



---

**Universidad de Valladolid**  
**Campus de Palencia**

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR  
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Máster en Calidad, Desarrollo e Innovación de Alimentos**

**DESARROLLO DE MAHONESA BAJA EN GRASA CON HARINA  
EXTRUSIONADA COMO INGREDIENTE FUNCIONAL**

Alumno: Laura Román Rivas

Tutor: Manuel Gómez Pallarés

Julio 2014



# Desarrollo de mahonesa baja en grasa con harina extrusionada como ingrediente funcional

Development of reduced-fat mayonnaise containing extruded flour as functional ingredient

Laura Román Rivas

Área de Tecnología de los Alimentos, E.T.S. Ingenierías Agrarias, Universidad de Valladolid, 34004 Palencia, España  
Food Technology Area, College of Agricultural Engineering, University of Valladolid, 34004 Palencia, Spain.

## Resumen:

La mahonesa, con contenido en aceite superior al 65%, es una de las salsas más consumidas. Actualmente existe una creciente tendencia hacia la reducción de la grasa en los alimentos, por estar relacionado su consumo con problemas de obesidad, enfermedades cardiovasculares y ciertos cánceres. Las harinas extrusionadas, con alta capacidad de absorción de agua en frío, representan una alternativa económica, y medioambiental, al uso de almidones modificados como sustitutos de la grasa. En este estudio se ha evaluado el efecto del remplazo del aceite, para niveles del 30%, 50% y 70%, por una mezcla de harina extrusionada de maíz con tres ratios diferentes de agua. Se ha analizado la microscopía, reología, estabilidad y color de las mahonesas. La sustitución de aceite por harina extrusionada afecta a la microestructura de la emulsión, reduciendo paulatinamente la densidad y el tamaño de las gotas de aceite. En general, es posible conseguir mahonesas light con propiedades reológicas similares a la control, siendo la concentración de agua el factor determinante. La reducción de aceite en la formulación produce un aumento de la estabilidad a la congelación, pero reduce la estabilidad de la emulsión con el tiempo. El color de las mahonesas se modifica ligeramente a medida que se incrementa el nivel de sustitución. Acorde a estos resultados, es posible elaborar mahonesas con harina extrusionada como sustituta de la grasa con similares características a la mahonesa tradicional.

**Palabras clave:** Mahonesa, reducido en grasa, harina extrusionada, microscopía, reología, estabilidad.

## Abstract:

Mayonnaise, with oil content more than 65%, is one of the most widely consumed sauces. Nowadays, there is an increasing tendency toward reducing fat content in food products, since fat consumption is associated with obesity, cardiovascular diseases and several types of cancer. Extruded flours, with great cold water absorption capacity, represent an economical and environmental alternative to modified starches as fat replacers. In this research, the effect of oil replacement, at levels of 30%, 50% and 70%, by a mixture of maize extruded flour with three different water proportions was evaluated. Microscopy, rheological properties, stability, and color of mayonnaises were analyzed. Fat replacement by extruded flour affects to emulsion microscopy, gradually decreasing the density and size of oil droplets. In general, it is possible to get light mayonnaises with similar rheological properties to the control ones, being water content the leading factor. Reducing oil in the formulation results in an increased stability to freezing, but it decreases emulsion stability over time. Mayonnaise color is slightly modified as level of substitution increases. According to results, the use of extruded flour allows the preparation of a reduced-fat mayonnaise with similar characteristics to those of a typical mayonnaise.

**Key words:** Mayonnaise, reduced-fat, extruded flour, microscopy, rheology, stability.



## 1. INTRODUCCIÓN

La mahonesa o mayonesa es probablemente una de las salsas más antiguas y mayormente consumidas en el mundo actualmente (Depree & Savage, 2001). La mahonesa es ampliamente utilizada como salsa y condimento en ensaladas y otros platos, y en la mayoría de restaurantes de comida rápida (Teklehaimanot et al., 2013) ya que aumenta el atractivo y el sabor de los productos (Sikora et al., 2008). En España, la mahonesa tradicional está constituida básicamente por aceite vegetal, huevo entero o yema de huevo, vinagre y zumo de limón, pudiendo adicionarse otras materias primas tales como sal, especias o sustancias aromatizantes (Real Decreto 858/1984). Se trata de una emulsión de aceite en agua, en forma semisólida, con gotas de aceite estrecha y fuertemente empaquetadas (Depree & Savage, 2001). Estas emulsiones son sistemas termodinámicamente inestables debido a que el contacto entre las moléculas de aceite y agua es energéticamente desfavorable, y a las diferentes densidades de sus componentes principales (McClements & Demetriades, 1998). El contenido de aceite de las mahonesas tradicionales es superior al 65% por lo que es generalmente considerado como un alimento alto en grasa y calorías (Ma & Boye, 2013).

Actualmente, existe una creciente tendencia hacia la reducción del contenido en grasa de los productos alimenticios con el fin de satisfacer las demandas del consumidor, cada vez más preocupado por los problemas de salud (Sandrou & Arvanitoyannis, 2000; Warrand, 2006). El sobreconsumo de grasas provoca obesidad (Bray et al., 2004) y se asocia con otros problemas de salud, como las enfermedades cardiovasculares (Astrup et al, 2011; Schwingshackl & Hoffmann, 2013) e incluso varios tipos de cáncer (Rothstein, 2006). Una dieta baja en grasas por sí sola es efectiva a la hora de inducir la pérdida de peso en sujetos con sobrepeso, observándose una pérdida de peso media alrededor de 1,8 kg/mes (Astrup et al., 2000). El consumo de productos con contenido reducido en grasa da lugar a una menor incorporación de energía, lo que puede facilitar el mantenimiento de un déficit de energía a largo plazo y, por tanto, frenar el ritmo de aumento o recuperación de peso (De Graaf et al., 1997; Jonnalagadda, & Jones, 2005). Además, la reducción o modificación de la ingesta de grasa promueve una pequeña pero potencialmente importante reducción en el riesgo de sufrir enfermedades cardiovasculares (Hooper et al., 2001).

Se debe tener en cuenta que en la Comunidad Europea (Regulación EC 1924/2006) un producto solamente puede obtener la declaración nutricional de reducido en grasa, *light* o *lite* cuando la reducción de su contenido en grasa es de al menos un 30% en



comparación con un producto similar, mientras que, la declaración de bajo en grasa sólo es posible cuando el producto no contiene más de 3 g de grasa por 100 g para productos sólidos o 1,5 g de grasa por 100 ml para líquidos. Sin embargo, la calidad del producto tradicional es difícil de imitar cuando se preparan alimentos reducidos en grasa (Liu et al., 2007) ya que la grasa juega un papel importante en el mantenimiento de propiedades como la textura, la estabilidad, la vida útil, la lubricidad, el color y el sabor de los alimentos (Ma & Boye, 2013; McClements & Demetriades, 1998). Así, la eliminación de la grasa puede causar cambios significativos en las propiedades físico-químicas y sensoriales de las mahonesas pudiendo resultar indeseables para los consumidores (Ma & Boye, 2013), ya que la cantidad de aceite y el volumen relativo entre las fases de aceite y agua son factores importantes que afectan a la estabilidad de las emulsiones de mahonesa (Harrison & Cunningham, 1985). Por tanto, para mantener las propiedades de las mahonesas con contenido reducido en grasa, es necesario utilizar diferentes tipos de ingredientes o aditivos como sustitutos de la grasa. Generalmente, ingredientes no grasos, basados en carbohidratos, entre los que se incluyen gomas, almidones modificados y fibras, con diferentes propiedades funcionales, son incorporados en las mahonesas reducidas en grasa. Estos ingredientes se añaden principalmente para estabilizar la emulsión e incrementar la viscosidad de la mahonesa *light* (Nikzade et al., 2012). Una gran variedad de gomas se han empleado, tales como xantana, konjac, guar o pectinas (Li et al., 2014; Liu et al., 2007; Ma & Barbosa-Cánovas 1995a, b; Su et al., 2010). Las gomas también contribuyen al control de la capacidad de vertido, mejora de la adhesión y suspensión de partículas sólidas (Ma & Barbosa-Cánovas 1995a). Además, fibras de diferentes orígenes, incluyendo  $\beta$ -glucanos (Worrasinchai et al., 2006), inulina (Alimi et al., 2013) o fibra de cítricos (Su et al., 2010) se han utilizado como sustitutas de la grasa. Estos productos suelen presentar un efecto espesante, puesto que son sustancias que incrementan la viscosidad de la fase continua, y por tanto, disminuyen el movimiento de las gotas de grasa, contribuyendo a la estabilidad del producto a largo plazo (McClements & Demetriades, 1998).

Los almidones modificados se incluyen a menudo en la formulación de productos reducidos en grasa debido a su bajo coste y a la textura cremosa única que imparten a dichos productos (Cho et al., 1999). Los almidones modificados se utilizan para espesar y estabilizar la salsa y para proporcionar la capacidad de corte deseada y el carácter de flujo (Mason, 2009). Por un lado, almidones químicamente modificados han sido empleados, como almidones de teff y maíz modificados con ácido esteárico debido a su capacidad de gelificación reducida y mayor viscosidad (Teklehaimanot et al., 2013). En ese estudio, las mahonesas con reducción de aceite en un 50% y 80%



fueron más estables a la congelación-descongelación y al almacenamiento a alta temperatura que la mahonesa con el total de grasa. Por otro lado, la adición de almidones modificados físicamente también ha sido estudiada. Lee et al. (2013) usaron almidón de arroz modificado químicamente y pregelatinizado en combinación con goma xantana como sustituto del aceite en mahonesas a niveles del 10%, 30% y 50%, manteniendo una excelente estabilidad de la emulsión hasta un 30% de sustitución. En otro tipo de emulsión aceite en agua, Bortnowska et al. (2014) estudiaron el efecto de la concentración de almidón de maíz waxy pregelatinizado en las propiedades fisicoquímicas y estabilidad de una emulsión baja en grasa (20% de aceite). En este caso, el almidón pregelatinizado también tuvo un efecto positivo en la estabilidad de la emulsión. Asimismo, almidones modificados enzimáticamente han sido propuestos como sustitutos de la grasa en mahonesas. Mun et al. (2009) emplearon una pasta de almidón de arroz tratado con la enzima 4-alfa-glucanotransferasa en combinación con goma xantana a niveles de sustitución de hasta un 50%. A pesar de que este sustituto de la grasa afectó a la reología, estabilidad y microestructura de la mahonesa, se encontraron una apariencia y propiedades reológicas similares a la mahonesa control para alguna de las combinaciones del sustituto de la grasa estudiadas.

La mayoría de los estudios realizados en mahonesas reducidas en grasa se han centrado en el comportamiento reológico de las formulaciones, ya que cualitativamente contribuye a sus características de textura (Dolz et al., 2007), las cuales son importantes para la aceptación por parte del consumidor (Liu et al., 2007). No obstante, estudios sobre las propiedades sensoriales también han sido publicados. De hecho, Wendin et al. (1997) determinaron que la textura, el olor y el sabor de las mahonesas cambian de manera distinta debido al contenido de grasa y el tipo de espesante empleado.

En general, los almidones pregelatinizados son útiles en una amplia variedad de productos debido a su relativamente alta viscosidad a bajas concentraciones en productos que tradicionalmente no implican un calentamiento (Mason & Hosenev, 1986). Los almidones pregelatinizados se pueden obtener mediante tratamientos hidrotérmicos, en los cuales el almidón se cuece, y después se seca mediante diversas técnicas como la atomización, el secado por tambor o la extrusión (Chiu & Solarek, 2009). Sin embargo, la extrusión provoca cambios en el almidón más bruscos que los métodos de cocción tradicionales, dañando una mayor cantidad de gránulos de almidón y modificando el poder espesante en frío de los almidones (Wolf, 2010).

La extrusión es un tratamiento físico en el cual un producto a base de almidón es sometido a una alta temperatura y esfuerzo mecánico con contenidos de humedad



relativamente bajos durante un corto tiempo (Camire et al., 1990). Así, este tratamiento permite modificar las propiedades funcionales de los productos a base de almidón. El alcance de estos cambios depende de la severidad del tratamiento de extrusión (Wen et al., 1990). La intensidad del tratamiento, atendiendo a la temperatura, contenido de humedad inicial y velocidad del tornillo (tiempo de residencia), modifica el comportamiento de la harina afectando a su hidratación, propiedades térmicas y propiedades de la pasta al ser sometida a un ciclo de calentamiento y enfriamiento (Martínez et al., 2014). Una mayor temperatura y contenido en humedad y una baja velocidad del tornillo producen un aumento de la temperatura de gelatinización y de la capacidad de hidratación, mientras que el pico de viscosidad y la retrogradación disminuyen.

En los tratamientos hidrotérmicos, como la extrusión, si el almidón es sometido a altas temperaturas y humedades, puede ser pregelatinizado (precocido), con un aumento del hinchamiento de los gránulos, una ruptura de la estructura de los mismos, y una pérdida de cristalinidad (Atwell et al., 1988). El almidón se hincha y espesa en contacto con agua (Chiu & Solarek, 2009) dando lugar a un incremento de la capacidad de absorción de agua en frío así como de la solubilidad (Doublier et al., 1986) adquiriendo, a su vez, una textura suave (Mason, 2009). La extrusión produce otras modificaciones estructurales en los componentes de la harina, incluyendo la desnaturalización de proteínas (Camire et al., 1990; Cheftel et al., 1995), la despolimerización de la amilosa y amilopectina mediante ruptura aleatoria de sus cadenas (Doublier et al., 1986) y asociaciones moleculares entre los componentes, tales como la formación de complejos amilosa-lípido (Hagenimana et al., 2006). Estos cambios en los constituyentes de la harina afectan a las propiedades reológicas de las pastas de harina (Chanvrier et al., 2007; Hagenimana et al., 2006). Otros efectos conseguidos con la extrusión son la reducción de la oxidación lipídica, al inactivar las enzimas responsables de la misma, y la reducción de la carga microbiana y del contenido en factores antinutricionales de los productos tratados (Camire et al., 1990). Por consiguiente, estas propiedades funcionales de la harina extrusionada pueden ser el origen de muchas aplicaciones en la industria alimentaria.

La modificación física mediante la extrusión es una manera alternativa de mejorar las propiedades de los almidones nativos sin recurrir a su modificación química (Hagenimana et al., 2006) obteniendo una etiqueta limpia o "label-friendly" (Jacobs & Delcour, 1998), más aceptable por los consumidores. A pesar de que los estudios se han centrado en la modificación de almidones, las harinas modificadas por extrusión pueden ser utilizadas en alimentos como agentes espesantes y gelificantes (Mason, 2009), permitiendo su utilización como agente sustituto de la grasa en salsas y



aderezos. Además, las harinas extrusionadas son productos más económicos y su producción tiene un menor impacto medioambiental que los almidones pregelatinizados. En la preparación de mahonesas con contenido reducido en aceite han sido empleados almidones modificados, no obstante, no existe información acerca del efecto de las harinas pregelatinizadas extrusionadas en las propiedades de estas mahonesas.

El objetivo del presente trabajo es estudiar el efecto de la incorporación de harina extrusionada como sustituta de la grasa en la elaboración de mahonesas con contenido reducido en aceite. Para ello se reemplazó el aceite en un 30%, 50% y 70% de la fórmula original utilizando una pasta de harina extrusionada y agua con ratios 1:3, 1:3.5 y 1:4. En estas mahonesas, la microscopía, propiedades reológicas, estabilidad al tiempo y a la congelación y color fueron estudiadas. La mahonesa original, con el total de aceite, se empleó como control.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1 Materiales**

La harina extrusionada de maíz amarillo (10,09% de humedad, tamaño medio de partícula 144 $\mu$ m, 6,69% de proteína, 80,67% de almidón dañado, y parámetros de color  $L^*=88,70$ ,  $a^*=1,94$  y  $b^*=25,16$ ) empleada en este estudio fue suministrada por Molendun Ingredients (Zamora, España). La harina de maíz se extruyó usando un extrusor de tornillo simple, con una relación longitud/diámetro de 20:1, modelo Bühler Basf (Bühler S.A., Uzwil, Suiza). La extrusión se realizó con una incorporación adicional de agua del 12%, a una velocidad de alimentación de la harina de 500 kg/h y velocidad de giro del tornillo del extrusor de 453rpm, alcanzándose una temperatura máxima de 160°C. El producto extruido se secó por convección de aire y se molturó con rodillos de compresión hasta un tamaño de partícula inferior a 200 micras.

Otros ingredientes utilizados en la elaboración de las mahonesas fueron aceite refinado de girasol Langosta (Faiges S.L., Daimiel, España), huevo entero líquido pasteurizado Ovpak (Álvarez Camacho, Sevilla, España), agua procedente de la red local, vinagre de vino blanco Hacendado (Sabater S.A., Cabezo de Torres, España) y sal refinada Vaccum Disal (Unión Salinera de España, Madrid, España).

### **2.2 Métodos**

#### **2.2.1 Elaboración de la mahonesa**

Todas las mahonesas se prepararon para 200 gramos de muestra. La formulación de la mahonesa empleada como control contiene aceite de girasol (65%), huevo entero pasteurizado (31%), vinagre (3,5%) y sal (0,5%). Todos los ingredientes de la mahonesa control se añadieron a la vez, adicionando en último lugar el aceite, al vaso



de plástico de la batidora modelo InfinyForce Active flow (700W) (Moulinex, Écully, France). Para conseguir una óptima homogeneización de la salsa se utilizó el accesorio mezclador (Moulinex, Écully, France) de mahonesas. La mezcla de ingredientes se agitó a velocidad turbo durante 20 segundos. Las mahonesas reducidas en grasa se prepararon reemplazando el aceite por un 30%, 50% y 70% de una pasta de harina (mezcla de harina extrusionada y agua) con tres diferentes ratios de harina-agua (1:3; 1:3,5 y 1:4). En estas muestras, la harina extrusionada y el agua se mezclaron previamente hasta la completa dispersión de la harina, y después la pasta de harina se añadió al vaso de plástico con el resto de ingredientes. Las muestras de mahonesa se transfirieron a un recipiente de plástico sellado y se almacenaron a 20°C hasta su posterior análisis. Todas las mahonesas se prepararon dos veces. La formulación de la mahonesa control y las mahonesas reducidas en aceite se exponen en la [Tabla 1](#). Las mahonesas reducidas en aceite se nombran con el porcentaje de sustitución de aceite correspondiente y un número según el ratio de la pasta harina-agua.

**Tabla 1:** Composición de la mahonesa control y las mahonesas reducidas en grasa (%) con diferente sustitución de aceite y ratios harina-agua.

| Muestra     | Aceite de girasol | Huevo entero | Vinagre | Sal | Harina extrusionada | Agua |
|-------------|-------------------|--------------|---------|-----|---------------------|------|
| Control     | 65,0              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | -                   | -    |
| 30% Sust.   |                   |              |         |     |                     |      |
| Ratio 1:3   | 45,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 4,9                 | 14,6 |
| Ratio 1:3,5 | 45,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 4,4                 | 15,1 |
| Ratio 1:4   | 45,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 3,9                 | 15,6 |
| 50% Sust.   |                   |              |         |     |                     |      |
| Ratio 1:3   | 32,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 8,1                 | 24,4 |
| Ratio 1:3,5 | 32,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 7,3                 | 25,2 |
| Ratio 1:4   | 32,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 6,5                 | 26,0 |
| 70% Sust.   |                   |              |         |     |                     |      |
| Ratio 1:3   | 19,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 11,4                | 34,1 |
| Ratio 1:3,5 | 19,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 10,2                | 35,3 |
| Ratio 1:4   | 19,5              | 31,0         | 3,5     | 0,5 | 9,1                 | 36,4 |

### 2.2.2 Microscopía óptica

Las muestras de mahonesa se examinaron utilizando un microscopio DM750 (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemania) a 1000 aumentos, equipado con una cámara EC3, y las imágenes fueron capturadas utilizando el software LAS EZ (Leica Microsystems, Wetzlar, Alemania). Primeramente, la muestra de mahonesa se depositó en un portaobjetos, y la muestra se comprimió durante 30 segundos tras colocar el cubreobjetos. Después, sobre el cubreobjetos se añadió una gota de aceite de inmersión Panreac (Panreac Química SA, Castellar del Vallés, España) para obtener las microfotografías. Las microfotografías de las mahonesas se realizaron después de 1 y 7 días a su preparación en dos puntos al azar de cada muestra.



### 2.2.3 Análisis reológicos

Las propiedades reológicas de las mahonesas se determinaron utilizando un reómetro de esfuerzo controlado Thermo Scientific Haake RheoStress1 (Thermo Fisher Scientific, Schwerte, Alemania) y un baño de agua Phoenix II P1-C25P que controla la temperatura de análisis, fijada en 20°C para todos los análisis. Todas las pruebas fueron monitorizadas con el software RheoWin 4 Job Manager y los parámetros reológicos fueron calculados utilizando el software Rheowin 4 Data Manager (Thermo Fisher Scientific, Schwerte, Alemania). Para todos los ensayos se ha utilizado una geometría de platos paralelos y una separación entre los platos de 1mm de distancia. Además, la superficie de la mahonesa expuesta al aire entre los platos, una vez ajustado el espacio entre ellos, se cubrió con aceite de vaselina Panreac (Panreac Química SA, Castellar del Vallés, España) para prevenir la pérdida de humedad. El tiempo de reposo mínimo para permitir la estabilización de la estructura antes de iniciar los ensayos se estableció en 500 segundos para todos los análisis. Los distintos ensayos reológicos fueron realizados por duplicado en cada muestra, después de 1 día (24 horas) de almacenamiento.

- **Región newtoniana**

La región newtoniana se determinó usando una geometría de platos paralelos no serrados de titanio de 35 mm de diámetro (PP35 Ti). El ensayo reológico se realizó en modo CS (*control stress*) incrementando el esfuerzo cortante desde 1 a 100 Pa, hasta que se alcanzó el estado estacionario en cada punto. El modelo de Carreau es comúnmente utilizado para describir el comportamiento de las emulsiones de aceite en agua (Batista et al., 2006; Franco et al., 1998; Moros et al., 2002;), por lo que la curva de flujo ( $R^2$  igual o superior a 0,99) se ajustó a la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\eta_0}{\left[1 + \left(\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c}\right)^2\right]^s}$$

En la ecuación de Carreau  $\eta$  (Pa·s) es la viscosidad aparente,  $\eta_0$  (Pa·s) es la viscosidad límite para la primera región newtoniana,  $\dot{\gamma}$  ( $s^{-1}$ ) es la velocidad de deformación,  $\dot{\gamma}_c$  ( $s^{-1}$ ) es la velocidad de deformación crítica para el inicio del comportamiento pseudoplástico y  $s$  (adimensional) es un parámetro relacionado con la pendiente de dicha región (Laca et al., 2010; Liu et al., 2007).

- **Comportamiento al flujo y tixotropía**

La medición de la tixotropía se llevó a cabo en modo CR (*control rate*) usando un sistema de platos paralelos PP35 Ti. Inicialmente, la velocidad de deformación se incrementó logarítmicamente desde 1 a 150,01  $s^{-1}$  en 100 s, después se mantuvo a 150,01  $s^{-1}$  durante 150 s, y finalmente se disminuyó de nuevo hasta 1  $s^{-1}$  en 100 s.



Posteriormente se determinó el lóbulo de histéresis (Pa/s) como el área comprendida entre la curva de subida y de bajada. Para caracterizar el comportamiento al flujo, los datos obtenidos en la curva de subida se ajustaron a la ecuación de Ostwald de Waele o Ley de la Potencia (Nikzade et al., 2012; Worrasinchai et al., 2010):

$$\sigma = K(Y)^n$$

donde  $\sigma$  es el esfuerzo cortante (Pa),  $Y$  la velocidad de deformación ( $s^{-1}$ ),  $K$  es el índice de consistencia ( $Pa \cdot s^n$ ) y  $n$  es el índice de comportamiento de flujo.

- **Comportamiento viscoelástico**

Las propiedades viscoelásticas de las mahonesas se determinaron usando un sistema de platos paralelos serrados de 60mm de diámetro (PP60 Ti). En primer lugar se realizó un barrido de esfuerzos de 0,1 a 10 Pa a una frecuencia de 1Hz para determinar la región viscoelástica lineal de todas las muestras. Posteriormente, se realizó un barrido de frecuencias de 10 a 0,1 Hz utilizando un valor de esfuerzo cortante comprendido en la región viscoelástica lineal, y previamente establecido en el barrido de esfuerzos. En este ensayo se obtuvieron las curvas del módulo de almacenamiento o elástico ( $G'$ ) y el módulo de pérdidas o viscoso ( $G''$ ).

El módulo  $G'$  representa la energía almacenada en el material que es recuperable por ciclo de deformación. Mientras que,  $G''$  mide la energía que se pierde a causa de la componente viscosa (Lee et al., 2013). También se obtuvo el factor de pérdidas ( $\delta = G''/G'$ ), el cual relaciona los dos módulos anteriormente mencionados. Además, los parámetros de la Bohlin se evaluaron a partir del módulo complejo ( $G^*$  en Pa) y la frecuencia ( $\omega$  en  $s^{-1}$ ), siguiendo la siguiente ecuación:

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

Según la teoría de Bohlin de flujo como un fenómeno cooperativo (Bohlin, 1980), las emulsiones se modelan como una red de unidades reológicas, que interactúan estableciendo la estructura del sistema. El número de coordinación  $z$  (adimensional) es una medida del número de unidades reológicas correlacionadas entre sí dentro de la estructura del sistema, mientras que el parámetro  $A$  ( $G^*$  a 1Hz en  $Pa \cdot s^{1/z}$ ) es el coeficiente de proporcionalidad, relacionado con la fuerza de las interacciones entre esas unidades (Mancini et al., 2002; Manoi & Rizvi, 2009).

#### **2.2.4 Estabilidad de la emulsión y estabilidad a la congelación-descongelación**

La medición de la estabilidad de la emulsión con el tiempo y a la congelación-descongelación se realizó al menos dos veces. La estabilidad de la emulsión de las distintas mahonesas se determinó siguiendo el método de Mun et al. (2009) con leves modificaciones. Las mahonesas, tras 1 y 7 días de almacenamiento a 20°C, fueron pesadas ( $F_0 = 15,00 \pm 0,01g$ ) y colocadas en tubos falcon de 50mL de capacidad,



después se introdujeron en una cámara a 80°C durante 30 minutos para provocar la desestabilización. Las muestras calentadas se centrifugaron durante 10 minutos a 4000x g, y la capa de sobrenadante fue separada y pesada (F<sub>1</sub>). La estabilidad de la emulsión se caracterizó según se expone a continuación:

$$\text{Estabilidad de la emulsión} = (F_1 / F_0) \times 100$$

La estabilidad a la congelación-descongelación de las mahonesas después de su almacenamiento en congelación a -40°C durante 24 horas se midió y caracterizó siguiendo el método de la estabilidad de la emulsión anteriormente descrito.

### 2.2.5 Color de las mahonesas

El color de las mahonesas se obtuvo al día 1 utilizando un espectrofotómetro Minolta CN-508i (Minolta, Co. LTD, Tokio, Japón). Antes de realizar las mediciones se calibró con un blanco (L\* = 98,92, a\* = -0,11 y b\* = -0,30). Los resultados se obtuvieron usando un iluminador estándar D<sub>65</sub> y observador estándar 2° y se expresaron en el espacio de color CIE L\*a\*b\*. La medición del color se realizó 5 veces en 2 puntos de cada mahonesa. En el sistema de color CIE L\*a\*b\*, el parámetro L\* (0-100) representa la luminosidad, mientras que a\* y b\* son las coordenadas cromáticas (-60, +60), donde +a\* es la coordenada de color rojo, -a la verde, +b es la coordenada de color amarillo, y -b es el azul. La diferencia de color total ( $\Delta E$ ) de las mahonesas reducidas en grasa con respecto de la mahonesa control se calculó utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta E = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2}$$

Donde:  $\Delta L^*$ ,  $\Delta a^*$  y  $\Delta b^*$  son las diferencias de color parciales entre cada uno de los parámetros de color.

### 2.2.6 Análisis estadístico

Los datos obtenidos se han analizado utilizando un análisis de la varianza unidireccional (ANOVA) mediante el test LSD de Fisher ( $p < 0,05$ ). Antes de realizar el ANOVA de los datos se ha verificado la normalidad de los mismos mediante el test de bondad de ajuste específico de la normalidad Shapiro-Wilks. Además, se han realizado correlaciones de Pearson entre todas las variables estudiadas a través de un análisis multivariado para observar la existencia de posibles relaciones lineales entre ellas. Todos los análisis se han llevado a cabo usando el software Statgraphics Centurion XVI (StatPoint Technologies Inc, Warrenton, EEUU).

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Microfotografías

Las mahonesas consisten en gotas de aceite (fase dispersa) diseminadas en un medio acuoso (fase continua) (McClements & Demetriades, 1998), cuyas propiedades pueden variar de unas formulaciones a otras según la composición y microestructura



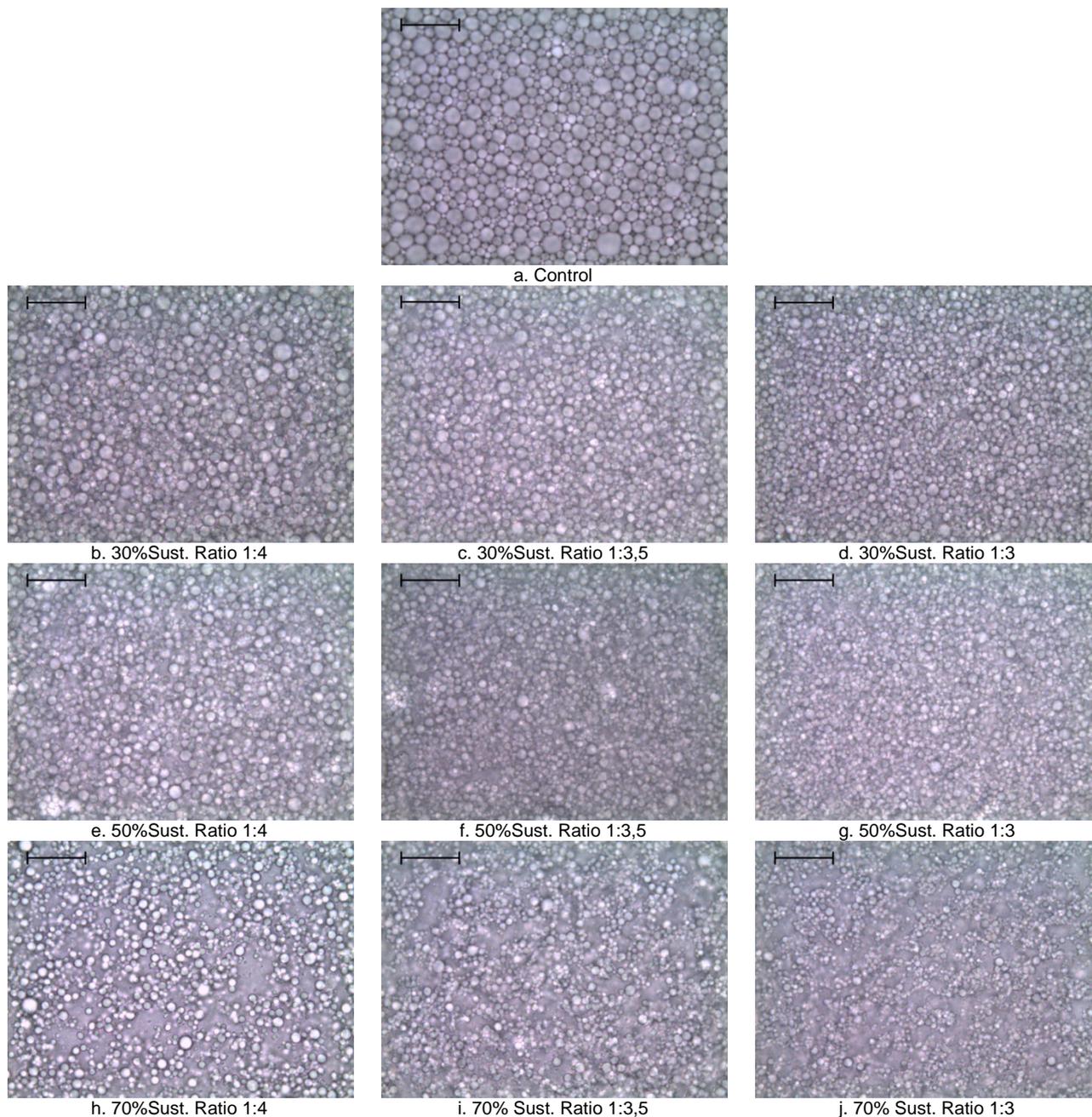
(Mun et al., 2009). Factores tales como la cantidad y distribución del agente emulgente, la cantidad de aceite, el tamaño de las gotas de aceite y la viscosidad de la fase acuosa son parámetros determinantes a la hora de determinar la microestructura de la mahonesa (Ma & Boye, 2013; Mun et al., 2009).

La microscopía óptica se empleó para proporcionar información acerca de la microestructura de las distintas muestras de mahonesa (Figura 1 y 2). La mahonesa control, a las 24 horas de su elaboración, mostró una estructura definida y estrechamente empaquetada, con gotas de aceite diferentes en tamaño (polidispersa). En esa estructura los glóbulos pequeños aparecen adecuadamente distribuidos para crear la estructura compacta, llenando los espacios entre los glóbulos grandes. Sin embargo, a medida que se sustituye el aceite y aumenta la proporción de la fase acuosa se observan gotas de aceite de menor tamaño y más uniformes y con una estructura más suelta (Figura 1). Estas observaciones coinciden con lo encontrado por Teklehaimanot et al. (2013) y Mun et al. (2009) para mahonesas en las que se reemplazó el aceite por almidones modificados química y enzimáticamente, respectivamente, las cuales mostraban glóbulos de grasa más pequeños en comparación con la muestra control.

Al aumentar el nivel de sustitución de aceite se aprecian zonas huecas ocupadas por la fase acuosa, en las que no aparecen gotas de aceite. Este efecto se observa principalmente en las muestras del 70% de sustitución de aceite como resultado de la drástica reducción del aceite, donde los glóbulos grasos aparecen dispersos en una fase acuosa que ocupa espacios más amplios. Por lo general, un descenso de la proporción de aceite en la mahonesa reduce la densidad de las gotas de aceite (Depree & Savage, 2001) y aumenta la distancia media entre ellas (Ma & Barbosa-Cánovas, 1995b). A su vez, respecto a estos huecos formados, Worrasinchai et al. (2006) elaborando mahonesas con menor contenido en aceite (50% y 75%) a partir de  $\beta$ -glucanos ya encontraron unas estructuras relativamente más abiertas y sueltas que la control, cuyas gotas estaban agregadas y con huecos de fase acuosa, de dimensiones variables, más inter-espaciados. Li et al. (2014) también encontraron resultados similares para rangos de sustitución entre el 30-60%, debido a que la presencia del sustituto de la grasa (gel de konjac micronizado) hizo que las partículas grasas de la mahonesa aparecieran gradualmente más separadas y agrupadas en regiones, observándose grandes espacios.

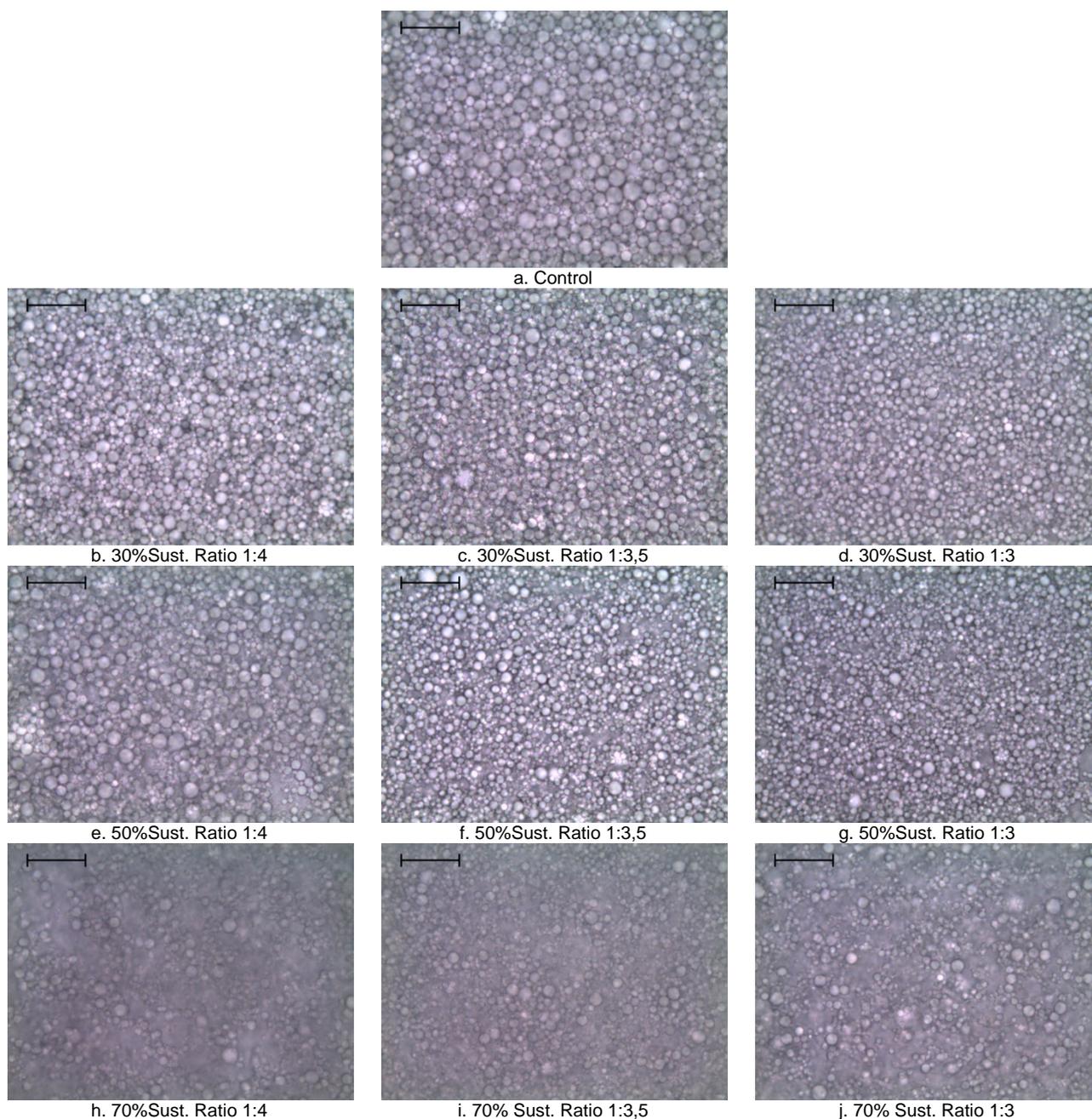
Para cada uno de los niveles de sustitución del aceite se observa que a medida que disminuye el contenido en agua de la pasta aparecen gotas de aceite más pequeñas. La mayor viscosidad de la fase continua al aumentar la cantidad del agente espesante puede provocar un menor movimiento y por tanto, interacción de los glóbulos de aceite

que evitan que estas partículas se unan entre sí, aumentando su tamaño (Manoj et al., 1998; McClements & Demetriades, 1998).



**Figura 1:** Mahonesa control y mahonesas reducidas en grasa al día 1. La barra que aparece en la parte superior izquierda de cada fotografía indica un tamaño de 20  $\mu\text{m}$ .

En la [Figura 2](#), se muestra la microscopía de las mahonesas tras 7 días de almacenamiento. Con el tiempo de almacenamiento, la mahonesa control y las mahonesas del 30% de sustitución apenas experimentan cambios perceptibles. No obstante, cambios más evidentes aparecen cuando se aumenta la sustitución de aceite a niveles del 50% y 70%, puesto que los glóbulos grasos han aumentado ligeramente su tamaño y han aparecido mayores huecos en la fase acuosa.



**Figura 2:** Mahonesa control y mahonesas reducidas en grasa al día 7. La barra que aparece en la parte superior izquierda de cada fotografía indica un tamaño de 20  $\mu\text{m}$ .

### 3.2 Región newtoniana

El comportamiento de flujo de las mahonesas a bajas velocidades de deformación (región newtoniana) se ha caracterizado mediante el modelo de Carreau. Estas bajas deformaciones son similares a las producidas en el transporte y almacenamiento de estos productos (Izidoro et al., 2008). Todas las mahonesas estudiadas mostraron un comportamiento pseudoplástico, caracterizado por una disminución de la viscosidad aparente a medida que aumenta la velocidad de deformación (Bortnowska et al., 2014). No obstante, cuando se aplican velocidades de deformación muy bajas aparece una viscosidad límite ( $\eta_0$ ) constante, indicando que a esas bajas velocidades de



deformación la emulsión manifiesta un comportamiento newtoniano. Este comportamiento ya ha sido previamente descrito por distintos autores en emulsiones de aceite en agua (Batista et al, 2006; Franco et al., 1998, 2000; Laca et al., 2010).

Los valores para los parámetros de la ecuación de Carreau se exponen en la [Tabla 2](#). En general, la viscosidad límite  $\eta_0$  tiende a aumentar a medida que la concentración de agua en la pasta disminuye, pero sólo se observan diferencias significativas en los niveles de sustitución mayores (50% y 70%) entre el ratio 1:3 y el resto. Esta tendencia está motivada por la reducción de viscosidad que se produce en la fase continua de la emulsión al incrementar el contenido de agua. Respecto al nivel de sustitución de aceite no se observan diferencias significativas de los ratios 1:4 y 1:3,5 al aumentar la sustitución, sin embargo, para el ratio 1:3 se observa como la mahonesa del mayor nivel de sustitución (70%) es la que mayor  $\eta_0$  posee, sin que se observen diferencias entre las del 30% y 50%. En un estudio similar, Moros et al. (2002) observaron un incremento de la viscosidad límite a medida que se redujo el nivel de colesterol en mahonesas, debido a la acción de agentes tensioactivos y al menor tamaño de las gotas de grasa. En otro estudio con rebozados, Kim et al. (2009) sustituyendo harina de trigo por harina de arroz modificada hidrotérmicamente encontraron que un aumento de la concentración de la harina modificada también producía un claro incremento de la viscosidad límite.

Por otro lado, la velocidad de deformación crítica  $Y_c$ , marca el límite entre el comportamiento newtoniano y pseudoplástico. A velocidades de deformación superiores a  $Y_c$  aparece el comportamiento pseudoplástico consecuencia del colapso/ruptura estructural inducido por la acción de la cizalla, relacionado con un mecanismo de desfloculación de las gotas de aceite (Franco et al., 1998, 2000) que provoca una disminución de la resistencia al flujo. Así, un menor valor de  $Y_c$  indica una menor resistencia de la microestructura de la emulsión a la ruptura inducida por el proceso de cizalla (Moros et al., 2002). En este estudio, los menores valores de  $Y_c$  se alcanzan en las mahonesas reducidas en grasa con el ratio 1:3, y en la mahonesa control, sin diferencias significativas entre ellas. En estas muestras la región newtoniana es más estrecha que en el resto de muestras, ya que la velocidad de deformación crítica es casi un orden menor de magnitud. La  $Y_c$  disminuye de forma significativa con la disminución de la concentración de agua en la pasta harina-agua, exceptuando en el ratio 1:3 y 1:3,5 del 50% sin diferencias entre ellas. Además, a medida que aumenta la sustitución de aceite, disminuye  $Y_c$ , aunque esta bajada es más evidente a medida que se aumenta la concentración de agua en la pasta (ratio 1:4), con diferencias entre todos los niveles. Una disminución de la velocidad de



deformación crítica está relacionada con una mayor sensibilidad a la cizalla en las emulsiones más estructuradas (Raymundo et al., 2002).

En cuanto al valor del índice  $s$ , que da cuenta del carácter pseudoplástico (Batista et al., 2006), no se observa una tendencia clara. En general, no existen diferencias significativas en cuanto al ratio harina-agua de la pasta dentro de los distintos niveles de sustitución, únicamente encontrándose estas para el ratio 1:3 y 1:3,5 con respecto al 1:4 del nivel de sustitución del 30%. Además, tampoco se observa una tendencia clara entre los distintos niveles de sustitución. Como se observa en la [Tabla 2](#), todas las emulsiones presentan un comportamiento similar, con un valor de  $s$  comprendido entre 0,383-0,447. Estos valores están de acuerdo con los obtenidos en otras emulsiones que contienen gomas y/o almidón modificado (Dolz et al., 2007; Raymundo et al., 2002).

**Tabla 2:** Parámetros del modelo de Carreau para la mahonesa control y reducidas en grasa

| Muestra     | $\eta_0$ (Pa·s)    | $Y_c$ (s <sup>-1</sup> ) | $s$                   |
|-------------|--------------------|--------------------------|-----------------------|
|             | Media $\pm$ SD     | Media $\pm$ SD           | Media $\pm$ SD        |
| Control     | 4166cd $\pm$ 214   | 0,0085ab $\pm$ 0,0013    | 0,405abc $\pm$ 0,021  |
| 30% Sust.   |                    |                          |                       |
| Ratio 1:3   | 2933abcd $\pm$ 652 | 0,0102abc $\pm$ 0,0032   | 0,383a $\pm$ 0,010    |
| Ratio 1:3,5 | 1284ab $\pm$ 293   | 0,0208de $\pm$ 0,0051    | 0,394ab $\pm$ 0,009   |
| Ratio 1:4   | 736a $\pm$ 141     | 0,0412g $\pm$ 0,0075     | 0,439de $\pm$ 0,036   |
| 50% Sust.   |                    |                          |                       |
| Ratio 1:3   | 5101d $\pm$ 139    | 0,0113abc $\pm$ 0,0013   | 0,437de $\pm$ 0,011   |
| Ratio 1:3,5 | 2508abcd $\pm$ 863 | 0,0160cd $\pm$ 0,0052    | 0,417bcd $\pm$ 0,008  |
| Ratio 1:4   | 946ab $\pm$ 244    | 0,0322f $\pm$ 0,0081     | 0,433cde $\pm$ 0,026  |
| 70% Sust.   |                    |                          |                       |
| Ratio 1:3   | 11150e $\pm$ 5528  | 0,0061a $\pm$ 0,0019     | 0,420bcde $\pm$ 0,028 |
| Ratio 1:3,5 | 3551bcd $\pm$ 824  | 0,0134bc $\pm$ 0,0037    | 0,445de $\pm$ 0,014   |
| Ratio 1:4   | 1341abc $\pm$ 61   | 0,0233e $\pm$ 0,0037     | 0,447e $\pm$ 0,010    |

Valores medios  $\pm$  SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes con un  $p \leq 0,05$ .  $\eta_0$ = viscosidad límite,  $Y_c$ = velocidad de deformación crítica,  $s$ =pendiente.

Los parámetros de Carreau,  $\eta_0$  y  $Y_c$  claramente dependen de la composición de la mahonesa, mientras que el parámetro  $s$  parece ser más independiente de la composición. Un aumento de  $\eta_0$  y una disminución de  $Y_c$  se observan cuanto menor es la concentración de agua en la pasta y mayor la reducción de aceite. La mayor viscosidad límite da lugar a emulsiones más estables a deformaciones/esfuerzos cortantes bajos. Sin embargo, a pesar de la mayor viscosidad, las reorganizaciones estructurales (desfloculación) para estas mahonesas como resultado de un esfuerzo cortante suceden a valores de esfuerzos más bajos, consecuencia de una menor velocidad de deformación crítica. Estos cambios suceden sin apreciarse drásticas variaciones en el carácter pseudoplástico de las mahonesas. El aumento de la viscosidad crítica y la más rápida aparición del comportamiento pseudoplástico pueden



estar asociados al menor tamaño de las gotas de aceite observados en la microscopía de las mahonesas bajas en grasa. De hecho, Pal (1996) indicó que una mayor viscosidad y mayor carácter pseudoplástico es alcanzado en las emulsiones cuanto menor es el tamaño de partícula de las gotas de aceite.

En definitiva, según los parámetros de Carreau, se pueden conseguir mahonesas muy similares a la mahonesa control, incluso en los mayores niveles de sustitución, siempre que el porcentaje de agua en la pasta de harina extrusionada sea bajo.

### 3.3 Comportamiento al flujo y tixotropía

Para caracterizar el comportamiento al flujo de las muestras de mahonesa, las curvas de flujo obtenidas se ajustaron a la ecuación de Ostwald de Waele cuyos parámetros aparecen en la [Tabla 3](#).

El índice de consistencia (K) da cuenta de la naturaleza viscosa del producto. Un alto valor de K de la emulsión indica unas características viscosas más pronunciadas, que se corresponden con una red estructural más fuerte de la muestra (Ma & Boye, 2013). Como se muestra en la [Tabla 3](#), en las mahonesas reducidas en grasa se observa una clara tendencia a aumentar K a medida que disminuye la cantidad de agua de la pasta de harina extrusionada. Esto puede deberse a un aumento de la viscosidad de la fase continua. Las sustancias almidonosas empleadas como sustitutas de la grasa interactúan con el agua debido a su naturaleza hidrofílica y forman una estructura con múltiples entrecruzamientos aumentando la viscosidad (Mason & Hosney, 1986; Teklehaimanot et al., 2013). Además, a pesar de no encontrarse diferencias significativas entre los distintos niveles de sustitución para el ratio 1:4, para los ratios 1:3 y 1:3,5 se observa un aumento de K con la reducción del aceite. No se observan diferencias de la mahonesa control con las mahonesas del ratio 1:3 de los niveles de sustitución del 30% y 50% y del ratio 1:3,5 del 70%. El mayor valor del índice es alcanzando por la muestra del 70% de sustitución con el ratio 1:3, la cual también poseía la mayor viscosidad límite  $\eta_0$ . De hecho, el índice de consistencia se correlaciona positivamente ( $r=0,84$  y  $p<0,001$ ) con la  $\eta_0$  de la región pseudoplástica, previamente descrito en Carreau y que también da cuenta de la estabilidad.

El índice de comportamiento de flujo (n), de todas las mahonesas estudiadas es menor que uno, confirmando la existencia del comportamiento pseudoplástico previamente descrito. Una disminución de n da cuenta de un aumento del carácter pseudoplástico de las muestras, lo que indica que mayores reestructuraciones se forman en la emulsión (Ma & Boye, 2013). El comportamiento pseudoplástico resulta beneficioso para las cualidades organolépticas de las emulsiones, por ejemplo, en la liberación de sabor y sensación en boca (Ma & Boye, 2013), además, mejora la capacidad de



mezcla y fluidez de estos productos (Gamonpilas et al., 2011). Todas las mahonesas estudiadas presentan valores de  $n$  muy bajos, y por tanto, un carácter muy pseudoplástico. En general, no se observan diferencias significativas entre las mahonesas reducidas en grasa y la muestra control, con la excepción de las del 30% de sustitución para los ratios 1:3,5 y 1:4 con mayores valores de  $n$  y la muestra del 70% de sustitución con el ratio 1:3, con el menor  $n$  y mayor carácter pseudoplástico. Un aumento de la concentración de agua en la pasta aumenta el valor de  $n$ , aunque sólo se pueden afirmar diferencias significativas entre los ratios extremos.

**Tabla 3:** Ley de la potencia y lóbulo de histéresis para la mahonesa control y reducidas en grasa

| Muestra     | K (Pa·s <sup>n</sup> ) | n              | Lóbulo de histéresis (Pa/s) |
|-------------|------------------------|----------------|-----------------------------|
|             | Media ± SD             | Media ± SD     | Media ± SD                  |
| Control     | 78,63de ±7,57          | 0,213bc ±0,019 | 6739bc ±2045                |
| 30% Sust.   |                        |                |                             |
| Ratio 1:3   | 73,13cd ±2,22          | 0,220bc ±0,004 | 7552cd ±2200                |
| Ratio 1:3,5 | 52,52b ±3,27           | 0,241d ±0,006  | 5301ab ±554                 |
| Ratio 1:4   | 42,25a ±7,31           | 0,239d ±0,017  | 4081a ±746                  |
| 50% Sust.   |                        |                |                             |
| Ratio 1:3   | 86,79e ±3,77           | 0,207ab ±0,005 | 11615,ef ±1571              |
| Ratio 1:3,5 | 67,22c ±0,87           | 0,214bc ±0,004 | 7668cd ±2169                |
| Ratio 1:4   | 39,65a ±1,98           | 0,227cd ±0,012 | 5114ab ±504                 |
| 70% Sust.   |                        |                |                             |
| Ratio 1:3   | 111,73f ±16,91         | 0,197a ±0,004  | 13085f ±1569                |
| Ratio 1:3,5 | 76,56cd ±1,77          | 0,206ab ±0,013 | 9526de ±1834                |
| Ratio 1:4   | 43,13ab ±5,84          | 0,224c ±0,008  | 6374bc ±770                 |

Valores medios ± SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes con un  $p \leq 0,05$ . K= índice de consistencia; n= índice de comportamiento.

A la vista de estos resultados parece obvio que una baja concentración de agua en la pasta de harina extrusionada afecta positivamente a los parámetros de flujo de las mahonesas, puesto que aumenta el índice de consistencia, dando lugar a una estructura fuerte, aumentando ligeramente el carácter pseudoplástico de la emulsión. Mun et al. (2009) sustituyeron un 50% del aceite de la mahonesa por una pasta de almidón de arroz modificado enzimáticamente con distintas concentraciones, y observaron que una mayor concentración de la pasta aumentaba el índice de consistencia y disminuía la  $n$ , lo que coincide con lo observado en este estudio. Este aumento de K lo atribuyeron al distinto volumen de la fase continua entre la mahonesa control y las mahonesas reducidas en grasa, lo que fortalecería la estructura mediante un mecanismo distinto al que se produce en la mahonesa control. Contrariamente a estos resultados, Lee et al. (2013) al remplazar el aceite en un 10%, 30% y 50% por una pasta de almidón de arroz pregelatinizado y goma xantana encontraron una disminución de K y un aumento  $n$  con la sustitución del aceite. Estos resultados fueron



atribuidos a la ruptura de la estructura provocada por la debilidad de la pasta de almidón, que ocasionó la liberación del agua de la formulación. Las diferencias con lo observado en nuestro estudio pueden deberse al hecho de que en este estudio se utilizó un almidón modificado químicamente, lo que cambia la estructura y propiedades funcionales del mismo, o a qué en el mismo estudio la relación almidón-agua utilizada para sustituir el aceite fue mayor de 1:10, muy superior a la de nuestro estudio.

La dependencia del comportamiento de flujo con el tiempo también se observa en la [Tabla 3](#). Todas las muestras de mahonesas exhibieron un comportamiento tixotrópico en el rango de deformaciones estudiado. El área del lóbulo de histéresis cuantifica la tixotropía, es decir, la disminución de la viscosidad conforme aumenta el tiempo al aplicar una misma velocidad de deformación (Worrasinchai et al., 2006). Un mayor nivel de tixotropía indica una progresiva ruptura de la estructura de los productos a medida que el tiempo de aplicación de un esfuerzo cortante se incrementa (Abu-Jdayil, 2003). Por tanto, cuanto mayor el lóbulo de histéresis, mayor es la inestabilidad con el tiempo y es necesario un mayor tiempo para reconstruir la estructura dañada después de la eliminación de la fuerza de cizalla (Laca et al., 2010). La mahonesa control presenta una tixotropía intermedia entre todas las mahonesas estudiadas. De forma general, la tixotropía aumenta, y con ella la inestabilidad, a medida que la concentración en agua en la pasta es menor dentro de un mismo nivel de sustitución de aceite. En cuanto al grado de sustitución, no se observan diferencias significativas entre los niveles del 50% y 70% para ninguno de los ratios harina-agua. Sin embargo, las mahonesas con el 30% de sustitución presentan una menor tixotropía que las del 50% y 70% para los ratios 1:3 y 1:3,5, siendo, por tanto, más estables. Teklehaimanot et al. (2013), empleando almidones modificados químicamente como sustitutos de la grasa (50% y 80%) en mahonesas, observaron un incremento del área del lóbulo de histéresis con el nivel de reducción de aceite, esto coincide con las diferencias observadas entre las mahonesas del 30% y los dos niveles de mayor sustitución (50% y 70%) en este estudio. Estos autores también observaron que la muestra con mayor K, resultó ser la del nivel de sustitución del 80%, la cual presentó el mayor lóbulo de histéresis. Así mismo, en este estudio la mahonesa con mayor sustitución (70% de sustitución, ratio 1:3) presentó los mayores valores de K y de tixotropía.

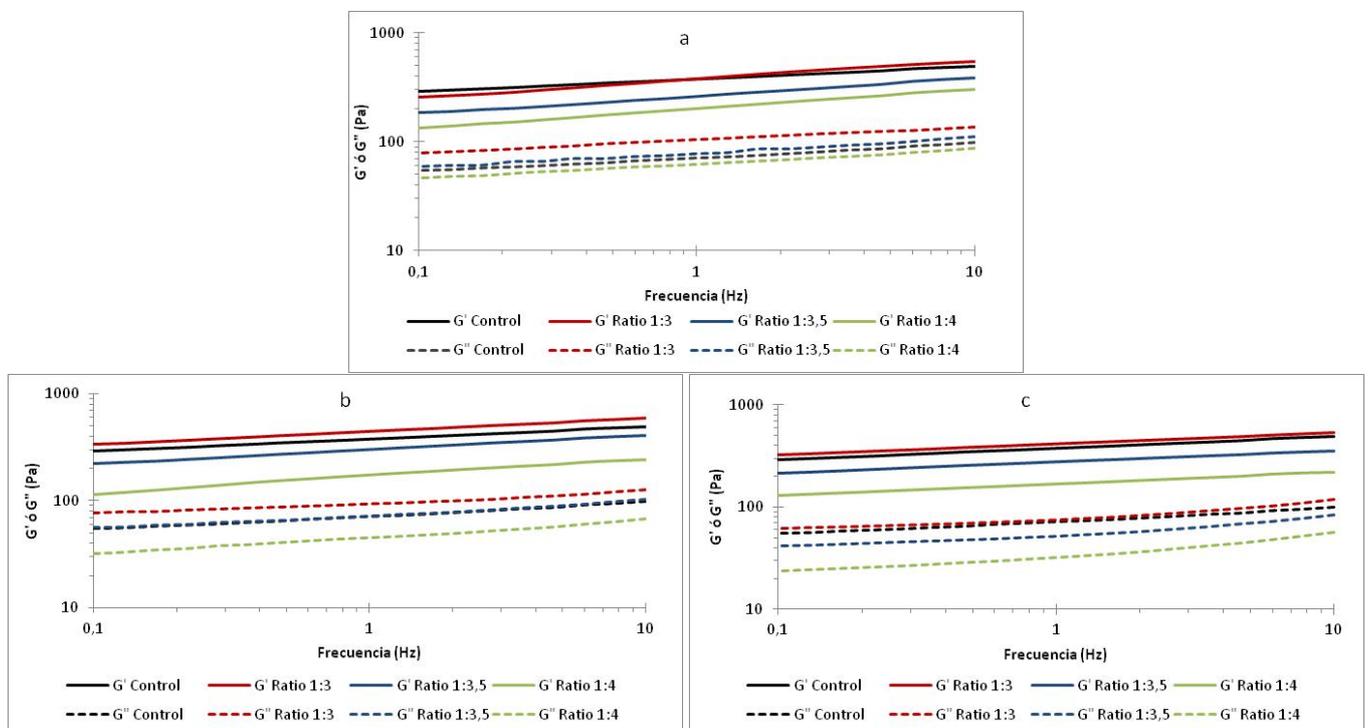
#### **3.4 Comportamiento viscoelástico y parámetros de Bohlin**

El carácter viscoelástico de las mahonesas se expone en las [Figuras 3 y 4](#). Los módulos  $G'$  y  $G''$  representan la energía recuperable y perdida, respectivamente, cuando el material se somete a deformación. En la [Figura 3](#) se observa que todas las mahonesas resultaron ser más elásticas ( $G'$ ) que viscosas ( $G''$ ) en el rango de

frecuencias estudiado. En todas las mahonesas a medida que se incrementa la frecuencia se observa un gradual incremento de  $G'$  y  $G''$ . Esta tendencia también ha sido observada por otros autores en rangos de frecuencia similares (Mun et al., 2009; Laca et al., 2010).

Por lo general,  $G'$  y  $G''$ , para los tres niveles de sustitución estudiados, aumentan a medida que disminuye la concentración de agua en la pasta. Este aumento sugiere una mayor interacción entre los componentes estructurales de la emulsión como consecuencia del almidón pregelatinizado presente en la harina extrusionada. Una tendencia similar fue encontrada por Bortnowska et al. (2014), con el aumento de la concentración de almidón de maíz waxy pregelatinizado en mahonesas reducidas en grasa. En ambos módulos, las mahonesas con el ratio 1:4, con mayor contenido en agua, muestran el comportamiento más alejado a la mahonesa control.

En general, se espera que las mahonesas con mayor contenido en aceite muestren un mayor valor de  $G'$  y  $G''$ , como resultado del mayor empaquetamiento de las gotas en la emulsión (Ma & Barbosa-Cánovas, 1995b; Sun & Gunasekaran, 2009; Lee et al., 2013). Sin embargo, en este estudio se observan leves diferencias de los módulos con la reducción del contenido en aceite, mientras que la concentración de la pasta de harina extrusionada parece ser el principal factor que afecta al valor de los módulos elástico y viscoso de las mahonesas.



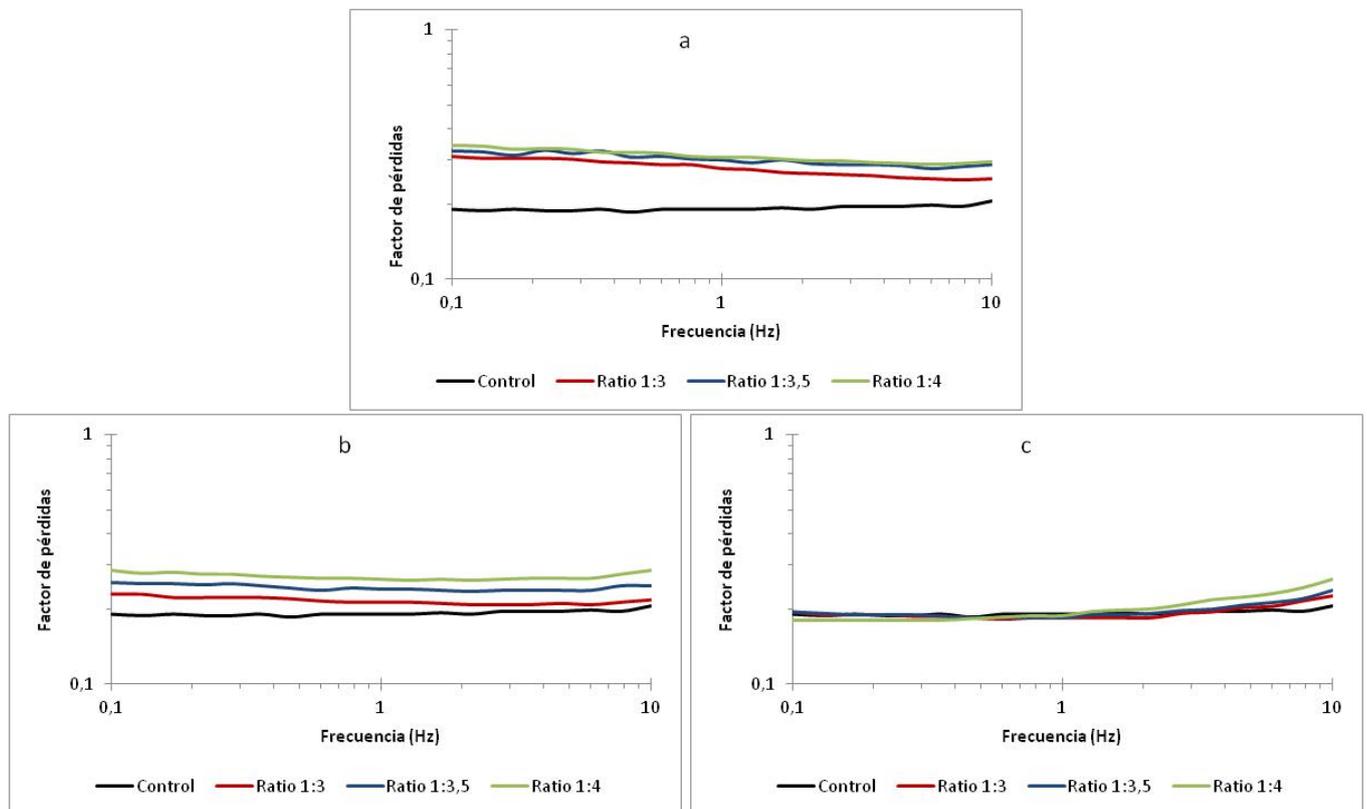
**Figura 3:** Efecto de la frecuencia en el módulo de almacenamiento ( $G'$ ) y de pérdidas ( $G''$ ) de las distintas mahonesas. a. Muestras control y 30% de sustitución de aceite, b. Muestras control y 50% de sustitución de aceite, c. Muestras control y 70% de sustitución de aceite.



El factor de pérdidas ( $\tan \delta$ ) que relaciona los módulos  $G'$  y  $G''$  se expone en la [Figura 4](#). Este factor es una medida que compara la cantidad de energía perdida frente a la cantidad de energía almacenada durante un tiempo, es decir, indica si son las propiedades elásticas o las viscosas las que predominan (Ma & Barbosa-Cánovas, 1995b). En el rango de frecuencias estudiado, estas emulsiones se comportan como un sólido, con valores del factor mayores de 0,1, típico de aderezos y mahonesas (Li et al., 2014). La magnitud del factor de pérdidas de las mahonesas reducidas en grasa va disminuyendo a medida que se aumenta el nivel de sustitución, mostrando mayor carácter elástico (Manoi & Rizvi, 2009; Zaidel et al., 2013). Además, las diferencias de dicho factor con respecto a la mahonesa control se van haciendo menos perceptibles a medida que se aumenta la sustitución del aceite, no obteniéndose prácticamente diferencias en la viscoelasticidad en el nivel de sustitución del 70% para ninguno de los tres ratios de la pasta. En cuanto al ratio harina-agua, la magnitud del factor de pérdidas es menor cuanto menor es la concentración de agua en la pasta, para los niveles de sustitución del 30% y 50%, sin encontrarse diferencias en el caso del 70%. De hecho, Bortnowska et al. (2014) también observaron que cuanto mayor era la concentración de almidón de maíz waxy pregelatinizado en la mahonesa reducida en grasa menor fue el valor de este factor.

Los resultados en cuanto al factor de pérdidas para las mahonesas bajas en grasa están de acuerdo con la microscopía de las mahonesas. Cuanto menor es el tamaño de las gotas de grasa, menor es el factor de pérdidas. Esta tendencia ya fue observada por Worrasinchai et al. (2006), los cuales al sustituir la grasa por  $\beta$ -glucanos en mahonesas encontraron una correlación entre el menor tamaño de las gotas de grasa y el menor factor de pérdidas. Sin embargo, para la mahonesa control no se cumple esta tendencia, lo que parece indicar que no sólo el tamaño de las gotas de aceite influye en el carácter viscoelástico de la emulsión. Este fenómeno podría explicarse por el hecho de que las diferencias en el factor de pérdidas también pueden verse afectadas por la diferente estructura de la emulsión (Ma & Barbosa-Cánovas, 1995b), es decir, si es la fase dispersa o la continua la que predomina en la emulsión. En la mahonesa control, el mayor volumen y empaquetamiento de las gotas de la fase dispersa también contribuyen a la interacción entre las partículas, y la fase continua queda atrapada entre los glóbulos (McClements & Demetriades, 1998). Así, a mayor porcentaje de sustitución del aceite menor cantidad de gotas de grasa formando la fase dispersa, adquiriendo la fase continua, formada principalmente por partículas de harina extrusionada con almidón gelatinizado, un mayor protagonismo. Por tanto, las interacciones de la pasta de harina extrusionada con las gotas se hacen más fuertes. Diferentes tipos de interacciones moleculares se forman en la mahonesa, tales como

proteína-polisacárido o polisacárido-lípido, las cuales también modifican el comportamiento viscoelástico de la mahonesa (Li et al., 2014). Así, en las mahonesas con el 70% de sustitución de aceite se alcanzan interacciones moleculares prácticamente iguales a las de la muestra control, aunque debido a la distinta naturaleza de sus fases, el mecanismo es distinto.



**Figura 4:** Efecto de la frecuencia en el factor de pérdidas ( $\tan \delta$ ) de las distintas mahonesas. a. Muestras control y 30% de sustitución de aceite, b. Muestras control y 50% de sustitución de aceite, c. Muestras control y 70% de sustitución de aceite.

Los parámetros A y z de la ecuación de Bohlin obtenidos del ensayo oscilatorio aparecen recogidos en la [Tabla 4](#). Estos dos parámetros proporcionan información acerca de la estabilidad de la emulsión. Unos bajos valores de A y z reflejan una tendencia a coalescer de las gotas dispersadas cuando el sistema se somete a estrés mecánico (Peressini et al., 1998).

El parámetro A aumenta a medida que desciende la cantidad de agua en la mezcla con harina extrusionada, independientemente del nivel de sustitución, por lo que la proporción de harina-agua en este tipo de salsa tiene una gran influencia en este parámetro. En todos los porcentajes de sustitución, las mahonesas con un ratio harina-agua superior al 1:3,5 presentan un menor valor de A que el control. Por el contrario con el ratio 1:3 no se detectan diferencias significativas frente al control en el 30% de sustitución, mientras que a mayores niveles de sustitución se aprecian mayores valores de A. El parámetro A, indica la fuerza de las interacciones y se correlaciona positivamente ( $r=0,85$  y  $p<0,001$ ) con el índice de consistencia del ensayo de flujo,



parámetro que también da cuenta de una red estructural más fuerte. A su vez, A se correlaciona con los módulos  $G'$  y  $G''$ , con coeficientes de correlación de 1,00 y 0,84, respectivamente y un nivel de confianza del 99,9%. Así, las muestras con mayores módulos elásticos y viscosos, son, por lo general, las muestras con mayor fuerza en las interacciones. Acorde a estos resultados, Zaidel et al. (2013) también encontraron una correlación entre el parámetro A y el módulo  $G'$  en la elaboración de mahonesas estabilizadas con pectinas gelatinizadas enzimáticamente.

**Tabla 4:** Parámetros de Bohlin para la mahonesa control y reducidas en grasa

| Muestra     | A ( $\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/2}$ ) | z                 |
|-------------|--------------------------------------|-------------------|
|             | Media $\pm$ SD                       | Media $\pm$ SD    |
| Control     | 384,40d $\pm$ 20,88                  | 8,79de $\pm$ 0,45 |
| 30% Sust.   |                                      |                   |
| Ratio 1:3   | 389,23de $\pm$ 59,27                 | 5,97a $\pm$ 0,19  |
| Ratio 1:3,5 | 274,95c $\pm$ 10,39                  | 6,00a $\pm$ 0,33  |
| Ratio 1:4   | 211,30b $\pm$ 9,36                   | 5,80a $\pm$ 0,25  |
| 50% Sust.   |                                      |                   |
| Ratio 1:3   | 453,15f $\pm$ 21,11                  | 8,15cd $\pm$ 0,76 |
| Ratio 1:3,5 | 310,38c $\pm$ 36,19                  | 7,28bc $\pm$ 0,76 |
| Ratio 1:4   | 176,50ab $\pm$ 12,44                 | 6,37ab $\pm$ 0,63 |
| 70% Sust.   |                                      |                   |
| Ratio 1:3   | 422,10ef $\pm$ 8,43                  | 9,31e $\pm$ 1,31  |
| Ratio 1:3,5 | 283,25c $\pm$ 21,43                  | 8,91de $\pm$ 1,05 |
| Ratio 1:4   | 172,23a $\pm$ 12,28                  | 8,66de $\pm$ 0,54 |

Valores medios  $\pm$  SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes con un  $p \leq 0,05$ . A= coeficiente de proporcionalidad, z= número de coordinación.

Al contrario de lo que ocurre con el parámetro A, el valor de z, que indica el nivel de interacciones, se encuentra más influenciado por el nivel de sustitución que por el ratio harina-agua. Así, a medida que se incrementa el nivel de sustitución se incrementa el valor de z para todos los ratios harina-agua, mientras que apenas se observan diferencias en función del ratio harina-agua para cada uno de los niveles de sustitución. Sorprende el hecho de que las mahonesas con menor sustitución sean las que más diferencias presentan frente al control. Esto puede deberse a un cambio en el modelo estructural de las mismas que reduce su estabilidad en sus fases iniciales, pero que la recupera cuando se incrementa el porcentaje de la pasta harina-agua utilizada. De hecho las mahonesas con el 70% de sustitución son las más parecidas al control, ya que no se observan diferencias significativas con el mismo, al igual que ocurre en el caso de las del 50% con el menor porcentaje de agua. Se ha encontrado una correlación significativa de z con el factor de pérdidas ( $r=-0,92$  y  $p<0,001$ ). Ambos parámetros aportan información acerca del número de interacciones en la emulsión, el cual principalmente aumentó cuando disminuyó el nivel de sustitución de aceite.



A diferencia de lo observado en este estudio, Bortnowska et al. (2014) observaron que los valores de A y z mostraban una tendencia ascendente con el aumento de la concentración del almidón de maíz waxy pregelatinizado en la mahonesa baja en grasa. Estas diferencias pueden estar motivadas por el hecho de que los valores de A y z encontrados por Bortnowska et al. (2014) fueron mucho menores a los aportados en este estudio, posiblemente debido a la distinta fórmula de partida.

En general, atendiendo a los altos valores de A y z en conjunto, las muestras menos estables parecen ser las de los ratios 1:3,5 y 1:4. Para el ratio 1:3 la estabilidad se incrementa a medida que lo hace el nivel de sustitución. Esto puede estar relacionado con el alto nivel de interacciones entre la proteína y el almidón que rodea a las gotas (Manoi & Rizvi, 2009), ya que al incrementarse la cantidad de harina se incrementa la estabilidad, lo que sugiere que estos sistemas tendrían una alta habilidad para mantener la estructura original y prevenir el desestabilización de la emulsión (Zaidel et al., 2013).

### 3.5 Estabilidad de la emulsión y estabilidad a la congelación descongelación

Normalmente, en mahonesas la forma más probable de deterioro es la ruptura de la emulsión debido a una combinación de los fenómenos de coalescencia de las gotas de aceite y la formación de una capa superficial de aceite o *creaming* (Depree & Savage, 2001). La coalescencia es el proceso en el que dos o más gotas se unen entre sí para formar una única gota mayor, mientras que el *creaming* es el proceso en el que las gotas se mueven hacia arriba, a causa de su menor densidad con respecto al líquido que las rodea (McClements & Demetriades, 1998; Sikora et al., 2008). La estabilidad de una emulsión puede ser explicada utilizando la ley de Stokes (Depree & Savage, 2001; McClements & Demetriades, 1998):

$$v = - \frac{2gr^2(\rho_2 - \rho_1)}{9\eta_1}$$

Donde  $v$  es la velocidad de formación de la capa,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $r$  es el radio de la partícula,  $\rho$  es la densidad de las fases, y  $\eta$  es la viscosidad de cizallamiento de la fase continua. Por tanto, para reducir la velocidad de separación se debe disminuir el radio de las partículas de grasa o la diferencia entre la densidad de las fases o aumentar la viscosidad de la fase continua. Según la ley de Stokes, en este estudio, las mahonesas que deberían de haber sido más estables serían las de mayor sustitución de aceite, puesto que, como se vio en microscopía, el tamaño de sus glóbulos era el más pequeño. No obstante, no se produjo la separación del aceite en ninguna de las mahonesas estudiadas, a pesar del empleo de altas temperaturas y centrifugado para provocar su desestabilización. Así, la estabilidad de la emulsión al



día 1 fue del 100% para todas las mahonesas estudiadas, ya que ninguna mostró separación de fases (Resultados no mostrados). Por otro lado, al cabo de 7 días, la separación que se produjo, disminuyendo la estabilidad de las mahonesas, fue una histéresis de la fase acuosa de la emulsión, como se puede ver en la [Figura 5](#) (ANEXO I). Por este motivo la estabilidad de la emulsión no puede ser explicada por los fenómenos anteriormente citados.

Para el día 7, la muestra control fue la que tuvo una mayor estabilidad de la emulsión, sin prácticamente separación de agua, lo que resulta lógico si se tiene en cuenta que solamente posee el agua del huevo y del vinagre. De este modo, al reducir la cantidad de aceite de la formulación sustituyéndolo por la pasta de harina-agua se obtiene una mayor concentración en agua, favoreciendo su mayor separación ([Tabla 5](#)). A pesar de que para el 30% y 50% de sustitución no se observaron diferencias en la estabilidad dependiendo del ratio de agua de la pasta, para el mayor nivel de sustitución (70%) si se observaron, disminuyendo la estabilidad al aumentar el porcentaje de agua en la pasta, lo que concuerda con que la fase separada sea la acuosa.

**Tabla 5:** Estabilidad de la emulsión (día 7) y a la congelación-descongelación de las mahonesas (%)

| Muestra     | Estabilidad de la emulsión Estabilidad a la congelación-descongelación |                    |
|-------------|--|--------------------|
|             | Media $\pm$ SD   | Media $\pm$ SD     |
| Control     | 99,90e $\pm$ 0,18  | 24,16a $\pm$ 2,28  |
| 30% Sust.   |  |                    |
| Ratio 1:3   | 91,77cd $\pm$ 1,40   | 63,14b $\pm$ 0,71  |
| Ratio 1:3,5 | 90,64cd $\pm$ 2,06   | 65,93bc $\pm$ 2,41 |
| Ratio 1:4   | 88,45bc $\pm$ 1,76   | 68,345c $\pm$ 2,30 |
| 50% Sust.   |  |                    |
| Ratio 1:3   | 86,09b $\pm$ 2,89  | 79,01d $\pm$ 1,54  |
| Ratio 1:3,5 | 84,74b $\pm$ 2,68  | 80,31de $\pm$ 3,59 |
| Ratio 1:4   | 86,39b $\pm$ 5,53  | 83,54e $\pm$ 4,59  |
| 70% Sust.   |  |                    |
| Ratio 1:3   | 92,81d $\pm$ 1,78  | 97,99f $\pm$ 0,57  |
| Ratio 1:3,5 | 85,87b $\pm$ 5,37  | 98,63f $\pm$ 0,48  |
| Ratio 1:4   | 80,29a $\pm$ 3,45  | 98,69f $\pm$ 0,57  |

Valores medios  $\pm$  SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes con un  $p \leq 0,05$ .

Por un lado, la histéresis de la emulsión podría deberse a que los ingredientes de la formulación no son capaces de retener toda el agua adicionada, liberando una pequeña parte. Mientras que una posible explicación para que no se haya producido separación del aceite radicaría en que la mahonesa de partida ya era lo suficientemente estable para evitar la rotura de la emulsión. Esta gran estabilidad a la separación del aceite de la emulsión puede deberse a que se ha utilizado huevo



entero en la formulación y a la función emulgente de las proteínas de la clara. Las proteínas de la clara interactúan con las proteínas de la yema de huevo, formando efectivos enlaces cruzados entre las gotas de aceite y ayudando a la estabilización de la emulsión (Kiosseoglou & Sherman, 1983). En otros estudios que han empleado solamente yema de huevo (Bortnowska et al. 2014; Mun et al., 2009; Nikzade et al., 2012) partieron de una mahonesa control parcialmente inestable, lo que provocó un aumento de la estabilidad. El motivo de este aumento de estabilidad fue la incorporación de alguna sustancia con capacidad emulgente o espesante.

Las emulsiones de aceite en agua son propensas a la desestabilización en el proceso de congelación-descongelación (Magnusson et al., 2011), dada la gran expansión de volumen de la fase acuosa al cristalizar durante la congelación (Gosh & Coupland, 2008). Esto fuerza que las gotas de aceite estén aún más próximas entre sí (Saito et al., 1999). Así, es posible que los cristales de hielo formados durante la congelación puedan romper las gotas de aceite y alterar sus membranas interfaciales, lo que las hace más propensas a la coalescencia y a la separación de fases una vez descongeladas (Thanasukarn et al., 2004).

En el estudio de la estabilidad a la congelación-descongelación se observó una separación del aceite de las distintas mahonesas, y por tanto, de la fase dispersa de la emulsión (Figura 6, ANEXO I). La mahonesa control fue la que mayor separación de fases mostró, con una estabilidad del 24,16%, mientras que las mahonesas resultaron más estables cuanto mayor el nivel de sustitución del aceite, con diferencias significativas entre todos ellos (Tabla 5). Por lo general, el ratio harina extrusionada-agua de la pasta tuvo un menor efecto en la estabilidad a la congelación de las muestras. Solamente se observan diferencias significativas entre los ratios 1:3 y 1:4 de los niveles de sustitución del 30% y 50%, con más estabilidad cuanto mayor contenido en agua. De acuerdo a estos resultados, el remplazo del aceite por la pasta de harina extrusionada ayuda a la capacidad de retención de aceite, evitando su separación, y permitiendo su aplicación en productos congelados. Esto puede estar relacionado con los mayores espacios entre la fase dispersa y continua observados en la microscopía de las mahonesas. Estos espaciamientos entre las fases permitirían que a pesar de que el hielo se expanda, las gotas de aceite no queden tan comprimidas (la estructura no es tan compacta como en la mahonesa control). De esta forma se evita su alteración o rotura, reduciendo los fenómenos de separación de fases tras la congelación. Esta tendencia observada en las mahonesas es similar a la reportada por Teklehaimanot et al. (2013), al sustituir la grasa por una pasta de almidón modificado químicamente encontraron que la estabilidad a la congelación resultaba mayor que la de la muestra control. Según estos autores las posibles razones para explicar este



fenómeno podrían deberse al carácter hidrofílico de la pasta, la cual puede estabilizar el agua en la cristalización manteniendo las gotas de aceite muy separadas unas de otras, y protegiéndolas frente a posibles fenómenos de coalescencia.

### 3.6 Parámetros de color de las mahonesas

En la [Tabla 6](#) aparecen recogidos los parámetros de color de las distintas mahonesas estudiadas. Se sabe que la luminosidad ( $L^*$ ) de las mahonesas tiene un gran impacto en la apariencia percibida por los consumidores (Mun et al., 2009). Las muestras con sustituciones de aceite del 30 y 50% no muestran diferencias respecto al parámetro  $L^*$  frente a la control, sin embargo, con una sustitución del 70% se observa una ligera disminución de este parámetro. Chantrapornchai et al. (1999) estudiando emulsiones de aceite en agua con glóbulos de aceite de diferentes tamaños y concentraciones observaron que las emulsiones se vuelven menos luminosas a medida que la concentración de las gotas de aceite se reduce. Este efecto se debe a que la luz reflejada por estas emulsiones es menor, debido a que las gotas dispersan la luz con menor eficacia, y por lo tanto, el haz de luz es capaz de penetrar más en la emulsión y ser absorbido. Estas observaciones coinciden con lo observado en nuestro estudio ya que a medida que se incrementan los niveles de sustitución se reduce la concentración de las gotas de aceite, como se observa en las imágenes de microscopía óptica, y se reducen los valores de  $L^*$  en el caso de la mayor sustitución. Sin embargo, Chantrapornchai et al. (1999) también observaron que las emulsiones evolucionan de colores grises a blancos, y por tanto, se incrementan los valores de  $L^*$ , a medida que el tamaño de las gotas disminuye, debido a un aumento de la dispersión de la luz. En este caso se observa el efecto contrario, ya que las mahonesas que presentan mayores tamaños de gota (muestra control) presentan mayores valores de luminosidad que aquellas en las que el aceite se ha sustituido al 70%, con gotas de menor tamaño, lo que indica que en la luminosidad prima el efecto de la disminución de la concentración del aceite sobre el efecto de la reducción del tamaño de partícula. Además, en la luminosidad también puede influir las diferencias de color entre el aceite de girasol y las pastas harina-agua que se emplean para sustituirlo.

El parámetro  $a^*$  (eje verde-rojo), al igual que el parámetro  $b^*$  (eje azul-amarillo), es positivo para todas las mahonesas estudiadas, indicando una leve tendencia a colores rojizos-amarillentos de las mismas. En cuanto al parámetro  $a^*$ , se observan diferencias significativas de la muestra control con la mahonesa del 50% con menor cantidad de agua (ratio 1:3) y con todas las del 70% de sustitución de aceite, las cuales poseen el mayor valor de  $a^*$ . Por lo que respecta al parámetro  $b^*$ , no se encuentran diferencias significativas entre la muestra control y las del 30% de sustitución. Sin embargo, un



aumento del carácter amarillento de las mahonesas se observa a medida que se incrementa el nivel de sustitución del aceite por la pasta de harina extrusionada, con un ligero aumento de  $b^*$  para las muestras del 50%, aún mayor para las del 70% de sustitución. Los resultados obtenidos parecen indicar que la coloración de la harina extrusionada de maíz amarillo utilizada para la sustitución del aceite de las mahonesas es la causa de las diferencias en color observadas en los parámetros cromáticos  $a^*$  y  $b^*$ . La luteína y la zeaxantina son pigmentos carotenoides presentes en el huevo y el maíz que les confieren el color naranja o amarillo (Abdel-Aal et al., 2013). La mayor pigmentación de la harina de maíz debida a los carotenoides puede haber proporcionado a las mahonesas reducidas en grasa una mayor tonalidad rojiza y sobre todo amarillenta. Confirmando esta hipótesis, Shen et al. (2011) estimaron que los parámetros  $a^*$  y  $b^*$  de la mahonesa estaban influenciados por la cantidad de yema de huevo empleada, ingrediente que también posee carotenoides como pigmento, otorgando mayor coloración. Por el contrario, Lee et al. (2013) al utilizar almidón de arroz pregelatinizado como sustituto de la grasa obtuvieron unos menores valores de dichos parámetros cromáticos en las mahonesas reducidas en grasa con respecto a la muestra control, lo cual puede deberse al color blanquecino de este almidón.

**Tabla 6:** Parámetros de color de la mahonesa control y las mahonesas con contenido reducido en grasa

| Muestra     | $L^*$               | $a^*$              | $b^*$              | $\Delta E$        |
|-------------|---------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
|             | Media $\pm$ SD      | Media $\pm$ SD     | Media $\pm$ SD     | Media $\pm$ SD    |
| Control     | 89,51c $\pm$ 0,15   | 2,69abc $\pm$ 0,25 | 13,64a $\pm$ 0,74  | -                 |
| 30% Sust.   |                     |                    |                    |                   |
| Ratio 1:3   | 89,71c $\pm$ 0,04   | 2,58a $\pm$ 0,06   | 13,88a $\pm$ 0,17  | 0,35a $\pm$ 0,12  |
| Ratio 1:3,5 | 89,71c $\pm$ 0,16   | 2,62ab $\pm$ 0,09  | 13,87a $\pm$ 0,09  | 0,35a $\pm$ 0,09  |
| Ratio 1:4   | 88,65abc $\pm$ 2,11 | 2,58a $\pm$ 0,18   | 13,46a $\pm$ 0,82  | 1,31ab $\pm$ 1,98 |
| 50% Sust.   |                     |                    |                    |                   |
| Ratio 1:3   | 88,86abc $\pm$ 0,78 | 3,00d $\pm$ 0,33   | 15,66b $\pm$ 0,81  | 2,28b $\pm$ 0,76  |
| Ratio 1:3,5 | 88,66abc $\pm$ 0,28 | 2,89cd $\pm$ 0,17  | 15,05b $\pm$ 0,15  | 1,68b $\pm$ 0,12  |
| Ratio 1:4   | 88,94bc $\pm$ 0,60  | 2,88bcd $\pm$ 0,23 | 14,93b $\pm$ 0,46  | 1,54b $\pm$ 0,40  |
| 70% Sust.   |                     |                    |                    |                   |
| Ratio 1:3   | 87,83ab $\pm$ 0,37  | 3,08d $\pm$ 0,16   | 17,43d $\pm$ 0,46  | 4,19c $\pm$ 0,27  |
| Ratio 1:3,5 | 87,67a $\pm$ 0,25   | 3,08d $\pm$ 0,07   | 17,17cd $\pm$ 0,42 | 4,00c $\pm$ 0,41  |
| Ratio 1:4   | 87,65a $\pm$ 1,21   | 2,96d $\pm$ 0,08   | 16,60c $\pm$ 0,38  | 3,65c $\pm$ 0,47  |

Valores medios  $\pm$  SD (desviación estándar) seguidos por la misma letra en cada columna no son significativamente diferentes con un  $p \leq 0,05$ .  $\Delta E$ = diferencia de color total.

Por su parte, para los tres parámetros de color del sistema CIEL\* $a^*b^*$  analizados no existen diferencias entre los distintos ratios de harina extrusionada-agua para ninguno de los niveles de sustitución del aceite. Esto indica que las proporciones estudiadas entre los componentes de la pasta no llegan a afectar al color de las mahonesas.

En general se puede decir que la sustitución de aceite al 70% afecta a los parámetros cromáticos  $a^*$  y  $b^*$  y a la luminosidad de las mahonesas, mientras que la sustitución al 50% solo afecta al parámetro  $b^*$  y la del 30% no muestra diferencias significativas, en



casi ninguna de las combinaciones estudiadas. De hecho, la diferencia de color total ( $\Delta E$ ) de las mahonesas reducidas en grasa con respecto de la mahonesa control confirman los resultados observados para cada uno de los parámetros de color por separado, incrementándose a medida que aumenta el nivel de sustitución del aceite, independientemente del ratio harina-agua empleado.

#### 4. CONCLUSIONES

Los resultados encontrados en este estudio muestran que la harina extrusionada puede ser utilizada como sustituta del aceite para la elaboración de mahonesas con reducido contenido en grasa de calidad. En general, la reología se vio más afectada por el ratio harina-agua, que por el nivel de sustitución de aceite. A medida que disminuyó la cantidad de agua, se observó un aumento de la consistencia y de la viscosidad límite en el ensayo de flujo, y un aumento de la elasticidad y la estabilidad en el ensayo oscilatorio. Todas las mahonesas elaboradas mostraron una alta estabilidad inicial, y con el paso del tiempo. También se ha comprobado que el remplazo de la grasa por harina extrusionada permite obtener mahonesas más estables a la congelación mejorando su aplicación en productos congelados. Por otro lado, los cambios en color son mínimos, incrementándose con el nivel de sustitución, y motivados por el color de la harina utilizada, siendo posible minimizarlos al utilizar harinas procedentes de otros cereales.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

- Abdel-Aal, E.M., Akhtar, H., Zaheer, K., & Ali, R. (2013) Dietary sources of lutein and zeaxanthin carotenoids and their role in eye health. *Nutrients*, 5, 1169-1185.
- Abu-Jdayil, B. (2003) Modelling the time dependant rheological behavior of semi-solid foodstuffs. *Journal of Food Engineering*, 57, 97-102.
- Alimi, M., Naderi, G., Mizani, M., & Shokoohi, S. (2013) Effect of inulin formulation on the microstructure and viscoelastic properties of low-fat mayonnaise containing modified starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 130, 801-809.
- Astrup, A., Dyerberg, J., Elwood, P., Hermansen, K., Hu, F.B., Jakobsen, M.U., Kok, F.J., Kraus, R.M., Lecerf, J.M., LeGrand, P., Nestel, P., Risérus, U., Sanders, T., Sinclair, A., Stender, S., Tholstrup, T., & Willett, W.C. (2011) The role of reducing intakes of saturated fat in the prevention of cardiovascular disease: where does the evidence stand in 2010? *American Journal of Clinical Nutrition*, 93, 684-688.
- Astrup, A., Grunwald, G.K., Melanson, E.L., Saris, W.H.M., & Hill, J.O. (2000) The role of low-fat diets in body weight control: a meta-analysis of ad libitum intervention studies. *International Journal of Obesity*, 24, 1545-1552.
- Atwell, W., Hood, L., Lineback, D., Varriano Marston, E., & Zobel, H. (1988) The terminology and methodology associated and basic starch phenomena. *Cereal Foods World*, 33, 306-311.
- Batista, A.P., Raymundo, A., Sousa, I., & Empis, J. (2006) Rheological characterization of coloured oil-in-water food emulsions with lutein and phycocyanin added to the oil and aqueous phases. *Food Hydrocolloids* 20, 44-52.
- Bohlin, L. (1980) A theory of flow as a cooperative phenomenon. *Journal of Colloid and Interface Science*, 74, 423-434.



- Bortnowska, G., Balejko, J., Tokarczyk, G., Romanowska-Osuch, A., & Krzeminska, N. (2014) Effects of pregelatinized waxy maize starch on the physicochemical properties and stability of model low-fat oil-in-water food emulsions. *Food Hydrocolloids*, 36, 229-237.
- Bray, G.A., Paeratakul, S., & Popkin, B.M. (2004) Dietary fat and obesity: A review of animal, clinical and epidemiological studies. *Physiology and Behavior*, 83, 549-555.
- Camire, M.E., Camire, A., & Krumhar, K. (1990) Chemical and nutritional changes in foods during extrusion. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 29, 35-57.
- Chantrapornchai, W., Clydesdale, F., & McClements, D.J. (1999) Influence of droplet characteristics on the optical properties of colored oil-in-water emulsions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 155, 373-382.
- Chanvrier, H., Uthayakumaran, S., & Lillford, P. (2007) Rheological properties of wheat flour processed at low levels of hydration: Influence of starch and gluten. *Journal of Cereal Science*, 45, 263-274.
- Cheftel, J.C., Cuq, J.L., & Lorient, D. (1985) Amino acids, peptides and proteins. En Fennema, O.R. (Ed.), *Food Chemistry*, Segunda Edición, Marcel Dekker, INC, Nueva York, EEUU, pp. 245-269.
- Chiu, C., & Solarek, D. (2009) Modification of starch. En BeMiller, J., & Whistler, R. (Eds.), *Starch. Chemistry and Technology*. Academic Press, Nueva York, EEUU, pp. 629-656.
- Cho, S.J., Lim, H.S., Park, H.J., Hwang, H.J., & Lim, S.T. (1999) Physical properties of octenyl succinylated corn amyloextrins as fat replacers in mayonnaise. *Food Science and Biotechnology*, 8, 322-328.
- De Graaf, C., Drijvers, J.J.M.M., & Zimmermanns, N.J.H. (1997) Energy and fat consumption during long-term consumption of reduced fat products. *Appetite*, 29, 305-323.
- Depree, J.A., & Savage, G.P. (2001) Physical and flavour stability of mayonnaise. *Trends in Food Science & Technology*, 12, 157-163.
- Dolz, M., Hernández, M.J., Delegido, J., Alfaro, M.C., & Muñoz, J. (2007) Influence of xanthan gum and locust bean gum upon flow and thixotropic behaviour of food emulsions containing modified starch. *Journal of Food Engineering*, 81, 179-186.
- Doublier, J.L., Colonna, P., & Mercier, C. (1986) Extrusion cooking and drum drying of wheat starch, II. Rheological characterization of starch pastes. *Cereal Chemistry*, 63, 240-260.
- Franco, J.M., Gallegos, C., & Barnes, H.A. (1998) On slip effects in steady-state flow measurements of oil-in-water food emulsions. *Journal of Food Engineering*, 36, 89-102.
- Franco, J.M., Partal, P., Ruiz-Marquez, D., Conde, B., & Gallegos, C. (2000) Influence of pH and protein thermal treatment on the rheology of pea protein-stabilized emulsions. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 77, 975-983.
- Gamonpilas, C., Pongjaruvat, W., Fuongfuchat, A., Methacanon, P., Seetapan, N., & Thamjedsada, N. (2011) Physicochemical and rheological characteristics of commercial chili sauces as thickened by modified starch or modified starch/ xanthan mixture. *Journal of Food Engineering*, 105, 233-240.
- Ghosh, S., & Coupland, J.N. (2008) Factors affecting the freeze-thaw stability of emulsions. *Food Hydrocolloids*, 22, 105-111.
- Hagenimana, A., Ding, X., & Fang, T. (2006) Evaluation of rice flour modified by extrusion cooking. *Journal of Cereal Science*, 43, 38-46.
- Harrison, L.J., & Cunningham, F.E. (1985) Factors influencing the quality of mayonnaise. *Journal of Food Quality*, 8, 1-20.
- Hooper, L., Summerbell, C.D., Higgins, J.P.T., Thompson, R.L., Capps, N.E., Smith, G.D., Riemersma, R.A., & Ebrahim, S. (2001) Dietary fat intake and prevention of cardiovascular disease: systematic review. *British Medical Journal*, 322, 757-763.
- Izidoro, D.R., Scheer, A.P., Sierakowski, M.R., & Haminiuk, C.W.I. (2008) Influence of green banana pulp on rheological behaviour and chemical characteristics of emulsions (mayonnaises). *LWT-Food Science and Technology*, 41, 1018-1028.
- Jacobs, H., & Delcour, J. (1998) Hydrothermal modifications of granular starch, with retention of the granular structure: A review. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46, 2895-2905.



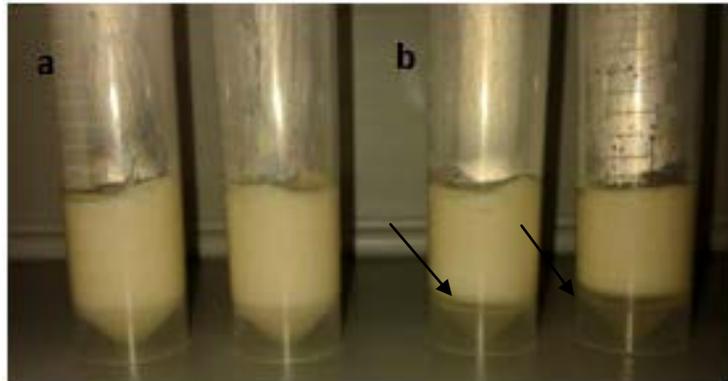
- Jonnalagadda, S.S., & Jones, J.M. (2005) Position of the American Dietetic Association: Fat replacers. *Journal of the American Dietetic Association*, 105, 266-275.
- Kim, D.N., Bae, I.Y., Inglett, G.E., & Lee, S. (2009) Effect of hydrothermal treatment on the physicochemical, rheological and oil resistant properties of rice flour. *Journal of Texture Studies*, 40, 192-207.
- Kiosseoglou, V.D., & Sherman, P. (1983) Influence of egg yolk lipoproteins on the rheology and stability of oil/water emulsions and mayonnaise 1. Viscoelasticity of groundnut oil-in-water emulsions and mayonnaise. *Journal of Texture Studies*, 14, 397-417.
- Laca, A., Sáenz, M.C., Paredes, B., & Díaz, M. (2010) Rheological properties, stability and sensory evaluation of low-cholesterol mayonnaises prepared using egg yolk granules as emulsifying agent. *Journal of Food Engineering*, 97, 243-252.
- Lee, I., Lee, S., Lee, N., & Ko, S. (2013) Reduced-fat mayonnaise formulated with gelatinized rice starch and xanthan gum. *Cereal Chemistry*, 90, 29-34.
- Li, J., Wang, Y., Jin, W., Zhou, B., & Li, B. (2014) Application of micronized konjac gel for fat analogue in mayonnaise. *Food Hydrocolloids*, 35, 375-382.
- Liu, H., Xu, X.M., & Guo, S.D. (2007) Rheological, texture and sensory properties of low-fat mayonnaise with different fat mimetics. *LWT-Food Science and Technology*, 40, 946-954.
- Ma, L., & Barbosa-Canovas, G.V. (1995a) Rheological characterization of mayonnaise. Part I: Slippage at different oil and xanthan gum concentrations. *Journal of Food Engineering*, 25, 397-408.
- Ma, L., & Barbosa-Canovas, G.V. (1995b) Rheological characterization of mayonnaise. Part II: Flow and viscoelastic properties at different oil and xanthan gum concentrations. *Journal of Food Engineering*, 25, 409-425.
- Ma, Z., & Boye, J.I. (2013) Advances in the Design and Production of Reduced-Fat and Reduced-Cholesterol Salad Dressing and Mayonnaise: A Review. *Food Bioprocess Technology*, 6, 648-670.
- Magnusson, E., Rosén, C., & Nilsson, L. (2011) Freeze-thaw stability of mayonnaise type oil-in-water emulsions. *Food Hydrocolloids*, 25, 707-15.
- Mancini, F., Montanari, L., Peressini, D., & Fantozzi, P. (2002) Influence of alginate concentration and molecular weight on functional properties of mayonnaise. *LWT-Food Science and Technology*, 35, 517-525.
- Manoi, K., & Rizvi, S.S.H. (2009) Emulsification mechanisms and characterizations of cold, gel-like emulsions from texturized whey protein concentrate. *Food Hydrocolloids*, 23, 1837-1847.
- Manoj, P., Fillery-Travis, A.J., Watson, A.D., Hibberd, D.J., & Robins, M.M. (1998) Characterization of a depletion-flocculated polydisperse emulsion II. Steady-state rheological investigations. *Journal of Colloid and Interface Science*, 207, 294-302.
- Martínez, M.M., Calviño, A., Rosell, C.M., & Gómez, M. (2014) Effect of different extrusion treatments and particle size distribution on the physicochemical properties of rice flour. *Food Bioprocess Technology*, doi 10.1007/s11947-014-1252-7.
- Mason, W.R. (2009) Starch use in foods. En BeMiller, J., & Whistler, R. (Eds.), *Starch. Chemistry and Technology*. Academic Press, Nueva York. EEUU, pp. 745-795.
- Mason, W.R., & Hosney, R.C. (1986) Factors affecting the viscosity of extrusion-cooked wheat starch. *Cereal Chemistry*, 63, 436-441.
- McClements, J., & Demetriades, K. (1998) An integrated approach to the development of reduced-fat food emulsions. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 38, 511-536.
- Moros, J.E., Franco, J.M., & Gallegos, C. (2002) Rheological properties of cholesterol-reduced, yolk-stabilized mayonnaise. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 79, 837-843.
- Mun, S., Kim, Y.L., Kang, C.G., Park, K.H., Shim, J.Y., & Kim, Y.R. (2009) Development of reduced-fat mayonnaise using 4 $\alpha$ GTase-modified rice starch and xanthan gum. *International Journal of Biological Macromolecules*, 44, 400-407.
- Nikzade, V., Mazaheri-Tehrani, M., & Saadatmand-Tarzjan, M. (2012) Optimization of low cholesterol-low-fat mayonnaise formulation: Effect of using soy milk and some stabilizer by a mixture design approach. *Food Hydrocolloids*, 28, 344-352.
- Pal, R. (1996) Effect of droplet size on the rheology of emulsions. *American Institute of Chemical Engineers Journal*, 42, 3181-3190.



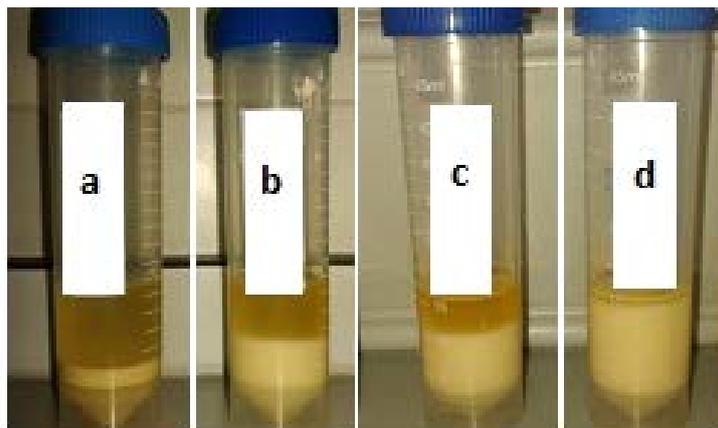
- Peressini, D., Sensidoni, A., & de Cindio, B. (1998) Rheological characterization of traditional and light mayonnaises. *Journal of Food Engineering*, 35, 409-417.
- Raymundo, A., Franco, J.M., Empis, J., & Sousa, I. (2002) Optimization of the composition of low-fat oil-in-water emulsions stabilized by white lupin protein. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 79, 783-790.
- Real Decreto 858/1984, del Boletín Oficial del Estado, de 28 de marzo, reglamentación Técnico-Sanitaria para la Elaboración, Circulación y Comercio de Salsas de Mesa.
- Reglamento (CE) 1924/2006 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de diciembre de 2006, relativo a las declaraciones nutricionales y de propiedades saludables en los alimentos.
- Rothstein, W.G. (2006) Dietary fat, coronary heart disease, and cancer: A historical review. *Preventive Medicine*, 43, 356-360.
- Saito, H., Kawagishi, A., Tanaka, M., Tanimoto, T., Okada, S., Komatsu, H., & Handa, T. (1999) Coalescence of lipid emulsions in floating and freeze-thawing processes: Examination of the coalescence transition state theory. *Journal of Colloid and Interface Science*, 219, 129-134.
- Sandrou D.K., & Arvanitoyannis I.S. (2000) Low-fat/calorie foods: current state and perspectives. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 40, 427-447.
- Schwingshackl, L., & Hoffmann, G. (2013) Comparison of effects of long-term low-fat vs high-fat diets on blood lipid levels in overweight or obese patients: a systematic review and meta-analysis. *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, 113, 1640-1661.
- Shen, R., Luo, S.Q., & Dong, J.L. (2011) Application of oat dextrine for fat substitute in mayonnaise. *Food Chemistry*, 126, 65-71.
- Sikora, M., Badrie, N., Deisingh, A.K., & Kowalski, S. (2008) Sauces and Dressings: A review of properties and applications. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 48, 50-77.
- Su, H.P., Lien, C.P., Lee, T.A., & Ho, J.H. (2010) Development of low-fat mayonnaise containing polysaccharide gums as functional ingredients. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 90, 806-812.
- Sun, C., & Gunasekaran, S. (2009) Effects of protein concentration and oil-phase volume fraction on the stability and rheology of menhaden oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate with xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 23, 165-174.
- Teklehaimanot, W.H., Duodu, K.G., & Emmambux, M.N. (2013) Maize and teff starches modified with stearic acid as potential fat replacer in low calorie mayonnaise-type emulsions. *Starch*, 65, 773-781.
- Thanasukarn, P., Pongsawatmanit, R., & McClements, D.J. (2004) Impact of fat and water crystallization on the stability of hydrogenated palm oil-in-water emulsions stabilized by whey protein isolate. *Colloids and Surfaces a-Physicochemical and Engineering Aspects*, 246, 49-59.
- Warrand, J. (2006) Healthy polysaccharides. The next chapter in food products. *Food Technology and Biotechnology*, 44, 355-370.
- Wen, L., Rodis, P., & Wasserman, B. (1990) Starch fragmentation and protein insolubilization during twin-screw extrusion of corn meal. *Cereal Chemistry*, 67, 268-275.
- Wendin, K., Aaby, K., Edris, A., Ellekjaer, M.R., Albin, R., Bergenstahl, B., Johansson, L., Willers, E.P., & Solheim, R. (1997) Low-fat mayonnaise: influences of fat content, aroma compounds and thickeners. *Food Hydrocolloids*, 11, 87-99.
- Wolf, B. (2010) Polysaccharide functionally through extrusion processing. *Current Opinion in Colloid and Interface Science*, 15, 50-54.
- Worrasinchai, S., Suphantharika, M., Pinjai, S., & Jamnong, P. (2006)  $\beta$ -Glucan prepared from spent brewer's yeast as a fat replacer in mayonnaise. *Food Hydrocolloids*, 20, 68-78.
- Zaidel, D.N.A., Chronakis, I.S., & Meyer, A.S. (2013) Stabilization of oil-in-water emulsions by enzyme catalyzed oxidative gelation of sugar beet pectin. *Food Hydrocolloids*, 30, 19-25.

## 6. ANEXO I.

### Imágenes de la estabilidad a la emulsión y a la congelación-descongelación



**Figura 5:** Estabilidad de la emulsión. Mahonesas control (a) y 30% Sustitución Ratio 1:4 (b). Las flechas en la mahonesa del 30% sustitución indican la histéresis producida.



**Figura 6:** Estabilidad a la congelación-descongelación. Mahonesas control (a), 30% Sustitución Ratio 1:4 (b), 50% Sustitución Ratio 1:4 (c) y 70% Sustitución Ratio 1:4 (d).