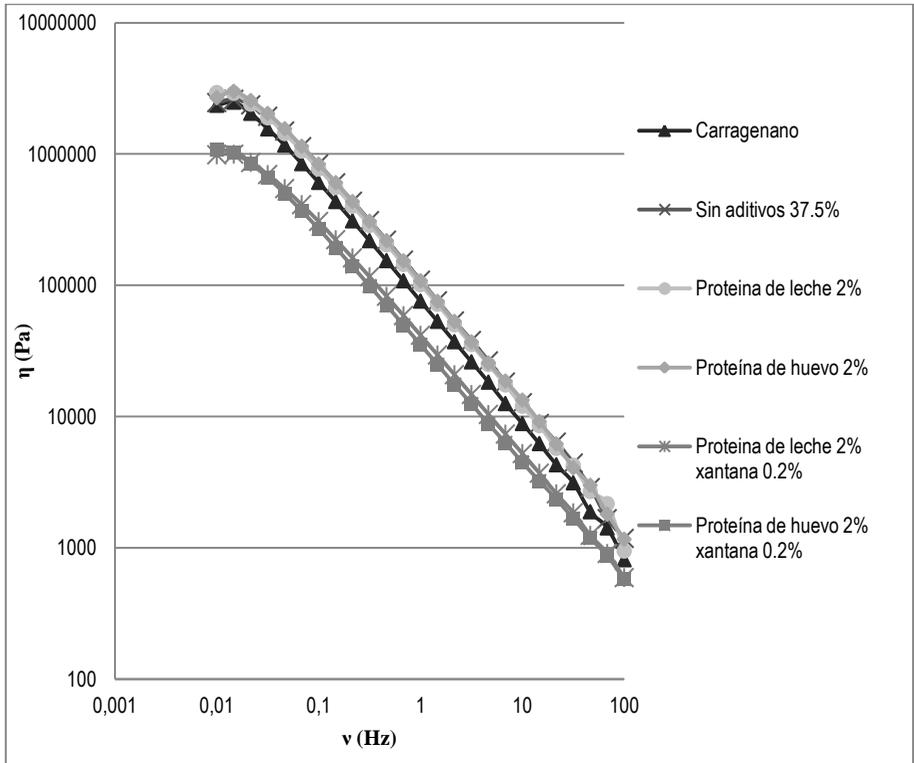
Gráfica 15b. Ensayo frecuencia oscilatoria, comparativa de módulo de pérdida de energía G'' y de almacenamiento G'.

La gráfica 16, muestra la comparativa entre los módulos de pérdida de las diferentes cremas en función de la frecuencia. Es evidente que la frecuencia tiene mayor influencia sobre los módulos elásticos que en los plásticos. Las cremas que mostraron valores más altos del módulo de pérdida de energía fueron nuevamente a las que se le agregaron solamente proteínas con bajo contenido de grasa y la que no presenta ningún aditivo con alto contenido de grasa. Los módulos de pérdida de energía más bajos son los de las cremas que contienen xantana, indicando que son más deformables.

La viscosidad compleja en función de la frecuencia, no muestra grandes diferencias respecto a la influencia de la frecuencia en las muestras sin aditivos, con carragenano y con proteínas. Por el contrario, muestra diferencia en las cremas que contienen goma de xantana, este comportamiento se puede dar ya que la viscosidad compleja esta correlacionada con la cohesividad o la estimación de la cantidad de deformación antes de la ruptura. Lo que concuerda con lo obtenido en la primera prueba, las cremas que contienen xantana tienen más facilidad para la deformación.



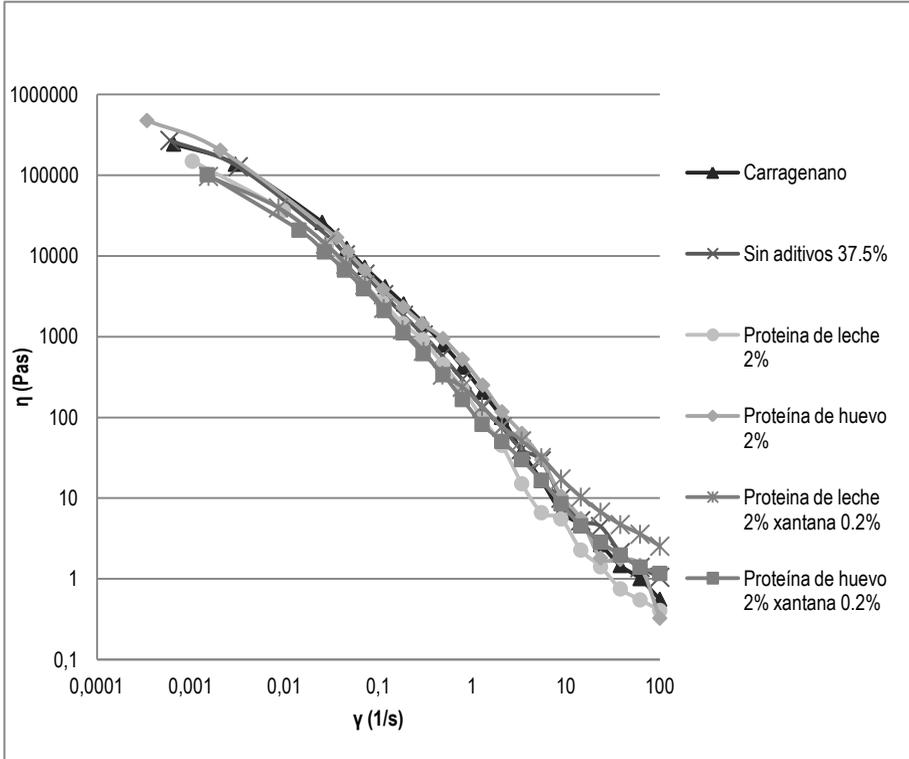
Gráfica 16. Comparación del módulo de pérdidas de las diferentes cremas.



Gráfica 17. Influencia de la frecuencia en la viscosidad compleja de las diferentes cremas de leche batidas.

En la última prueba se determinó la variación de la viscosidad, con el gradiente de deformación a 10 °C. Como se muestra en la gráfica 18, los comportamientos en cuanto a la viscosidad de las cremas de leche son muy parecidos. Las viscosidades disminuyen con el aumento del gradiente. Esta disminución de la viscosidad puede deberse a que un principio cuando la crema de leche líquida se bate, se presenta la coalescencia de los glóbulos de grasa produciendo un aumento de viscosidad, que posteriormente al aplicarle una cizalla excede el límite de grasa fundida. Esto conlleva al colapso de la espuma, al mismo tiempo que provoca disminución de la viscosidad. Aunque no de forma tan clara como en la viscosidad compleja, se corrobora que las muestras con goma xantana presentan viscosidades menores que las otras muestras.

Según los modelos reológicos (mostrados en el apéndice 3), el que mejor describe el comportamiento de la crema es el pseudoplástico, fluidos en los que la viscosidad aparente disminuye con el aumento de la relación de deformación.



Gráfica 18. Influencia del gradiente de velocidad en la viscosidad compleja.

5. CONCLUSIONS

Commercial whipping creams that can be found in the Barcelona area have fat concentrations in ranges of 32-38%. Carrageenan (E-407) is found in all creams which include additives.

From the results obtained by this study, the major findings about the design variables for the foam formation, stability and rheology were:

- Temperature is the variable that has major influence for the formation of the foam. An increase in the temperature showed a negative correlation in the overrun and a positive correlation in the whipping time. The manufacturing process is related to the partial coalescence of the fat globules, thus forming the three-dimensional foam network, and this process is thermo-dependent.
- The beater speed also influences the formation process. There is a positive correlation in the whipping time, since velocity to which the cream is subjected, determines the rate of introduction of air into the system. Respect to overrun, the beater speed has a negative influence. This phenomenon may occur because the shear produced by rapid beater friction agglomerate the fat globules limiting the bubbles that can stabilize.
- The rigidity of the system is affected by the beating time. If the beating time is less than the time of assembly, the amount of energy provided by the agitation is relatively low to achieve the partial coalescence of the fat globules and the protein absorption in the interface. On the other hand, if the beating time is exceeded by the assembly time, the separation of two-phase system occurs, due to agglomeration of the fat globules.
- The fat content is a determining factor in the foam formation. The globules of fat protect air bubbles and make possible the structure of whipped cream. The fat content limit for which was not achieved the foaming without an additive was 28%. Formed foam undergoes a rapid collapse, so the necessity of additives is evident.

- Whipped cream with a concentration of 35% fat and without additives, showed greater overrun in comparison with whipped cream with additives and equal fat concentration that can be found in the Barcelona market.
- Instability phenomena that occur in a whipped cream include bubble coalescence and drainage. Drainage causes faster foam collapse
- Stability was linked to the storage temperature. Whipped creams show more stability in storage condition of 10°C and a lower stability in a condition of 25°C. In this latest temperature, there is an evidence of the drain phenomenon.
- For whipped cream of 28% fat, the addition of protein shows a positive correlation in the foam formation process, but it does not provide stability to the system, as it is seen from a high volume of drained liquid. Whipped cream with ovalbumin collapsed faster than whipped cream with hydrolyzed milk protein.
- The physical properties and texture of the whipped cream with low fat content are significantly affected by the addition of xanthan gum. Addition of different amounts of xanthan gum (from 0.05 to 0.2%) shows a positive effect on the stability with respect to the drainage. These amounts did not show a significant effect on the overrun of whipped cream.
- There is a positive synergistic effect by using proteins and xanthan gum as additives in the preparation of whipped cream with low fat content. The above substances reduce the rapid collapse of the foam and present a great difference in the drained speed. The firmness and visual appearance obtained in this study are similar to the characteristics of the commercial creams.
- The formulated whipped creams showed better drainage stability than the commercial whipped cream. The drained volume of formulated whipped creams in this study exceeds greatly the behavior suffered by commercial whipped creams.
- Foams formulated with 0.2% of xanthan gum present a rheological behavior similar to the one presented by commercial whipped creams. There are some differences established in loss and storage modulus which can be attributed to the fat content and the presence of gels formed by this gum. Due to the variations of viscoelastic properties, a consumer study should be carried out for the adoption as product.

6. REFERENCES AND NOTES

- Aken, G. (2001). Aeration of emulsions by whipping; *Colloids and surfaces*, 190, 333-354.
- Casas, J. A., & García-Ochoa, F. (1999). Viscosity of solutions of xanthan/locust bean gum mixtures. *Journal of Sciences of Food and Agriculture*, 79, 25–31.
- Chang, Y., & Hartel, R.W. (2002). Measurement of air cell distributions in dairy foams; *International Dairy Journal*, 12, 463-472.
- Denkov, N. D. (2004). Mechanisms of foam destruction by oil-based antifoams. *Langmuir*, 20(22), 9463–9505.
- Denkov, N. D., & Marinova, K. G. (2006). Antifoam effects of solid particles, oil drops and oil-solid compounds in aqueous foams. In B. P. Binks, & T. S. Horozov (Eds.), *Colloidal particles at liquid interfaces*, 383–444. Cambridge: Cambridge University Press.
- Dickinson, E., & Patino, J. M. R. (1999). *Food emulsions and foams – Interfaces, interactions and stability*. London: RSC. Spec. Ed. No. 227.
- Dickinson, E., & Semenova, M.G. (1992). Emulsifying properties of covalent protein-dextran hybrids. *Colloids & Surfaces*, 64, 299-310.
- Exerowa, D., & Kruglyakov, P. M. (1998). *Foams and foam films: Theory, experiment, application*. Amsterdam: Elsevier.
- García-Ochoa, F., & Casas, J. A. (1994). Apparent yield stress in xanthan gum solution at low concentration. *Chemical Engineering Journal*, 53, B41–B46.
- García-Ochoa, F., Santos, V. E., Casas, J. A., & Gómez, E. (2000). Xanthan gum: Production, recovery, and properties. *Biotechnology Advances*, 18, 549–579.
- Graf E., & Müller H.R. (1965). Fine structure and whippability of sterilized cream. *Milchwissenschaft*, 20, 302-308.
- Green, A., Littlejohn, K., Hooley, P., & Cox, P. (2013). Formation and stability of food foams and aerated emulsions: Hydrophobins as novel functional ingredients; current opinion in colloid & interface science, 18, 292-301.

Hamley, Ian W. (2007). *Introduction to Soft Matter*, revised edition synthetic and biological self-assembling materials,; Wyley, John Wyley & Sons. England. UK.

Ivanov, D.S., & Dimitrov, I., I Ivanov, ed. (1988). *Thin Liquid Films*. Surfactant Sci Ser 29. Marcel Dekker, New York.

Jakubczyk, E, & Niranjana, K. (2006). Transient development of whipped cream properties; *Journal of food engineering*, 77, 79-83.

Langendorff, V., Cuvelier, G., Michon, C., Launay, B., Parker, A., & De Kruif, C. G. (2000). Effects of carrageenan type on the behaviour of carrageenan/milk mixtures. *Food Hydrocolloids*, 14, 273–280.

Leser, M. E., & Michell, M. (1999). Aerated milk protein emulsion- new microstructural aspect; *current opinion in colloid & interface science*, 4, 239-244.

Malysa, K., & Lunkenheimer, K. (2008). Foams under dynamic conditions. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 13, 150-162.

Margaritis, A., & Zajic, J. E. (1978) *Biotechnology review: Mixing mass transfer and scale-up of polysaccharide fermentations*. *Biotechnology and Bioengineering*, 20, 939–1001

Martin, A.H., Grolle, K., bos, M. A., Cohen-Stuart, M.A., van Vliet, T.J. (2002). "Network forming properties of various proteins adsorbed at the air/water interface in relation to foam stability" *Colloid Interface Sci.*, 254, 175-183.

Meunier, G. (1994). Le TURBISCAN: un nouvel instrument de mesure de phénomènes naissants de de'mixtion dans les émulsions et les suspensions, *Spectra Analyse* 179, 53–58.

Meunier, G., & Mengual, O. (1996). A new concept in stability analysis of concentrated colloidal dispersions (emulsions, suspensions, foams, gels) 4th World Surfactants Congress CESIO, 4, 301– 313.

Myers, D. (1999). *Surfaces, interfaces, and colloids principles and applications* (second edition); Wiley-VCH. New York. USA.

Oh, S. G., & Shah, D.O. (1991). "Relationship between Micellar Lifetime and Foamability of Sodium Dodecyl Sulfate and Sodium Dodecyl Sulfate/1-Hexanol Mixtures" *Langmuir*, 7, 1316-1318.

Salager J.L., Andérez J.M., & Forgiarini A. (1999). "Influencia de la formulación sobre las espumas", *L'actualite chimique*, 10-21.

Shchipunov, Y.A., Chesnokov, A. (2003). Carrageenan gels in skim milk: Formation and rheological properties. *Colloid Journal*, 65, 105–113.

Walastra, P. (2003). *Physical Chemistry of Foods*,; Marcel Dekker, Inc. New York - Basel. USA – SWITZERLAND.

Zhao Q., Zhao M., Yang B., & Cui C. (2009). Effect of xanthan gum on the physical properties and textural characteristics of whipped cream. *Food Chemistry*, 116, 624-628.

<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/la00055a004> (26 de noviembre 2013)

<http://www.titanex.com.tw/doc/tecsupport/AN-TClassic-Foam-stability.pdf> (1 de diciembre 2013).

<http://www.creativegan.net/archives/ingredientes/#carragenato> (1 de diciembre 2013).

ANEXOS

ANEXO 1: EXPERIMENTOS PRELIMINARES

Se realizaron varios experimentos previos, con la finalidad de conocer el sistema, puesto que el sistema es muy inestable.

Se utilizó en un principio el agitador de la figura 14a, este presentaba tiempos cortos de montado, es decir, el método de introducción de aire es más efectivo. Este comportamiento puede ser debido al diseño de la varilla de agitación, que está compuesta por alambres con terminaciones redondeadas, y con al menos ocho circunferencias formadas por dichos alambres. Estas varillas están diseñadas en forma de globo o gota para introducir aire de forma efectiva, sin requerimientos grandes de energía, ya que se utilizan para el batido de alimentos manualmente que incluye no solo movimientos rotatorios sino también de translación. Debido a su frágil estructura los experimentos no fueron reproducibles, por lo que se encontró la necesidad de utilizar una varilla que no modificara su forma después de cada experimento.

La varilla utilizada durante toda la experimentación, es un componente de una batidora eléctrica marca taurus y se muestra en la figura 14b, está formada por alambres planos y su estructura tiene 4 unidades de estos alambres. Normalmente estas batidoras se componen de dos varillas iguales para crear un flujo turbulento para formar la espuma en tiempos cortos. En la experimentación solo se utilizó una de las varillas y el sistema de agitación podía moverse de forma rotacional pero no de translación, por lo que se evidenciaron tiempos aún más largos.

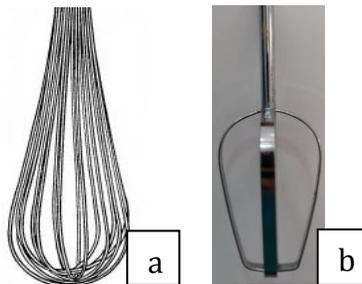


Figura 14. Batidores utilizados en la experimentación.

ANEXO 2: TABLAS Y GRÁFICAS DE RESULTADOS

En este apartado se encontraran las tablas de resultados de los resultados de formación y las gráficas de los resultados de medidas de estabilidad y de reología no mostradas en el trabajo, éstas sustentaban el mismo comportamiento que describen las que contienen el cuerpo del trabajo.

Velocidad de agitación (r.p.m.)	Tiempo (s)	densidad (g/mL)	Overrun
800	1849	0,649	0,527
900	1040	0,633	0,565
1000	640	0,626	0,584
1100	478	0,662	0,497
1200	200	0,671	0,530

Tabla 3. Datos del proceso de formación obtenidos a 10°C de la crema de leche sin aditivos del 37.5% de grasa, influencia de la velocidad de agitación.

Tiempo (s)	Velocidad de agitación (r.p.m.)				
	800	900	1000	1100	1200
	Potencia (W)				
30	10,1787602	10,46150354	10,46150354	10,36725576	10,1787602
60	10,1787602	10,36725576	10,46150354	10,36725576	10,1787602
90	10,08451242	10,46150354	10,36725576	10,27300798	10,27300798
120	10,08451242	10,36725576	10,27300798	10,36725576	10,1787602
150	10,27300798	10,46150354	10,36725576	10,46150354	10,08451242
180	10,36725576	10,36725576	10,27300798	10,46150354	10,1787602
210	10,46150354	10,36725576	10,36725576	10,46150354	10,08451242
240	10,46150354	10,27300798	10,27300798	10,36725576	10,08451242
270	10,36725576	10,36725576	10,36725576	10,46150354	10,08451242
300	10,36725576	10,46150354	10,27300798	10,27300798	10,08451242
330	10,36725576	10,46150354	10,27300798	10,27300798	10,1787602
360	10,27300798	10,46150354	10,46150354	10,36725576	10,36725576
390	10,36725576	10,46150354	10,46150354	10,55575132	10,55575132
420	10,36725576	10,46150354	10,55575132	10,6499991	11,40398133
450	10,36725576	10,46150354	10,46150354	10,55575132	-
480	10,1787602	10,46150354	10,55575132	10,74424688	-

510	10,27300798	10,46150354	10,55575132	11,12123799	-
540	10,27300798	10,46150354	10,55575132	11,30973355	-
570	10,27300798	10,46150354	10,74424688	-	-
600	10,46150354	10,46150354	10,74424688	-	-
630	10,55575132	10,46150354	10,83849465	-	-
660	10,36725576	10,55575132	11,12123799	-	-
690	10,36725576	10,46150354	11,59247689	-	-
720	10,27300798	10,6499991	-	-	-
750	10,36725576	10,6499991	-	-	-
780	10,36725576	10,6499991	-	-	-
810	10,36725576	10,55575132	-	-	-
840	10,36725576	10,74424688	-	-	-
870	10,46150354	10,74424688	-	-	-
900	10,36725576	10,83849465	-	-	-
930	10,46150354	10,83849465	-	-	-
960	10,46150354	10,74424688	-	-	-
990	10,46150354	10,6499991	-	-	-
1020	10,46150354	10,46150354	-	-	-
1050	10,46150354	10,46150354	-	-	-
1080	10,46150354	10,93274243	-	-	-
1110	10,46150354	-	-	-	-
1140	10,46150354	-	-	-	-
1170	10,46150354	-	-	-	-
1200	10,55575132	-	-	-	-
1230	10,55575132	-	-	-	-
1260	10,55575132	-	-	-	-
1290	10,55575132	-	-	-	-
1320	10,6499991	-	-	-	-
1350	10,55575132	-	-	-	-
1380	10,6499991	-	-	-	-
1410	10,74424688	-	-	-	-
1440	10,74424688	-	-	-	-
1470	10,74424688	-	-	-	-
1500	10,6499991	-	-	-	-
1530	10,74424688	-	-	-	-
1560	10,93274243	-	-	-	-
1590	10,93274243	-	-	-	-
1620	11,02699021	-	-	-	-
1650	10,93274243	-	-	-	-

1680	11,02699021	-	-	-	-
1710	11,02699021	-	-	-	-
1740	11,30973355	-	-	-	-

Tabla 4. Datos del proceso de formación obtenidos a 10°C de la crema de leche sin aditivos del 37.5% de grasa, Potencia absorbida.

Temperatura (°C)	Tiempo (s)	Densidad (gr/mL)	Overrun
5	1135	0,562	0,762
10	645	0,628	0,577
15	336	0,670	0,479
20	128	0,774	0,281

Tabla 5. Datos del proceso de formación obtenidos a 1000 r.p.m. de la crema de leche sin aditivos del 37.5% de grasa, influencia de la temperatura.

Tiempo (s)	Densidad (g/mL)	Overrun
480	0,611	0,622
540	0,623	0,590
600	0,649	0,526
660	0,663	0,495
720	0,720	0,376

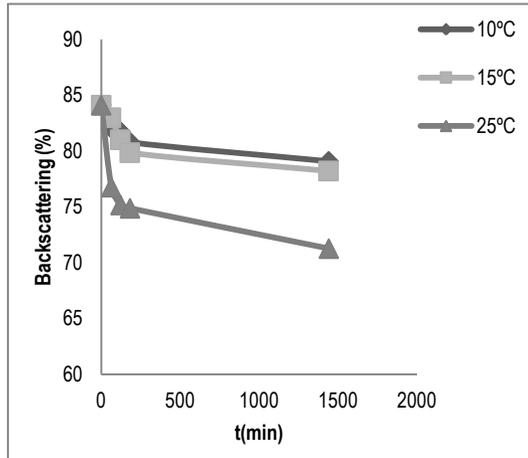
Tabla 6. Datos del proceso de formación a 10°C y 1000 r.p.m., diferentes tiempos de batidos de la crema sin aditivos del 37,5% en contenido de grasa.

Concentrcion de grasa %v/v	Tiempo (s)	Densidad (gr/mL)	Overrun
37	639,9	0,648855	0,527134898
35	771,2	0,515030833	0,923941345
33	1078,6	0,673358667	0,471562131
30	1149	0,7351747	0,347828093
28	1397,6	0,814882667	0,215989927

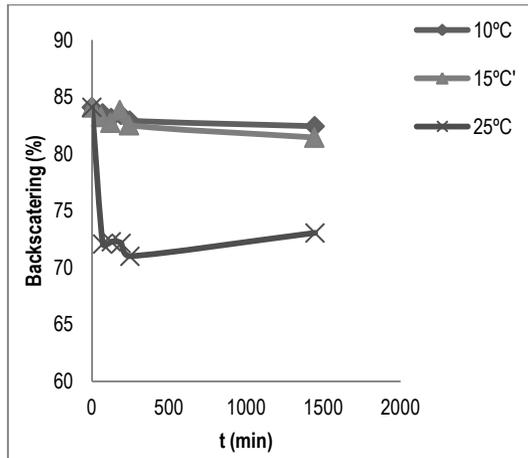
Tabla 7. Datos del proceso de formación obtenidos a 10°C y 1000 r.p.m. de la crema de leche sin aditivos influencia de la concentración de la grasa.

En las gráficas 19 a 23, se muestra la comparativa del backscattering de las cremas de leche batidas con baja concentración de grasa (28%), y de las cremas que fueron estabilizadas con proteínas de leche o proteína de huevo a distintas temperaturas. A un almacenamiento a 10°C todos los sistemas muestran cambios inferiores respecto al Backscattering inicial. En condiciones de almacenamiento de 15°C no se reflejan grandes cambios con respecto al

almacenamiento a 10°C, en lugar a 25°C, como ya se ha nombrado se evidencian los cambios más grandes.



Gráfica 19. Estabilidad de la crema de leche sin aditivos con un porcentaje de grasa de 28%.



Gráfica 20. Estabilidad de la crema de leche con una concentración de grasa de un 28% estabilizada con un 0.5% p/p de hidrolizado de proteína de leche.

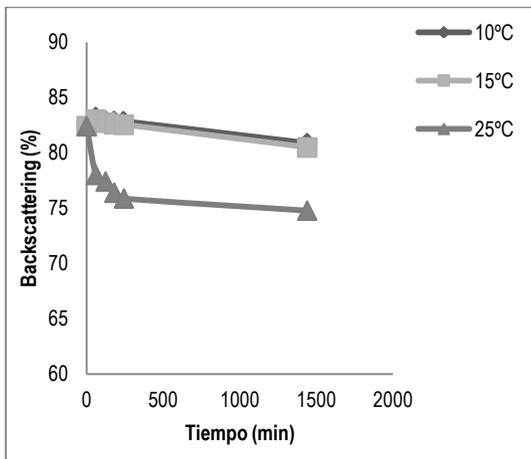
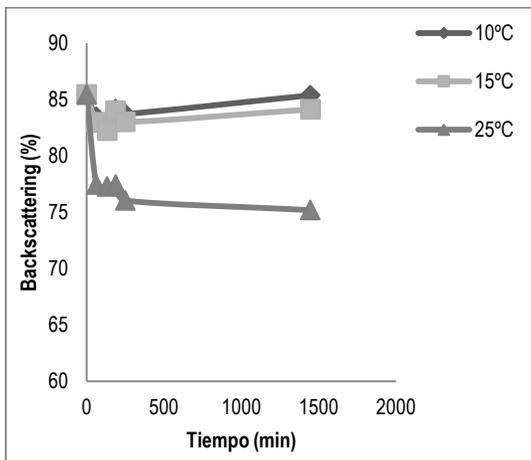
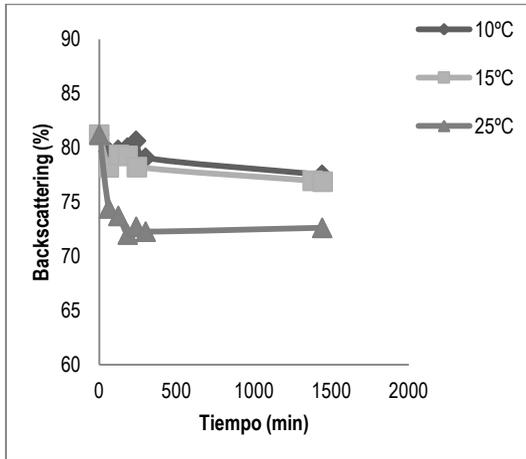


Gráfico 21. Estabilidad de la crema de leche con una concentración de grasa de un 28% estabilizada con un 2% p/p de hidrolizado de proteína de leche.

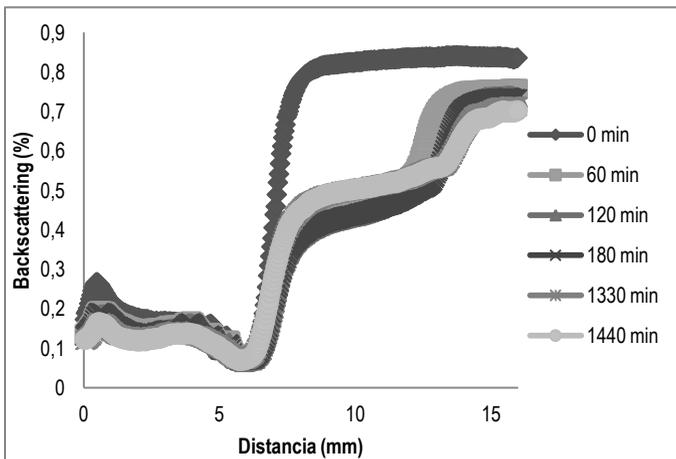


Grafica 22. Estabilidad de la crema de leche con una concentración de grasa de un 28% estabilizada con un 0,5% p/p de proteína de huevo.

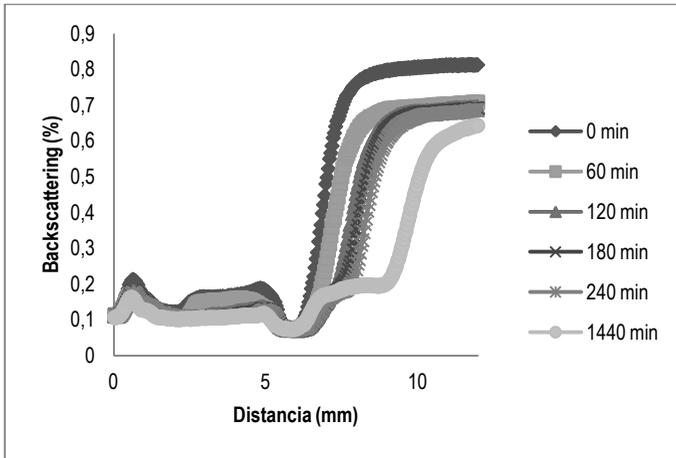


Gráfica 23. Estabilidad de la crema de leche con una concentración de grasa de un 28% estabilizada con un 2% p/p de proteína de huevo.

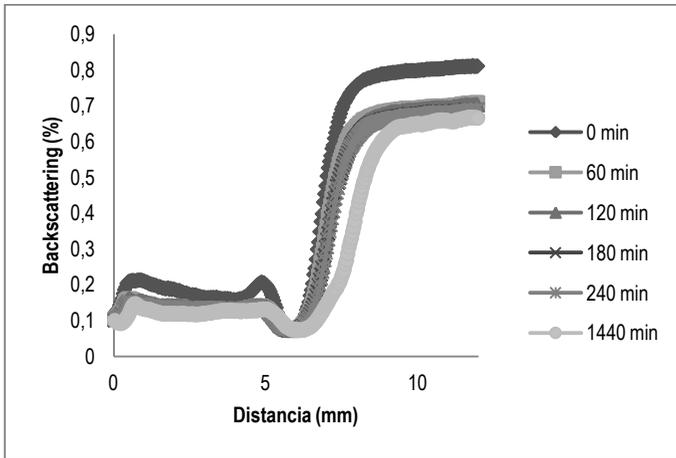
De la gráfica 24 a 32 se muestra los comportamientos de backscattering en la base del tubo, se escogió las concentraciones de xantana de 0.2% con proteína de leche 2% o con proteína de huevo 2%, ya que son las muestras que menos cambios se observa en la base del tubo.



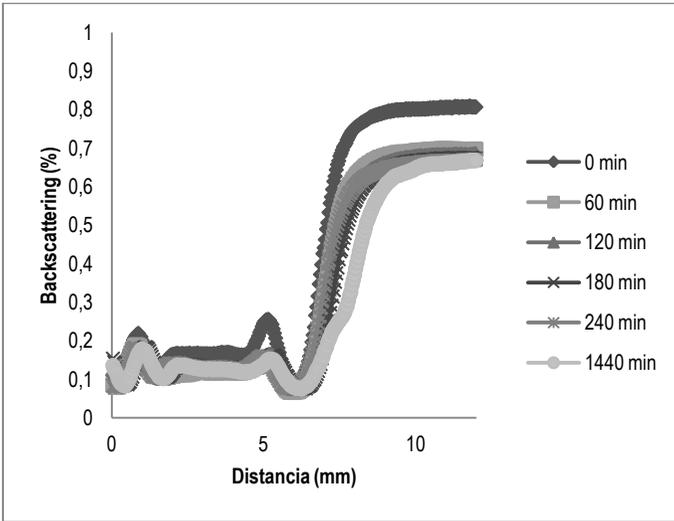
Gráfica 24. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, a 25°C de almacenamiento.



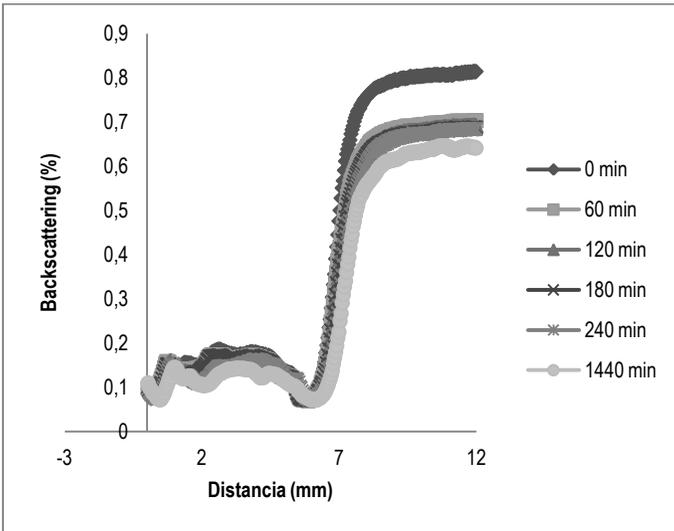
Gráfica 25. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, Proteína de leche 2% y goma de xantana al 0.05%, a 25°C de almacenamiento.



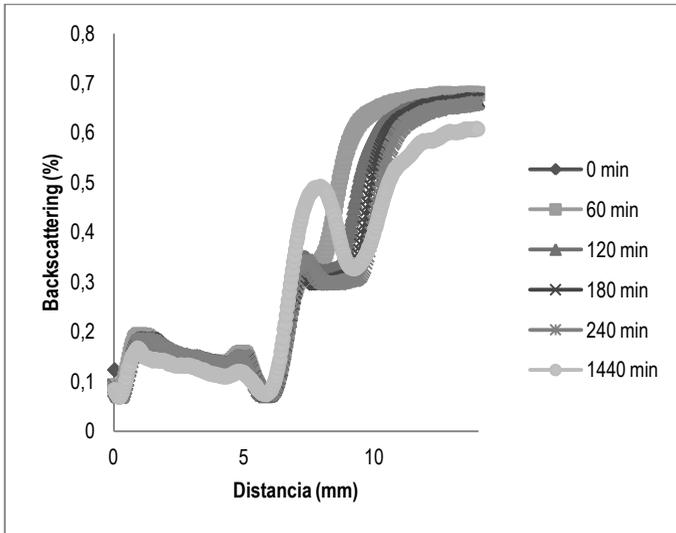
Gráfica 26. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, Proteína de leche 2% y goma de xantana al 0.1%, a 25°C de almacenamiento.



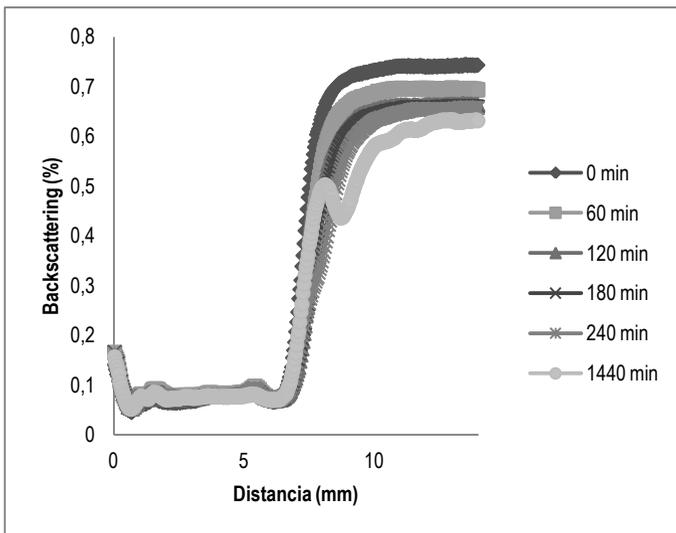
Gráfica 27. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, Proteína de leche 2% y goma de xantana al 0.15%, a 25°C de almacenamiento.



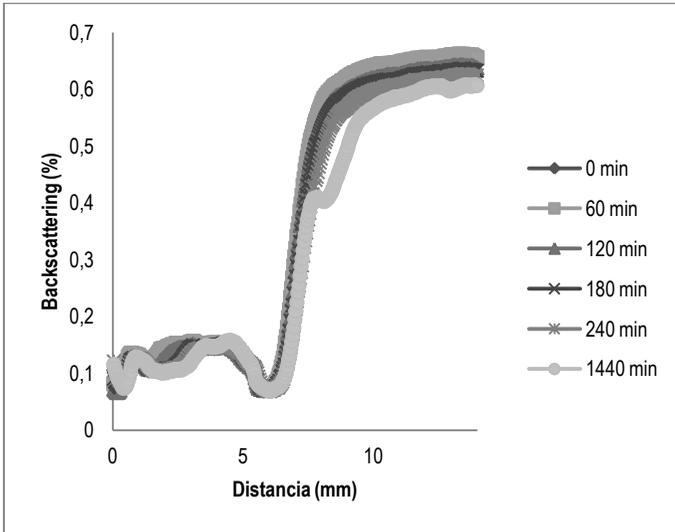
Gráfica 28. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, Proteína de leche 2% y goma de xantana al 0.2%, a 25°C de almacenamiento.



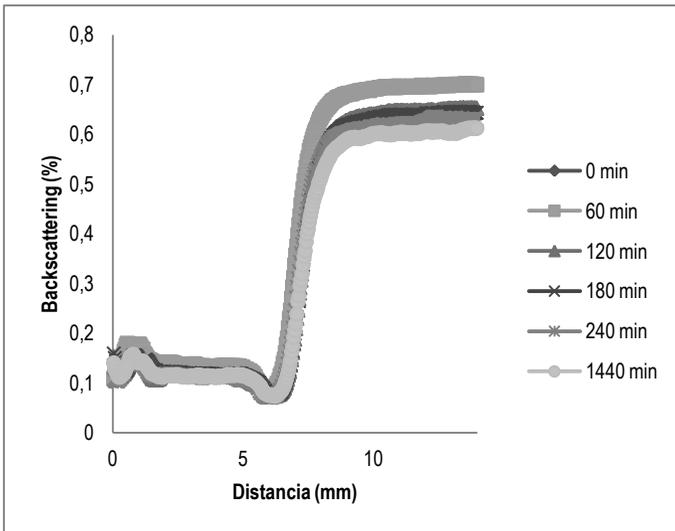
Gráfica 29. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, proteína de huevo 2% y goma de xantana al 0.05%, a 25°C de almacenamiento.



Gráfica 30. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, proteína de huevo 2% y goma de xantana al 0.1%, a 25°C de almacenamiento.



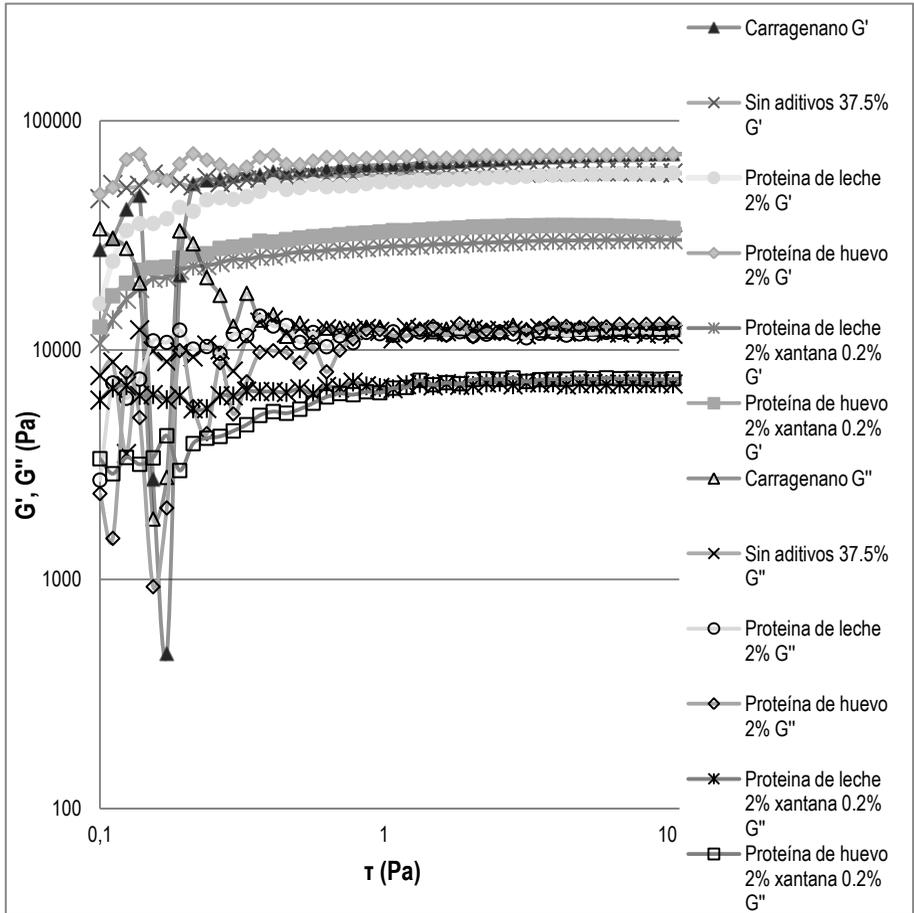
Gráfica 31. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, proteína de huevo 2% y goma de xantana al 0.15%, a 25°C de almacenamiento.



Gráfica 32. Backscattering en la base del tubo, de la cremas de 28% de concentración de grasa, proteína de huevo 2% y goma de xantana al 0.2%, a 25°C de almacenamiento.

En la gráfica 33, se muestra la prueba de esfuerzo oscilatorio que se le realizó a las cremas de leche batidas de baja concentración con aditivos, la crema sin aditivos de concentración de

37,5% en grasa y la crema que contiene carragenano. Esta prueba se realiza para conocer en que rangos de esfuerzo la muestra tiene un comportamiento en el cual no muestre grandes modificaciones con respecto a las propiedades viscoelásticas, es decir se muestre una línea horizontal en la gráfica. En este caso el esfuerzo tomado puede ser de 1 a 10, el escogido para realizar la prueba de frecuencia oscilatoria fue 5.



Gráfica 33. Ensayo Esfuerzo oscilatorio comparativa de módulo de pérdida de energía G'' y de almacenamiento G' .

ANEXO 3: REOLOGÍA DE LOS ALIMENTOS

La reología se define como la ciencia de la deformación y el flujo de la materia. La reología de alimentos por consecuente es el estudio de la deformación y el flujo de cada una de las etapas de la industria de productos alimenticios (materias primas, productos intermedios, productos finales).

La reología se utiliza como una herramienta para comparar los productos alimenticios y las nuevas formulaciones. Los estudios reológicos proporcionan información sobre los cambios estructurales en los distintos procedimientos a los que se somete la comida. Además, brinda información sobre los rangos de textura aceptados por el consumidor para nuevas formulaciones de producto.

Puesto que hay muchos tipos de comportamiento de los fluidos y sólidos, existen diferentes modelos que explican el comportamiento. Estos se clasifican en Newtonianos o no-newtonianos. Los fluidos newtonianos se deforman con una velocidad directamente proporcional la fuerza aplicada, cuando se somete a un cizallamiento tangencial. En el caso de los fluidos no newtonianos el esfuerzo cortante no es directamente proporcional a la velocidad de deformación.

Los fluidos no newtonianos pueden clasificarse respecto a su dependencia del tiempo, los modelos que describen comportamientos independientes del tiempo son: Plásticos Bringham, pseudoplásticos y dilatantes. Mientras que los fluidos que muestran dependencia con el tiempo pueden clasificarse en fluidos tixotrópicos y reopéticos.

El comportamiento reológico de los alimentos puede ser descrito por diferentes modelos matemáticos, donde se utilizan ecuaciones que relacionan el esfuerzo cortante con la velocidad de deformación. Normalmente, se utiliza el modelo propuesto por Herschel y Bulkey:

$$\tau = \tau_0 + K \left(\frac{dv_x}{dy} \right)^n$$

Ecuación 2. Modelo Reológico.

Donde :

τ = Esfuerzo cortante.

τ_0 = Límite elástico.

K = Índice de consistencia de flujo.

dv_x / dy = Velocidad de deformación.

n = Índice de comportamiento de flujo.

Dependiendo del valor de cada uno de los parámetros, esta ecuación matemática puede describir los diferentes comportamientos reológicos. La siguiente tabla muestra los valores de los parámetros y el modelo que mejor describe el comportamiento del fluido:

Comportamiento reológico	Índice de comportamiento de flujo	Límite elástico
Newtoniano	$n = 1$	$\tau_0 = 0$
seudoplástico	$n \leq 1$	$\tau_0 = 0$
Dilatante	$n \geq 1$	$\tau_0 = 0$
Plástico de Bingham	$n = 1$	$\tau_0 > 0$
Modelo mixto	$n \leq 1$	$\tau_0 > 0$

Tabla 2. Parámetros reológicos según el modelo matemático de Herschel y Bulkley.

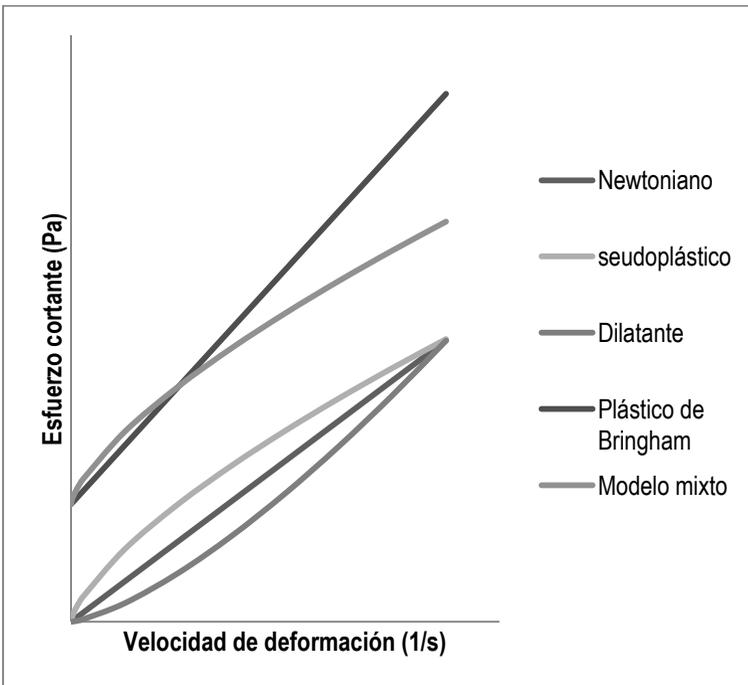


Figura 15. Comportamiento reológico.

