



HAL
open science

Cuantificación de la persistencia y homogeneidad de espumas mediante procesamiento de imagen

E. Castillo-Castañeda, Francis Courtois, Perla P. Relkin

► **To cite this version:**

E. Castillo-Castañeda, Francis Courtois, Perla P. Relkin. Cuantificación de la persistencia y homogeneidad de espumas mediante procesamiento de imagen. *Ciencia Tecnología Alimentaria*, 2006, 5 (2), pp.147-155. hal-02654459

HAL Id: hal-02654459

<https://hal.inrae.fr/hal-02654459v1>

Submitted on 29 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

**Ciencia y Tecnología
Alimentaria**

Ciencia y Tecnología Alimentaria

ISSN: 1135-8122

somenta@gmail.com

Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología
de Alimentos
México

Castillo Castañeda, E.; Courtois, F.; Relkin, P.
Cuantificación de la persistencia y homogeneidad de espumas mediante procesamiento de imágenes
Ciencia y Tecnología Alimentaria, vol. 5, núm. 2, julio, 2006, pp. 147-155
Sociedad Mexicana de Nutrición y Tecnología de Alimentos
Reynosa, México

Available in: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=72450212>

- How to cite
- Complete issue
- More information about this article
- Journal's homepage in redalyc.org

redalyc.org

Scientific Information System

Network of Scientific Journals from Latin America, the Caribbean, Spain and Portugal

Non-profit academic project, developed under the open access initiative

CUANTIFICACIÓN DE LA PERSISTENCIA Y HOMOGENEIDAD DE ESPUMAS MEDIANTE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

QUANTIFICATION OF FOAM'S STABILITY AND HOMOGENEITY BY IMAGE PROCESSING

Castillo-Castañeda, E.^{1*}; Courtois, F.²; Relkin, P.²

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Facultad de Ingeniería, Cerro de las Campanas, 76010-Querétaro, México.

²Ecole Nationale Supérieure des Industries Agricoles et Alimentaires, 1, Av. des Olympiades, 91744-Massy, France.

Recibido/Received: 09-01-2006; aceptado/accepted: 03-05-2006

*Autor para la correspondencia. E-mail: ecast@uaq.mx

Abstract

Foams are widely used in food industry and play an important role in texture and flavor of novel food products. Consumer accepts or rejects a product guided frequently only by foam's appearance; foams with stable, small and uniform size bubbles are associated to good flavor and quality. However, food technologists do not have enough tools to characterize foams in an objective and consistent way. This work presents a methodology to characterize foams appearance using image processing techniques on a set of images during a foaming process by air injection. Two kinds of protein-based foams, having different foaming agent concentration, were created to validate this methodology. Foam stability and homogeneity were determined by quantification of two parameters: bubbles number and size. Those parameters were extracted using image-processing techniques. The images were acquired automatically every 10 sec during the drainage phase using a USB camera and then were processed by personal computer.

Resumen

Las espumas son extensamente utilizadas en el campo alimenticio y juegan un papel importante en la textura y sabor de nuevos productos. El consumidor rechaza o acepta el producto guiado frecuentemente sólo por el aspecto de la espuma. Espumas con burbujas persistentes, pequeñas y uniformes en tamaño se asocian generalmente a productos de buen sabor y calidad. Sin embargo, los tecnólogos en alimentos no cuentan con herramientas suficientes que permitan caracterizar en forma objetiva y consistente las espumas y su dinámica. Este trabajo presenta una metodología para la caracterización de la apariencia de espumas utilizando técnicas de procesamiento de imágenes durante un proceso de espumado por inyección de aire. Para validar la metodología se utilizaron dos disoluciones con diferente concentración de agente espumante. Para cada disolución se determinó la persistencia y la homogeneidad de las espumas a través de la cuantificación de dos parámetros: el tamaño y el número de burbujas. Los parámetros fueron extraídos usando técnicas de procesamiento imágenes. Las imágenes se adquirieron automáticamente con una cámara USB cada 10 seg durante la etapa de drenado y fueron procesadas en computadora personal.

Keywords: foam characterization, image processing

Palabras clave: caracterización de espumas, procesamiento de imágenes

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, las espumas son ampliamente utilizadas en la industria alimenticia para modificar la textura y las propiedades físicas del producto final, proporcionando una gran diversidad de sabores y apariencias al consumidor (Campbell y Mougeot, 1993). Los beneficios positivos de los productos alimenticios creados a partir de espumas están relacionados principalmente con la textura, por ejemplo, la crema batida y el mousse se vuelven más suaves y agradables al gusto; los cereales se vuelven más ligeros y crujientes. El aspecto

visual juega un papel importante en la aceptación de productos como vinos, cidras, cervezas y bebidas refrescantes. Por ejemplo, en el caso de la sidra, se considera que la calidad está relacionada con espuma conformada por burbujas pequeñas (Mangas *et al.*, 1999).

Los fabricantes de alimentos se apoyan en las investigaciones para comprender y diseñar metodologías para sus nuevos productos basados en espumas. Por el momento, los estudios se han centrado en la comprensión y el desarrollo de técnicas analíticas adecuadas para estos productos (Guillermé *et al.*, 1993; Hagolle *et al.*, 2000) pero la capacidad de interpretar sus mediciones en términos

del comportamiento de las burbujas y de su relación con la estructura del producto y su calidad están aún fuera del alcance de los tecnólogos en alimentos.

Generalmente, los estudios realizados en burbujas se han dedicado a la caracterización básica de las propiedades físicas del proceso de espumado como el volumen, la densidad y el drenado (Relkin *et al.*, 1999). Sin embargo, los parámetros que describen la apariencia de la espuma juegan un papel muy importante en la aceptación del consumidor de un nuevo producto alimenticio. Una gran parte de los estudios realizados sobre la apariencia de espumas en alimentos o bebidas utilizan descripciones cualitativas de la espuma (Mangas *et al.*, 1999; Picinelli *et al.*, 2000), fundamentadas únicamente en la experiencia de un catador o en la subjetiva apreciación visual. Sin embargo, para realizar un estudio más riguroso sobre la influencia de ciertos ingredientes en las propiedades visibles de la espuma, es necesario contar al menos con una metodología que garantice la reproducibilidad del análisis y una descripción cuantitativa de la apariencia de espumas.

El tamaño de la burbuja es el parámetro primario para determinar el comportamiento y contribución de la estructura a la textura del producto alimenticio. En una espuma existe una amplia distribución de tamaño de burbujas, algunos tamaños contribuyen a la apariencia y otros a la textura. Las burbujas no son necesariamente estáticas en un sistema alimenticio; el seguimiento del comportamiento dinámico de la distribución de tamaños añade otra dimensión de complejidad.

En los trabajos de Ligier-Belair *et al.* (1999) y Marchal *et al.* (2001) se han utilizado imágenes de video para registrar los instantes del espumado en bebidas, pero debido a la dificultad del procesamiento automático de las imágenes, se han limitado a una extracción manual del tamaño y del número de burbujas en la espuma a partir de algunas imágenes adquiridas. Los trabajos más recientes para la caracterización de espumas mediante la detección de burbujas utilizan tecnologías muy costosas y sofisticadas que no son necesariamente las más precisas o robustas y que llevan generalmente a cabo una medición indirecta de las propiedades de la espuma. El trabajo presentado por Prabhukumar *et al.* (1996) describe un método basado en un dispositivo de emisión acústica que aprovecha la buena respuesta de las burbujas al sonido para estimar el número de burbujas según la amplitud del sonido reflejado. El método descrito por Taner *et al.* (2001) describe un procedimiento que estima la distribución del tamaño de las burbujas mediante sensores fotoeléctricos infrarrojos que detectan la presencia de burbujas en cierta región de la espuma.

Este trabajo propone una metodología basada en el procesamiento de imágenes para la extracción automatizada de dos características importantes de una espuma: la persistencia y la homogeneidad. La extracción

manual de estas características es compleja ya que varían durante la etapa de drenado. Para la descripción de la persistencia se utilizó el número de burbujas y su tamaño, la descripción de la homogeneidad se expresó con el índice de uniformidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Procesamiento de imágenes

Las imágenes adquiridas durante los procesos de espumado o de drenado contienen una gran cantidad de información acerca de las burbujas y de su dinámica; esta información se encuentra en un cierto número de parámetros, como son: color, forma, tamaño, número, movilidad, uniformidad, estabilidad, etc. La simple observación de la secuencia de imágenes permite obtener una descripción cualitativa de estos parámetros. Sin embargo, para que los parámetros puedan ser utilizados para explicar los fenómenos fisicoquímicos implicados, es necesario obtener una descripción cuantitativa confiable. Lo anterior se logra siguiendo un conjunto de etapas secuenciales: adquisición de imágenes, preprocesamiento (filtrado, reducción de distorsión, etc.), extracción de características (color, forma, dimensiones, textura, etc.), análisis estadístico e interpretación de resultados.

Antes de iniciar el preprocesamiento es necesario asegurarse que los problemas provocados por una mala adquisición de imágenes han sido resueltos o minimizados. Es normal que todo proceso de adquisición de imágenes se encuentre expuesto a condiciones propias del experimento que pueden reducir severamente la capacidad de extraer características geométricas en forma precisa.

Algunas de las condiciones encontradas durante el desarrollo de este trabajo relacionadas con el proceso de adquisición de imágenes fueron:

- 1). Sistema de iluminación deficiente. Un exceso de luz genera reflejos que disminuyen la nitidez de los contornos de las partículas a detectar. Por el contrario, la falta de luz genera regiones oscuras con niveles de gris saturados en negro. En diversas ocasiones, una simple modificación en las condiciones de iluminación puede evitar el uso de algoritmos complejos de preprocesamiento. En el caso del conteo de partículas semitransparentes, se debe evitar la iluminación por detrás del contenedor ya que hará visibles las burbujas que se encuentran en el segundo plano. Por otro lado, una iluminación frontal generará reflejos circulares que pueden ser tomados como partículas.

- 2). Regiones de una imagen fuera de foco. Debido a la forma cilíndrica del contenedor de la espuma, las regiones de las imágenes correspondientes a los bordes del contenedor aparecerán borrosas (fuera de foco) o distorsionadas (partículas elípticas en lugar de esféricas). Para eliminar este problema, se utilizan sólo las regiones

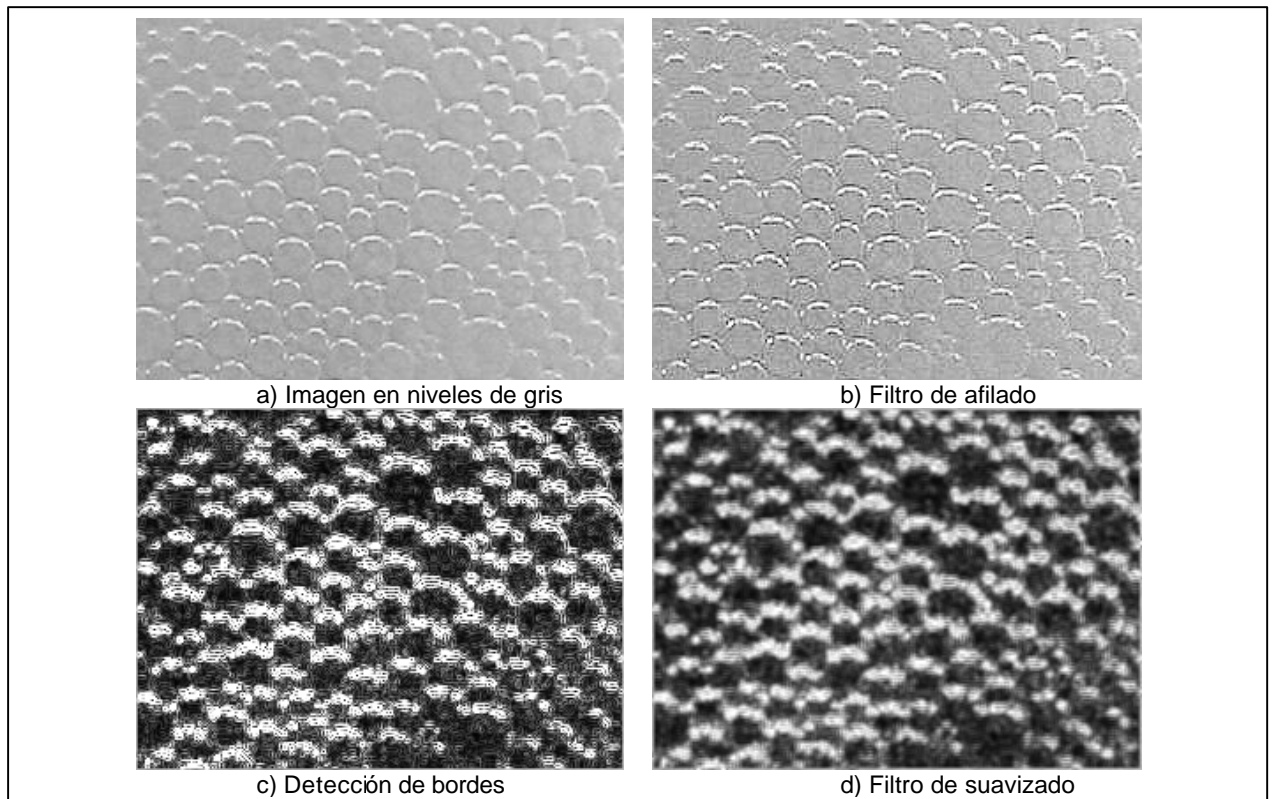


Figura 1. Etapas para el realce de bordes.

Figure 1. Stages for the enhancement of edges.

centrales de la imagen. Una opción práctica es el uso de contenedores que posean al menos una cara plana para colocar la cámara frente a ella.

3). Escasa uniformidad en el color de las partículas. Este problema es generalmente inevitable ya que depende de las sustancias utilizadas para generar las espumas. Un cambio de color puede ser tomado como una sombra, un reflejo o como parte de un contorno y puede influir en el proceso de detección y de conteo.

4). Baja resolución del dispositivo de digitalización de imágenes. La resolución del sistema de adquisición y digitalización de imágenes, es decir el número de píxeles por milímetro, se debe elegir cuidadosamente para garantizar la detección de todas las partículas de interés.

Una vez que el proceso de adquisición ha sido optimizado, se puede llevar a cabo el preprocesamiento de las imágenes. Existen básicamente dos técnicas para la caracterización de la apariencia de espumas a partir de imágenes digitales. La primera técnica está basada en la textura aparente de la espuma. Un estudio sobre la estabilidad de espumas mediante la caracterización de textura fue realizado por Hagolle *et al.* (2000). La caracterización de textura utiliza la transformada de Haar, según se presenta en los trabajos de Bertrand *et al.* (1992). El inconveniente de esta técnica es que se trata nuevamente

de un método indirecto de caracterización de la apariencia de la espuma.

La segunda técnica, utilizada en este trabajo, consiste en aplicar algoritmos de detección, conteo y medición de partículas, en este caso de burbujas de la espuma. Estos algoritmos deben ser suficientemente robustos para poder ser aplicados en forma automática a un número considerable de imágenes. Por ejemplo, un proceso de drenado de espuma de origen proteico dura aproximadamente 30 minutos y la dinámica de las burbujas (coalescencia y ruptura) ocurre en periodos de 10 segundos aproximadamente; esto significa que los algoritmos deben ser aplicables a alrededor de 180 imágenes.

En este trabajo se asumió que las burbujas de las espumas presentan tres características: 1) son de forma semiesférica, 2) se encuentran aglutinadas, es decir la superficie de su envoltorio está en continuo contacto con las otras burbujas, 3) las partículas son semitransparentes. Estas suposiciones permiten definir el tipo de tratamiento que debe aplicarse al conjunto de imágenes. La Figura 1a corresponde a una espuma de origen proteico durante la fase de drenado donde se puede apreciar la validez de las características supuestas.

La primera etapa del preprocesamiento fue convertir la intensidad (color) de cada píxel en niveles de

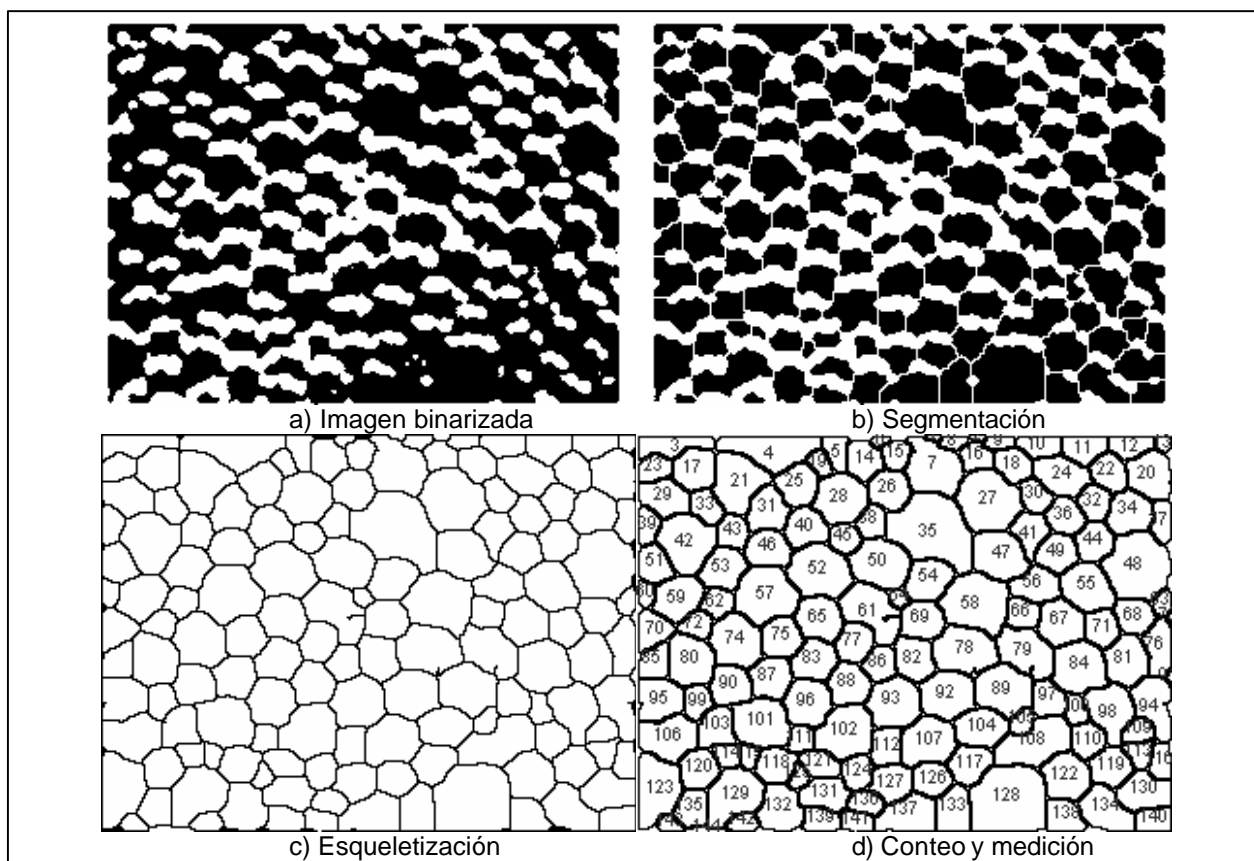


Figura 2. Etapas de segmentación y conteo de partículas.

Figure 2. Stages of segmentation and particle count.

gris de 8 bits (valores entre 0 y 255). Para delinear mejor los bordes de las burbujas se utilizó un filtro de *afilado*, este filtro incrementa el contraste y acentúa los detalles en la imagen, pero puede también acentuar el ruido (Figura 1b). Este filtro reemplaza cada píxel por el promedio ponderado de su vecindad 3x3 (los nueve píxeles que forman una matriz de 3x3 donde el píxel en cuestión está en el centro). Posteriormente, se aplicó una etapa de detección de bordes basada en un detector tipo Sobel (Russ, 1995) que consiste en realzar los cambios en intensidad (Figura 1c). Los bordes se pueden apreciar con más claridad pero el ruido se ha incrementado. Un filtro de suavizado permite reducir el ruido y homogeneizar el color de las partículas en la imagen (Figura 1d). Este filtro reemplaza cada píxel por el promedio de su vecindad 3x3.

A pesar de obtener los bordes bastante delineados, existe un gran número de burbujas con bordes incompletos y, en la mayoría de los casos, bordes compartidos por más de una burbuja. Para poder separar las burbujas y completar los bordes faltantes se utilizó una técnica de segmentación conocida como *watershed* basada en el mapa de distancia Euclidiana (MDE) (Russ, 1995). Una limitante de esta técnica es que sólo puede completar bordes de partículas con forma semiesférica y en el caso de formas alargadas, una partícula podría ser separada erróneamente en dos.

Para poder aplicar esta técnica, la imagen debe ser binarizada, es decir reemplazar la intensidad de cada píxel por un valor binario (0 o 1, negro o blanco respectivamente); esta conversión depende de un nivel de umbral para decidir si el píxel es considerado como blanco o negro. El resultado de la binarización se observa en la Figura 2a. La imagen segmentada, utilizando *watershed* se aprecia en la Figura 2b, las partículas tienen finalmente bordes completos y cerrados. Las partes blancas de esa imagen corresponden a los reflejos sobre las burbujas. Para eliminarlos se asume que las imágenes se encuentran aglutinadas y que las envolventes están en contacto. Lo anterior se logra con un proceso de esqueletización (Russ, 1995) que consiste en aplicar erosiones sucesivas de los píxeles blancos hasta obtener bordes con grosor de 1 píxel, el resultado se observa en la Figura 2c y se puede apreciar que las burbujas se encuentran perfectamente separadas y delineadas por un contorno cerrado. En este punto, se aplicaron técnicas de conteo de partículas y de estimación de superficie. El resultado del conteo se presenta en la Figura 2d, la estimación de la superficie de cada partícula se llevó a cabo contando el número de píxeles dentro de cada contorno cerrado. A partir del cálculo de la superficie se puede obtener el diámetro correspondiente al círculo más cercano que coincida con el área calculada.

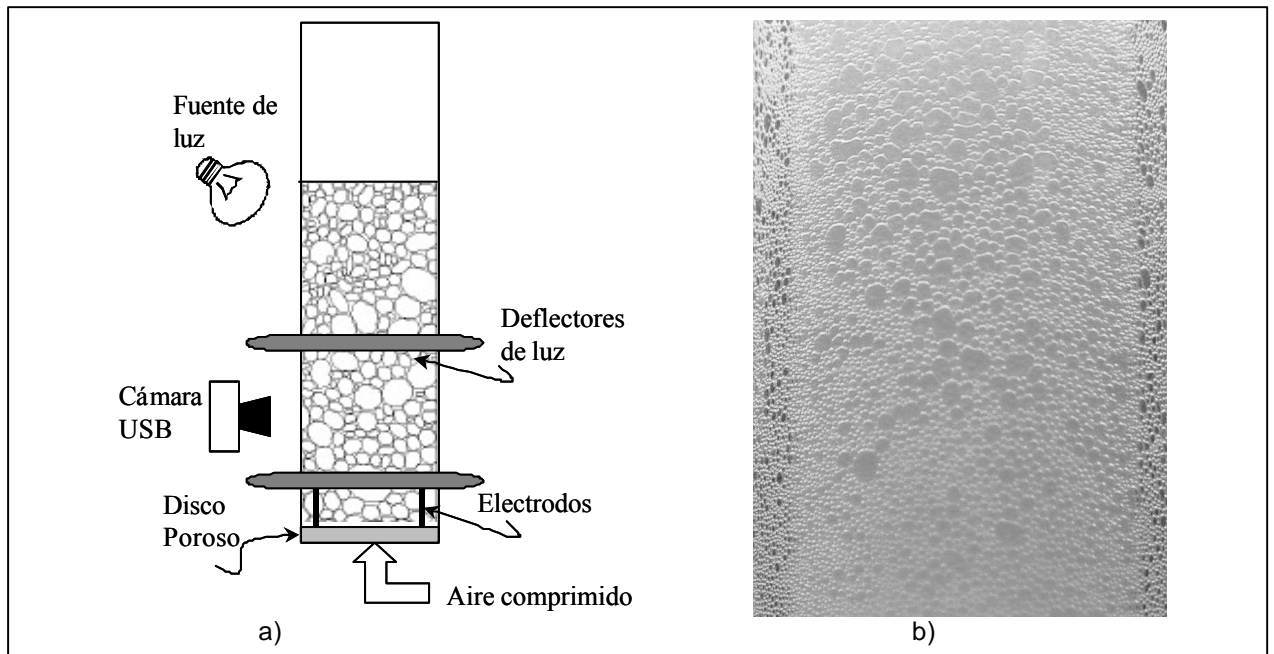


Figura 3. a) Esquema del dispositivo de espumado, b) Imagen de la espuma.

Figure 3. a) Scheme of the foaming device, b) Foam image.

Una vez que las imágenes han sido preprocesadas para obtener una imagen modificada como la mostrada en la Figura 2c, se realizó una extracción de características. Para el estudio presentado en este trabajo, las características extraídas de cada imagen fueron: el número de burbujas y el tamaño (área) de cada burbuja. A partir del análisis estadístico de estas dos características, se obtuvieron los resultados de la persistencia y de la homogeneidad de la espuma.

Generación de espuma y drenado

Las técnicas de preprocesamiento y la extracción de características fueron aplicadas a la cuantificación de la persistencia y de la homogeneidad de dos espumas que utilizan proteínas de huevo como agente principal de espumado. La caracterización de una espuma requiere de un dispositivo y de un protocolo experimental que aseguren la reproducibilidad de la espuma. Existen dos métodos comúnmente utilizados para incorporar aire en disoluciones de proteína: mediante batido y por inyección de aire; este último fue el utilizado en este trabajo. La espuma fue creada en un dispositivo semiautomatizado de espumado descrito por Guillaume *et al.* (1993), desarrollado en el INRA (Institut National de la Recherche Agronomique), que asegura la reproducibilidad de la generación de espuma (Figura 3a). Para validar la técnica de caracterización de la espuma presentada se analizaron dos tipos de espumas que usan clara de huevo en polvo como agente de espumado. La disolución A contiene 0,6 % de clara de huevo y 3 % de azúcar; la disolución B contiene 0,9 % de clara de huevo y 3 % de azúcar.

Ambas espumas fueron generadas por inyección de aire (15 mL/min) en un dispositivo compuesto por una columna de pyrex con diámetros interno y externos de 2 y 3 cm respectivamente. Para cada espuma, el aire fue introducido hacia un volumen inicial de disolución de proteína (12 mL) a través de un disco metálico poroso (poros de 2 μm de tamaño en promedio), la inyección de aire se detuvo después de haber creado un cierto volumen de espuma. La relación entre la estabilidad de la espuma y el drenado líquido así como los cambios de estructura en las burbujas de aire fueron monitorizados simultáneamente, justo después de detener la inyección de aire. En este procedimiento, la evolución temporal de las burbujas de la espuma fue monitoreada utilizando series de imágenes adquiridas desde una cámara instalada frente a la columna. Una imagen digitalizada de la espuma generada dentro de la columna de cristal se puede apreciar en la Figura 3b donde se muestra la espuma en el inicio de la fase de drenado.

Adquisición de imágenes

Se tomaron dos secuencias de imágenes, una para cada disolución. En cada secuencia, las imágenes fueron tomadas cada 10 segundos con una cámara Philips ToUCam PCVC750K conectada al puerto USB de una PC y almacenadas en disco duro en formato TIFF con un tamaño de 640x480 píxeles y 24 bits por pulgada, en formato de color tipo RGB. La resolución de la imagen fue de 64 píxeles por milímetro.

El procesamiento de las imágenes fue realizado con el software de dominio público ImageJ versión 1.33k

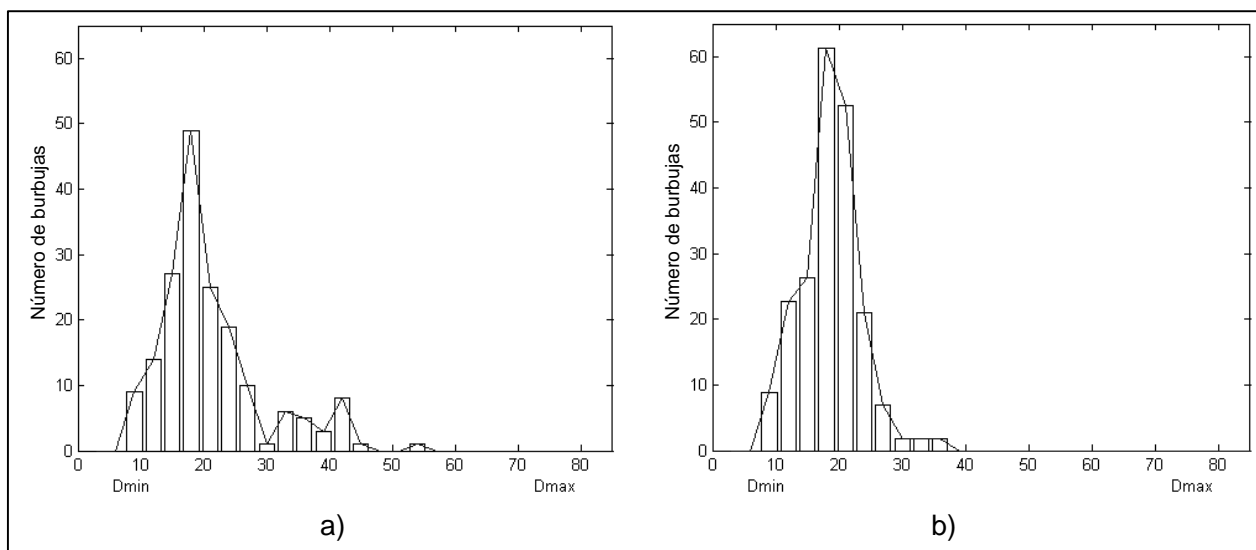


Figura 4. Histogramas de la distribución de tamaño de burbujas para el inicio del drenado, a) Disolución A, b) Disolución B.

Figure 4. Histograms of the size distribution of bubbles at the beginning of draining, a) Solution A, b) Solution B.

(Wayne Rasband, National Institutes of Health, USA) bajo Windows XP. Para conseguir las imágenes más nítidas y eliminar los efectos de la transparencia de las burbujas, la cámara fue colocada a 3 mm frente a la columna, a media altura de la espuma producida. El sistema fue iluminado desde arriba con una lámpara de 25 W ubicada lateralmente con un ángulo de 45° del eje de la columna como se muestra en el esquema de la Figura 3a. Se adaptaron dos deflectores de luz rodeando la columna, uno en la parte superior y otro en la inferior. Esta técnica de iluminación dirige la luz hacia el interior de la columna y reduce los reflejos que podrían perturbar el proceso de adquisición.

Un total de 174 imágenes fueron adquiridas a intervalos de 10 segundos. Para evitar los efectos de borde (partes más borrosas en los extremos de la columna) y la carencia de iluminación, las imágenes de las secuencias analizadas, fueron recortadas en ventanas de 227 x 352 píxeles. De esta forma, la región seleccionada de las imágenes es la mejor iluminada y está libre de distorsiones debidas a los efectos de borde de la columna de espumado. Esta selección se realizó analizando una binarización previa al preprocesamiento, como la presentada en la Figura 2a, donde se aprecian claramente los bordes de las burbujas. Todas las imágenes, 174 para cada disolución, fueron recortadas en la misma región.

La secuencia completa de 174 imágenes para cada espuma fue procesada según las etapas presentadas en la sección de procesamiento de imágenes. El tiempo de procesamiento para cada imagen fue de 5,17 seg, considerando una PC con procesador Pentium 4. Una vez que la secuencia total de imágenes fue procesada, se realizó una extracción de características de cada disolución que consiste en el número de burbujas por imagen y el tamaño (área) de cada burbuja para todas las imágenes. Esta información fue estadísticamente analizada para interpretar

los resultados y cuantificar la persistencia y la uniformidad de las espumas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las herramientas estadísticas utilizadas para obtener la uniformidad y la persistencia en este trabajo son generalmente empleadas en los estudios de granulometría de partículas sólidas y en el análisis de atomización de líquidos (Bayvel y Orzechowski, 1993).

Análisis de la uniformidad de las espumas

En el presente trabajo, la uniformidad se entiende como la variabilidad del diámetro de las burbujas en un instante dado. Idealmente, una espuma totalmente uniforme tiene todas sus burbujas con el mismo diámetro, una espuma sin uniformidad tiene todas sus burbujas con diámetro diferente. Una primera idea de uniformidad se obtiene a partir de un histograma de la distribución de tamaños. El tamaño de las burbujas es representado por el diámetro D que es estimado como el diámetro que coincide con el área de un círculo igual al área A de cada partícula detectada en la imagen, es decir:

$$D = \sqrt{\frac{4A}{P}} \quad (1)$$

La Figura 4 muestra dos histogramas de la distribución de tamaños que corresponden a la primera imagen de cada disolución.

Los diámetros mínimo D_{\min} y máximo D_{\max} considerados son 10 y 80 píxeles respectivamente. Se puede observar que ambas espumas presentan un número

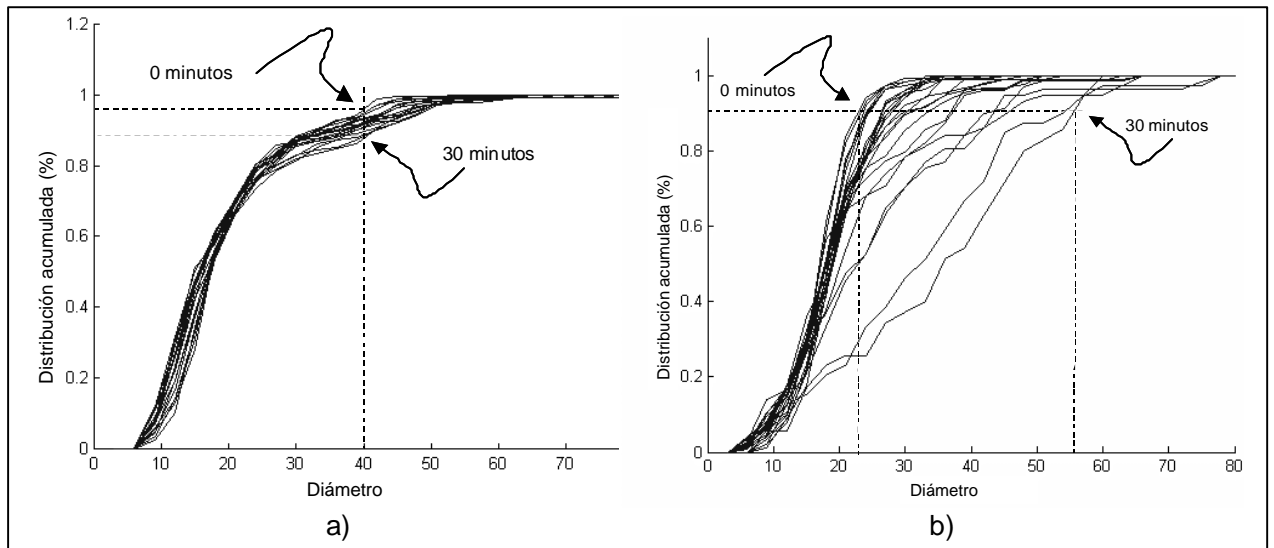


Figura 5. Distribución acumulada, a) Disolución A, b) Disolución B.

Figure 5. Accumulated distribution, a) Solution A, b) Solution B.

similar de burbujas de 10 píxeles de diámetro pero la disolución B posee un número mayor de burbujas de 20 píxeles de diámetro. Además, sólo la disolución A presenta burbujas más grandes de 40 píxeles y, en general, la disolución A posee burbujas en casi todos los intervalos de D . Aparentemente, la disolución A es la menos uniforme de las dos. Sin embargo, es necesario analizar comparativamente los histogramas correspondientes a las 173 imágenes restantes para cada disolución. Para una mejor visualización de la información de los 174 histogramas en una sola figura se utiliza la *distribución acumulada* $F(D)$ donde una curva representa la información de cada histograma. Las curvas correspondientes a las distribuciones acumuladas del diámetro de burbujas para cada espuma se presentan en la Figura 5.

Se puede observar que la espuma de la disolución A presenta curvas de distribución acumulada con pendiente similar durante todo el proceso de drenado. Lo anterior indica, según se aprecia en la Figura 5a, que aproximadamente el 10 % de burbujas (entre 0,9 y 1) tiene un diámetro superior a 40 píxeles durante todo el drenado; se pueden apreciar curvas de distribución acumulada con ángulos de inclinación similares. Por otro lado, la Figura 5b muestra que la disolución B tiene curvas de distribución acumulada con ángulos de inclinación inferiores según se avanza en el tiempo de drenado. Esto significa que al inicio del drenado el 10 % de las burbujas tiene diámetro superior a 22 píxeles y que al final del drenado, el 10 % tiene un diámetro superior a 56 píxeles.

En realidad, la información de la uniformidad de la espuma se encuentra ligada a la pendiente de las curvas de distribución acumulada. Cuando el ángulo de inclinación de la curva es cercano a 90° (pendiente casi vertical), la curva contiene un gran porcentaje de partículas

de un intervalo reducido de diámetros de burbujas (elevada uniformidad). En el caso contrario, cuando el ángulo de inclinación de la curva es cercano a 0° (pendiente casi horizontal), la curva contiene un gran porcentaje de partículas de un intervalo amplio de diámetros de burbujas (uniformidad reducida).

Por lo anterior, se introduce ahora un término que se ha llamado índice de uniformidad de la espuma (IUE), en cierta forma equivalente al descrito por Bayvel y Orzechowxki (1993), definido por la siguiente expresión:

$$FUI = \frac{\Phi(D_{0,9}) - \Phi(D_{0,1})}{\sum_{i=1}^m \Delta n_i} \quad (2)$$

Donde $F(D_{0,9})$ y $F(D_{0,1})$ son los valores correspondientes al 90 y al 10 % de la curva $F(D)$ de distribución acumulada, y $\sum_{i=1}^m \Delta n_i$ es la sumatoria del número de burbujas de los m intervalos comprendidos entre $F(D_{0,9})$ y $F(D_{0,1})$.

El IUE varía entre cero y uno sin tocar los extremos. Los valores cercanos a 0 corresponden a la uniformidad más baja y los valores cercanos a 1 corresponden a una uniformidad elevada. La Figura 6 muestra la evolución temporal del IUE correspondiente a las espumas tratadas en este trabajo.

En la Figura 6 se observa que al inicio del drenado la disolución A presenta una mejor uniformidad pero un poco antes de 300 segundos la disolución B alcanza y supera la uniformidad de la disolución A. A partir de ese instante, la uniformidad de la disolución B mejora progresivamente y pasa de 0,3 hasta 0,5 mientras que la uniformidad de la disolución A permanece en niveles entre 0,3 y 0,35. El resultado anterior permite concluir que una

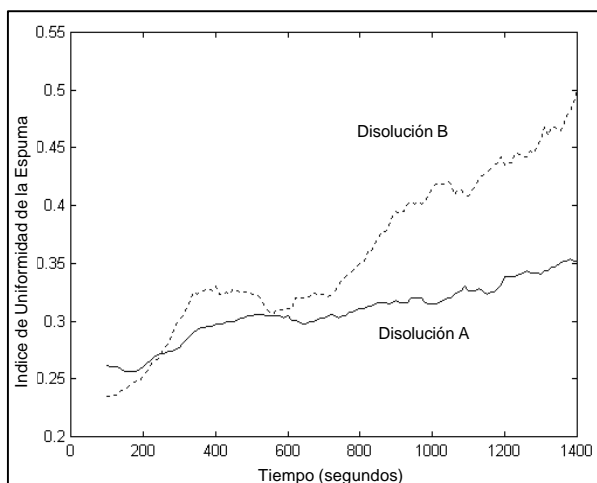


Figura 6. Evolución en el tiempo de la uniformidad para las dos disoluciones.

Figure 6. Evolution of the uniformity with time for the two solutions.

mayor cantidad de agente de espumado en la disolución B mejora considerablemente la homogeneidad de la espuma modificando su apariencia visual.

Análisis de la persistencia de las espumas

La persistencia se debe entender como una cuantificación del rompimiento y la coalescencia de las burbujas; desde el punto de vista del consumidor esto representa el tiempo que las burbujas permanecen «visibles». La variación en el tiempo del número de burbujas y de su tamaño permite la cuantificación de la persistencia.

Estadísticamente, el diámetro promedio es una cantidad convencional que caracteriza un conjunto de burbujas uniformes reemplazando al conjunto original de burbujas. Dependiendo de la forma de calcular este promedio, se representa características de diámetro, superficie o volumen de las burbujas. El diámetro promedio utilizado en este trabajo es el que caracteriza volumen y que coincide con la característica esférica de las burbujas; este diámetro es conocido como D_{30} y puede expresarse de la siguiente forma (Mugele y Evans, 1951):

$$D_{30} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^m D_i^3 \Delta n_i}{\sum_{i=1}^m \Delta n_i}} \tag{3}$$

La Figura 7a muestra la evolución del número de burbujas para ambas disoluciones mientras que la Figura 7b muestra la evolución en el tiempo del diámetro D_{30} .

En la Figura 7a se observa que ambas espumas inician con un número similar de burbujas (alrededor de 170). Al final del drenado, la pérdida de burbujas es más notoria en la disolución B que termina con alrededor de

90 contra 150 de la disolución B. Por otro lado, en la Figura 7b se observa que ambas disoluciones inician con un diámetro D_{30} también similar y cercano a 24 píxeles. Al final, el diámetro promedio de la disolución A aumenta hasta un poco más de 28 píxeles mientras que para la disolución B el incremento es mucho más considerable llegando hasta 34 píxeles.

Los resultados anteriores muestran que las burbujas de la disolución B presentan una persistencia inferior y se rompen en mayor número, sin embargo, al romperse pasan a incrementar el tamaño de las burbujas que restan. Si se toma en cuenta que la espuma de la disolución B tiende a mejorar su uniformidad se puede concluir que las burbujas que se colapsan en esta disolución son las más pequeñas. Por el contrario, en la espuma de la disolución A las burbujas pequeñas se colapsan menos y permanecen junto con las de mayor tamaño produciendo al final una espuma menos homogénea.

CONCLUSIONES

Se ha presentado una metodología que puede utilizarse como herramienta para la caracterización y cuantificación de la persistencia y de la homogeneidad, que son parámetros fundamentales para describir la apariencia de espumas. El dispositivo de espumado y drenado utilizado en la parte experimental garantiza la reproducibilidad del análisis. También se han presentado las consideraciones y técnicas de procesamiento de imágenes para la extracción automática de características de la espuma a partir de métodos de detección y conteo de burbujas.

Estas técnicas han demostrado ser suficientemente robustas ya que fueron aplicadas sin modificaciones a más de 300 imágenes. Un inconveniente del método es que la selección de la región a analizar varía de una espuma a otra y que, a pesar de basarse en el resultado de una prebinarización de la imagen, obedece a criterios de apreciación subjetiva que no pueden ser automatizados. Este inconveniente puede minimizarse si se mantienen exactamente las mismas condiciones de iluminación para todas las espumas utilizadas, lo que supone que las fuentes externas de luz deberán ser también controladas (ventanas, lámparas, etc.). Por lo anterior, se puede concluir que el sistema de iluminación utilizado para la adquisición de las imágenes juega un papel importante en la robustez del método.

En general, las técnicas de procesamiento de imágenes presentadas pueden aplicarse a la extracción de características de cualquier otro tipo de partículas semiesféricas, aglutinadas y semitransparentes. Finalmente, la interpretación de los resultados sobre la persistencia y la uniformidad deben realizarse con mayor profundidad para analizar y crear espumas que cumplan los requerimientos de un producto específico.

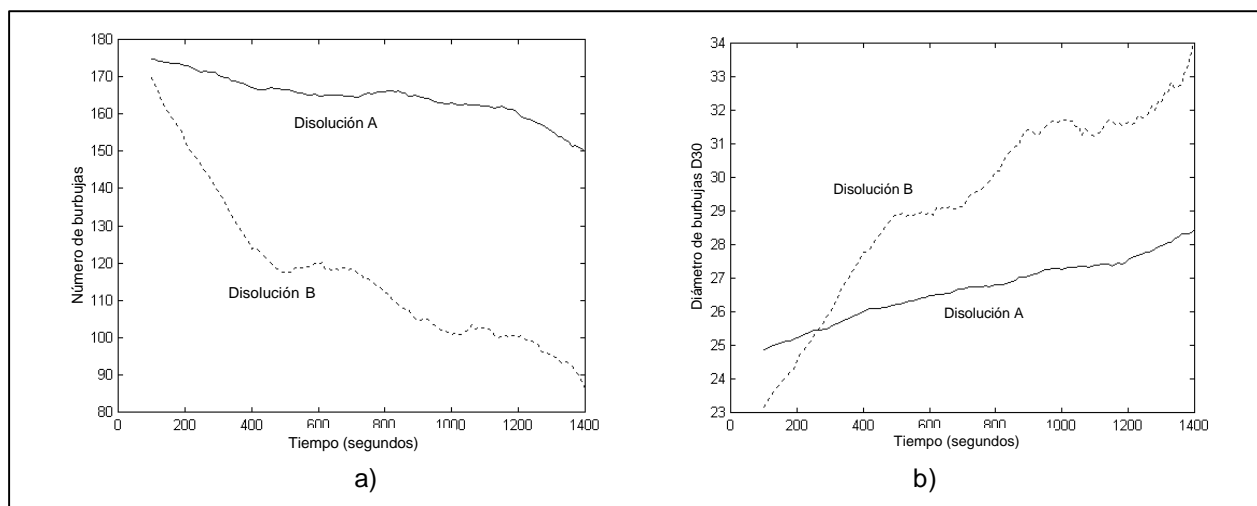


Figura 7. Comportamiento de las espumas en el tiempo, a) Número, b) Diámetro de las burbujas.

Figure 7. Behavior of foam in the time, a) Number, b) Diameter of the bubbles.

BIBLIOGRAFÍA

- Bayvel, L.; Orzechowski, Z. 1993. *Liquid Atomization*. Taylor and Francis, UK.
- Bertrand, D.; Le Guernevé, C.; Marrion, D.; Devaux, M. F.; Robert, P. 1992. Description of textural appearances of bread crumb by video image analysis. *Cereal Chemistry* **69**, 257-261.
- Campbell, G. M.; Mougeot, E. 1993. Creation and characterization of aerated food products, *Trends in Food Science and Technology* **10**, 283-296.
- Guillerme, C.; Loisel, W.; Bertrand, D.; Popineau, Y. 1993. Study of foam stability by video image analysis: relationship with the quantity of liquid in foams. *Journal of Texture Studies* **24**, 287-303.
- Hagolle, N.; Relkin, P.; Popineau, Y.; Bertrand, D. 2000. Study of the stability of egg white protein-based foams: effect of heating protein solution. *Journal of the Science of Food and Agriculture* **80**, 1245-1252.
- Ligier-Belair, G.; Marchal, R.; Robillard, B.; Vignes-Adler, M.; Maujean, A.; Jeandet, P. 1999. Study of effervescence in a glass of Champagne: frequencies of bubble formation, growth rates, and velocities of rising bubbles. *American Journal of Enology and Viticulture* **50**, 317-323.
- Mangas, J.; Moreno, J.; Rodriguez, R.; Picinelli, A.; Suárez, B. 1999. Analysis of polysaccharides in cider: their effect on sensory foaming properties. *Journal of Agriculture and Food Chemistry* **47**, 152-156.
- Marchal, R.; Tabary, I.; Valade, M.; Moncombie, D.; Viaux, L.; Robillard, B.; Jeandet, P. 2001. Effects of *Botrytis cinerea* infection on Champagne wine foaming properties. *Journal of Science of Food and Agriculture* **81**, 1371-1378.
- Mugele, R. A.; Evans, H. D. 1951. Droplet size distribution in sprays. *Industrial and Engineering Chemistry* **6**, 140-159.
- Picinelli, A.; Suárez, B.; García, L.; Mangas, J.L. 2000. Changes in Phenolic Contents during sparkling apple winemaking. *American Journal of Enology and Viticulture* **51**, 144-149.
- Prabhukumar, S.; Duraiswami, R.; Chahine, G. L. 1996. Acoustic measurement of bubble size distributions: theory and experiments. *ASME Proceedings of the Fluids Engineering Division Summer Meeting* **1**, 509-514.
- Relkin, P.; Hagolle, N.; Dalgleish, D. G.; Launay, B. 1999. Foam formation and stabilisation by pre-denatured ovalbumin. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* **12**, 409-416.
- Russ, J. 1995. *The image processing handbook*. CRC Press, USA.
- Tanner, R. D.; Yuquing, L. D.; Prokop, A. 2001. Measurement of bubble size distribution in protein foam fractionation column using capillary probe with photoelectric sensors. *Applied Biochemistry and Biotechnology* **92**, 387-404.