

Universidad Autónoma Metropolitana
Unidad Azcapotzalco

División de Ciencias Básicas e Ingeniería
Licenciatura en Ingeniería en Computación

Proyecto Tecnológico

Procesamiento Digital y Estadístico de Imágenes de
Espumas Líquidas Usadas en la Industria

Proyecto Terminal para obtener el grado de Ingeniero en Computación

Presenta:

Isidro Raúl Cano Martínez
2132000190

Asesores:

M. en C. Arturo Zúñiga López
Departamento de Electrónica

Dr. Florentino Leyte Guerrero
Gerencia de Desarrollo de Materiales y Productos Químicos
Instituto Mexicano del Petróleo

Trimestre 2017 Primavera

Agosto, 2017

Yo, Arturo Zúñiga López, y yo, Florentino Leyte Guerrero, declaro que aprobé el contenido del presente Reporte de Proyecto de Integración y doy mi autorización para su publicación en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco



Asesor

M. en C. Arturo Zúñiga López



Coasesor

Dr. Florentino Leyte Guerrero

Yo, Isidro Raúl Cano Martínez, doy mi autorización a la Coordinación de Servicios de Información de la Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco, para publicar el presente documento en la Biblioteca Digital, así como en el Repositorio Institucional de UAM Azcapotzalco



Alumno

Isidro Raúl Cano Martínez

Resumen

En el presente Proyecto, se demuestra el desarrollo, funcionalidad y resultados de una herramienta computacional que se encarga de la adquisición de imágenes de espumas para determinar su textura y, mediante diferentes parámetros de entrada, obtener su calidad. Para la caracterización de la textura, se emplea el Procesamiento Digital de Imágenes con el fin de mejorar una imagen mediante diferentes algoritmos contenidos en el *ToolBox* de Matlab. Esta investigación, junto con diferentes metodologías que hacen posible la implementación de un sistema capaz de caracterizar una espuma.

Para lograr este desarrollo, ha sido necesario emplear técnicas incluidas en Matlab, como la *Transformada de Hough*, la cual tiene como finalidad la detección de círculos, denotados específicamente para este Proyecto como burbujas esféricas ubicadas en un plano bidimensional o imagen, y otros algoritmos de reconocimiento de objetos que se orientan al reconocimiento de cuerpos geométricos irregulares, con el objeto de poder ayudar a la identificación de burbujas poliédricas. Para hacerlo posible, previamente se definen métodos durante el desarrollo, a fin de lograr un mejoramiento en la imagen, como lo son los filtros para la ecualización del brillo en el fondo de la imagen, esto para resaltar objetos poco visibles y filtros orientados a la eliminación o atenuación del ruido gráfico, con el objetivo de mejorar las imágenes y minimizar el error de detección y lograr obtener certeros resultados.

A partir del desarrollo de este software se obtiene una gama de resultados, tanto en la detección y cuantificación de las burbujas, como en su caracterización en términos estadísticos, esto lo define como un software completo y confiable. Con relación a los resultados, se cataloga como una herramienta óptima y eficiente. Sin embargo, es importante mencionar que no es efectivo en su totalidad, puesto que existen mínimos errores en el procesamiento, como lo son la no detección de burbujas y la detección de objetos que no son burbujas. No obstante, es posible la identificación de un gran porcentaje de la población, haciéndolo confiable estadísticamente. Además, se clasifica abiertamente como un sistema nuevo en el campo de las espumas, de tal forma que ha sido evaluado y valorado por distintos investigadores para ser incluido en el desarrollo de un sistema óptico-mecánico, del que se ha realizado la solicitud de una patente.

Agradecimientos

Especialmente a mis padres, Roberto y María, de quienes, poco a poco, sus consejos voy comprendiendo. “Desde la lejana cercanía, en mi mente, corazón y alma los contemplo, sin perder de vista, su grandiosa valentía”.

A mis hermanos, con quienes alegremente, mi niñez disfruté. De nada me arrepiento.

A una pequeña y grande mujer, Itzel es nombrada. Por tanta paciencia, comprensión y alegría, Gracias.

A un grupo de desconocidos amigos, quienes su apoyo incondicional, sin saberme, me brindaron, aquellos mismos que de mis tinieblas y temores, poco a poco, me han desviado. Mencionar a cada uno quisiera, sin embargo, miedo tengo de alguno no recordar y, un leve resentimiento, incitar...

A mis asesores, Dr. Florentino Leyte Guerrero y Profesor Arturo Zúñiga López. Sin aquellos grandes expertos, nada hubiese logrado.

Un agradecimiento especial al Dr. Florentino, quien mucho me ha enseñado, apoyado y guiado. Sin duda, respeto le debo, por tanto, Gracias.

Índice de Figuras

Figuras del Capítulo 3

<i>Figura 3. 1. Representación de burbujas de espumas con morfología a) esférica y b) poliédrica. A las espumas así formadas también se les conoce como espumas húmedas y secas, respectivamente</i>	5
<i>Figura 3. 2. Estabilidad de una espuma para una altura h en centímetros y un tiempo t en horas</i>	5
<i>Figura 3. 3. Distribución de tamaños de burbuja antes y después de un proceso inducido de ruptura de espuma</i>	7

Figuras del Capítulo 5

<i>Figura 5. 1. Representación del color de una imagen digital</i>	11
<i>Figura 5. 2. Imagen capturada por el autor de este Proyecto</i>	12
<i>Figura 5. 3. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica <i>imadjust</i> en la imagen. a) Imagen en escala de grises b) Imagen con mejoramiento de intensidad</i>	13
<i>Figura 5. 4. Al aplicar la técnica <i>imadjust</i> en la imagen se visualiza una distribución de tonos en el histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con mejoramiento de los valores de intensidad</i>	13
<i>Figura 5. 5. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica <i>histeq</i> en la imagen. a) Imagen en escala de grises b) Imagen con distribución del brillo en toda la imagen</i>	14
<i>Figura 5. 6. Al aplicar la técnica <i>histeq</i> en la imagen se visualiza una distribución de tonos de grises en todo el histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con distribución de los valores en todo el rango</i>	15
<i>Figura 5. 7. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica <i>adapthisteq</i> en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con distribución del brillo en diferentes regiones</i>	16
<i>Figura 5. 8. Al aplicar la técnica <i>adapthisteq</i> en la imagen se visualiza la distribución de tonos de grises en diferentes regiones del histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con distribución de valores</i>	16
<i>Figura 5. 9. Visualización del efecto que provoca al aplicar el filtro <i>imfilter</i> en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con promedio en los valores</i>	17
<i>Figura 5. 10. Visualización del efecto que provoca al aplicar el filtro <i>medfilt2</i> en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con filtro <i>medfilt2</i> aplicado</i>	18
<i>Figura 5. 11. Visualización del resultado al binarizar la imagen con la técnica <i>im2bw</i> con un umbral con valor igual a 0.6. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen binarizada</i>	19
<i>Figura 5. 12. Visualización del resultado al limpiar los bordes de la imagen con la técnica <i>imclearborder</i>. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con limpieza de bordes</i>	20
<i>Figura 5. 13. Visualización del resultado al engrosar los objetos de la imagen con la técnica <i>imdilate</i>. a) Imagen binaria. b) Imagen con engrosamiento de objetos</i>	21
<i>Figura 5. 14. Visualización del resultado al eliminar objetos de la imagen con la técnica <i>bwareaopen</i>. a) Imagen binaria. b) Imagen con objetos que contienen mayor o igual a 2000 pixeles</i>	22
<i>Figura 5. 15. Visualización del resultado al llenar los huecos contenidos en cada uno de los objetos de la imagen con la técnica <i>imfill</i>. a) Imagen binaria. b) Imagen huecos rellenados</i>	23
<i>Figura 5. 16. Representación de un objeto O contenido en una imagen binaria</i>	23
<i>Figura 5. 17. Visualización de los puntos para el objeto O en una imagen binaria</i>	23
<i>Figura 5. 18. Localización de cada uno de los puntos para los límites de O</i>	24
<i>Figura 5. 19. Visualización del resultado al invertir los colores de la imagen usando la técnica <i>imcomplement</i>. a) Imagen binaria. b) Imagen con colores invertidos</i>	25
<i>Figura 5. 20. Imagen de esferas de hidrogel, capturada por el autor de este Proyecto</i>	25
<i>Figura 5. 21. Visualización del resultado de la búsqueda de círculos en una imagen usando la técnica <i>imfindcircles</i>. a) Imagen original. b) Imagen con círculos circunscribiendo los objetos encontrados</i>	26

Figuras del Capítulo 6

<i>Figura 6.1. Diagrama de flujo para la funcionalidad de FoamTexQu</i>	27
--	----

Figura 6. 2. Recorte de la imagen para disminuir el efecto de aberración	31
Figura 6. 3. Imagen con tamaño original	32
Figura 6. 4. Resultado de la función recortar_Imagen	32
Figura 6. 5. Mejoramiento del contraste, usando la técnica adapthisteq.....	34
Figura 6. 6. Resultado final de la función mejorar_contraste. Imagen binaria con atenuación del ruido gráfico.....	34
Figura 6. 7. Imagen binaria de burbujas poliédricas a procesar	36
Figura 6. 8. Visualización del adelgazamiento de las fronteras de los objetos.....	36
Figura 6. 9. imC, parámetro que devuelve la función mejorar_contraste.....	37
Figura 6. 10. imB, imagen que devuelve mejorar_contraste	38
Figura 6. 11. Longitud máxima de los puntos de un objeto.....	38
Figura 6. 12. Imagen de entrada para la función burbujas_poliedricas	40
Figura 6. 13. Resultado de la técnica adapthisteq y de la función recortar_Imagen, también es el parámetro de retorno por la función.....	41
Figura 6. 14. Limpieza de bordes y binarización de la imagen (imclearborder e im2bw).....	41
Figura 6. 15. Resultado de invocar la función disminuir_borde_objeto	42
Figura 6. 16. Resultado final mediante imfill y bwareaopen	42
Figura 6. 17. Círculo de escala de referencia con 0.6mm de diámetro.....	43
Figura 6. 18. Funcionalidad del proceso para la imagen con escala de referencia.....	43
Figura 6. 19. Diagrama de flujo para la caracterización de burbujas esféricas	45
Figura 6. 20. Diagrama de flujo para la caracterización de burbujas poliédricas.....	46
Figura 6. 21. Gráfica de la textura de una espuma	47

Figuras del Capítulo 7

Figura 7. 1. Diseño de la interfaz del software FoamTexQu.....	48
Figura 7. 2. Creación de las carpetas.....	49
Figura 7. 3. Selección de las opciones de resultados.....	50
Figura 7. 4. Opciones de la nueva interfaz presentada.....	50
Figura 7. 5. Interface para seleccionar el diámetro máximo y mínimo.....	51
Figura 7. 6. Medición de las burbujas	52
Figura 7. 7. Cuadro de diálogo.....	52
Figura 7. 8. Interface sin rutas seleccionadas.....	53
Figura 7. 9. Interface con de rutas seleccionadas	53
Figura 7. 10. Búsqueda del círculo de escala de referencia.....	53
Figura 7. 11. Porcentaje del procesamiento para la imagen 1.....	54
Figura 7. 12. Escribiendo datos en archivo Excel.....	54
Figura 7. 13. Fin del procesamiento.....	54
Figura 7. 14. Carpeta con resultados	55
Figura 7. 15. Contenido de la carpeta generada para la imagen 1	55
Figura 7. 16. Detección de escala de referencia	56
Figura 7. 17. Burbujas detectadas en la imagen 1.....	56
Figura 7. 18. Burbujas detectadas en la imagen 2.....	57
Figura 7. 19. Burbujas detectadas en la imagen 3.....	57
Figura 7. 20. Burbujas detectadas en la imagen 4.....	58
Figura 7. 21. Burbujas detectadas en la imagen 5.....	58
Figura 7. 22. Histograma en 2D de cada una de las imágenes	59
Figura 7. 23. Histograma en 3D de cada una de las imágenes	59
Figura 7. 24. Resultados de las burbujas detectadas para la imagen 1	60
Figura 7. 25. Generar reporte.....	61
Figura 7. 26. Campos de información para generar reporte.....	61
Figura 7. 27. Llenado de campos	62
Figura 7. 28. Hoja 1 del reporte generado.....	62
Figura 7. 29. Hoja 2 del reporte generado.....	63
Figura 7. 30. Detección de escala de referencia	64
Figura 7. 31. Burbujas detectadas en la imagen 1.....	65
Figura 7. 32. Burbujas detectadas en la imagen 2.....	65
Figura 7. 33. Burbujas detectadas en la imagen 3.....	66

<i>Figura 7. 34. Burbujas detectadas en la imagen 4.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 7. 35. Burbujas detectadas en la imagen 5.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 7. 36. Histograma en 2D de cada una de las imágenes</i>	<i>67</i>
<i>Figura 7. 37. Histograma en 3D de cada una de las imágenes</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7. 38. Resultados de las burbujas detectadas para la imagen 1</i>	<i>68</i>
<i>Figura 7. 39. Hoja 1 del reporte generado.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 7. 40. Hoja 2 del reporte generado.....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 7. 41. Ejemplo de una espuma contenida en un cilindro, con sus respectivos volúmenes</i>	<i>71</i>
<i>Figura 7. 42. Interfaz para el cálculo de calidad de una espuma</i>	<i>71</i>
<i>Figura 7. 43. Llenado de los campos correspondientes</i>	<i>72</i>
<i>Figura 7. 44. Resultado de los datos ingresados</i>	<i>72</i>

Contenido

Índice de Figuras	iii
Figuras del Capítulo 3	iii
Figuras del Capítulo 5	iii
Figuras del Capítulo 6	iii
Figuras del Capítulo 7	iv
Capítulo 1. Introducción	1
Capítulo 2. Justificación.....	3
Capítulo 3. Antecedentes	4
3.1. Espumas	4
3.1.1. Descripción	4
3.1.2. Estabilidad y Calidad de una Espuma.....	5
3.1.3. Textura de una Espuma.....	6
3.1.4. Aplicaciones de las Espumas	7
3.1.4.1. Espuma en los Alimentos.....	7
3.1.4.2. Uso Práctico de la Espuma.....	7
Capítulo 4. Objetivos	9
4.1. Objetivo General	9
4.2. Objetivos Específicos	9
Capítulo 5. Marco Teórico	10
5.1. Procesamiento de Imágenes Digitales	10
5.1.1. Representación de una Imagen Digital	10
5.1.2. Mejoramiento del Contraste de una Imagen.....	11
5.1.3. Filtros en Imágenes.....	11
5.1.4. Imágenes Binarias.....	12
5.1.5. Funciones de Matlab en el Procesamiento de Imágenes	12
5.1.5.1. imadjust	12
5.1.5.2. histeq	14
5.1.5.3. adapthisteq	15
5.1.5.4. imfilter	16
5.1.5.5. medfilt2.....	17
5.1.5.6. im2bw	18
5.1.5.7. imclearboder.....	19

5.1.5.8. imdilate	20
5.1.5.9. bwareaopen	21
5.1.5.10. imfill	22
5.1.5.11. bwboundaries	23
5.1.5.12. imcomplement.....	24
5.1.5.13. imfindcircles.....	25
Capítulo 6. Desarrollo del Proyecto	27
6.1. Funciones	28
6.1.1. Función un_pixel_a_area_milímetros_cuadrados	28
6.1.2. Función pixeles_a_milímetros	28
6.1.3. Función datos_estadísticos	29
6.1.4. Función <i>recortar_Imagen</i>	30
6.1.5. Función mejorar_contraste.....	32
6.1.6. Función disminuir_borde_objeto	34
6.1.7. Función burbujas_esfericas	36
6.1.8. Función burbujas_poliédricas.....	38
6.2. Copiado de Imagen de ruta_1 a ruta_2	42
6.3. Proceso de Imagen con Escala de Referencia	43
6.4. Creación de Carpeta y Almacenamiento de Imágenes	44
6.5. Morfología de Burbujas	44
6.5.1. Copiado de Imagen de ruta_1 a ruta_2	44
6.5.2. Proceso Burbujas Esféricas	45
6.5.3. Proceso Burbujas Poliédricas	46
6.6. Creación de Histograma.....	47
Capítulo 7. Resultados	48
7.1. Análisis de Imágenes para Espumas con Estructura Esférica	49
7.2. Análisis de Imágenes para Espumas con Estructura Poliédrica	64
7.3. Cálculo de la Calidad de una Espuma	70
Capítulo 8. Análisis y Discusión de Resultados.....	73
8.1. Detección de Burbujas con Morfología Esférica y Poliédrica	73
8.2. Datos Estadísticos de las Burbujas Esféricas y Poliédricas	74
8.2.1. Histograma y Reporte para Burbujas Esféricas	74
8.2.2. Histograma y Reporte para Burbujas Poliédricas	74
Capítulo 9. Conclusiones	75

Capítulo 10. Referencias Bibliográficas	77
Referencias del Capítulo 1	77
Referencias del Capítulo 2	77
Referencias del Capítulo 3	77
Referencias del Capítulo 5	78
Anexo 1	79

Capítulo 1. Introducción

Las espumas húmedas son sistemas de dispersión coloidal, en donde su elaboración conlleva mezclar un líquido (fase continua) y un gas (fase dispersa) [1.1]. Cuando estas dos fases se combinan entre sí, forman burbujas de gas dentro del líquido, en las que sus tamaños de radio, en espumas industriales, comúnmente varían de milímetros hasta el orden de micrómetros y en algunos casos hasta nanómetros. Su estudio ha sido útil para muchas aplicaciones en diferentes campos de la industria, por ejemplo, en el medio ambiente, biología, medicina, producción de petróleo, etc., no obstante, su diversidad en todas ellas se analizan características comunes que incluyen: la estabilidad, la calidad y la textura, y por parte de las burbujas contenidas se estudia su morfología¹ y morfometría², entre otras.

La estabilidad de una espuma se evalúa desde el tiempo de su elaboración hasta el momento de su colapso total [1.2]. La calidad está relacionada con la cantidad de volumen de gas y líquido que contiene una espuma y está dada por la relación que existe entre el volumen de la fase gaseosa de una espuma y el volumen total de la espuma [1.3], este último es la suma del volumen del gas y líquido, y se expresa en porcentaje. Comúnmente, la textura se entiende como una apariencia superficial en el sentido físico, que presenta la superficie de un objeto, mostrando así su suavidad o rugosidad. En términos de las espumas, sin embargo, las características que incluye la *textura* son:

- a) la *morfología* de las burbujas,
- b) su *distribución de tamaños* clasificada típicamente en: dispersión monodispersa³ o polidispersa⁴, y
- c) el *tamaño promedio* de ellas

Además, la textura de la espuma también está dada por el número de lamelas⁵ contenidas por unidad de volumen [1.4]. Muchas compañías que trabajan con espumas líquidas tanto en su elaboración como en su aplicación se basan en su textura para poder estimar su calidad y estabilidad, esto con el fin de conocer si la espuma producida presenta características convenientes para los fines que se desean utilizar.

Debido a que día con día se crean nuevas técnicas para elaborar espumas, es necesario desarrollar herramientas de cómputo que permitan evaluar sus características y/o comportamiento bajo condiciones especiales, por la relevancia que tienen estos sistemas, en este Proyecto se desarrolló un programa de cómputo o software basado en el *Procesamiento*

¹ *Determinación de las características de forma del objeto.*

² *Determinación de las características dimensionales del objeto.*

³ *La distribución de tamaños de las burbujas es poco variable en una espuma.*

⁴ *La distribución de tamaños de las burbujas es amplia en una espuma.*

⁵ *Interface líquida que existe entre la fase de gas y la fase continua, esta interface actúa como separadora entre las burbujas [1.5].*

de Imágenes Digitales de espumas húmedas para determinar algunas características relevantes de ellas, tales como: la textura y calidad.

Capítulo 2. Justificación

La aplicación de las espumas en los distintos campos de la industria es vasta, algunos de ellos fueron mencionados en la introducción, pero todas las espumas tienen en común que, el estudio de sus características es muy similar sino el mismo. Algunos tipos de espumas pueden servir como transportadoras de objetos pequeños, por ende, un campo de aplicación es en la perforación de pozos, pues en esta área actúan como portadoras de detritus de roca, por ello, se desean espumas con alta viscosidad y estabilidad para que al momento de ser usadas no sean sensibles al colapso. No obstante, antes de su uso es necesario evaluar sus características como la textura, calidad y estabilidad para formar criterios acerca de su comportamiento. Por ejemplo, para este campo, si una espuma se ha estudiado y los resultados obtenidos antes mencionados presentan distribución de burbujas predominantemente monodispersa, alto porcentaje de calidad y un largo tiempo de estabilidad, entonces se ha identificado una espuma viable para este uso.

Sin embargo, a causa de que no existen herramientas computacionales orientadas al procesamiento de imágenes de espumas líquidas y a que tampoco existen métodos confiables en la medición de su textura [2.1], es necesario el desarrollo y la implementación de un conjunto de herramientas orientadas a este campo. Por lo tanto, en este Proyecto se desarrolló un programa de cómputo que, a partir de una micrografía⁶ dada, permite la identificación, detección y cuantificación de las burbujas contenidas en una muestra de espuma, también permite determinar la dispersión de los tamaños de estas, puesto que estos parámetros, junto con la morfología de la burbuja, determinan su textura. Aunado a ello también contribuye a evaluar y determinar otra característica como es la calidad de medios húmedos espumados, esto con el fin de que el operador determine en qué campo de la industria podrían usarse las espumas analizadas y para qué aplicaciones son viables. El nombre técnico de la herramienta computacional desarrollada es **FoamTexQu**, donde **Foam**, hace referencia en inglés a *Foam*, traducida como *Espuma*, en español; **Tex**, hace referencia en inglés a *Texture*, traducida como *Textura*, en español; y **Qu**, hace referencia en inglés a *Quality*, traducida como *Calidad*, en español.

⁶ Imagen de objetos pequeños que no se pueden observar a simple vista, en el rango de los micrómetros, obtenida con cámaras de alta resolución o microscopios.

Capítulo 3. Antecedentes

3.1. Espumas

3.1.1. Descripción

Las espumas son sistemas de dispersión coloidal donde existe la fase líquida y la fase gaseosa (Figura 3.1). Cuando se mezclan estas fases, la fase gaseosa llega a ser una colección de burbujas dispersas en el líquido [3.1]. Al inicio de la espuma, la morfología de las burbujas es esférica, pero cambia su estructura con respecto al tiempo. Cuando una burbuja cambia de esférica a poliédrica, se debe al drene del líquido de la espuma por la acción de la gravedad y a la ascendencia del gas debido a la diferencia de densidades de las dos fases, el tiempo que tarda una burbuja en cambiar su morfología también se debe a la viscosidad del líquido. En este ámbito, los expertos han considerado dos grandes grupos de espumas de acuerdo con la cantidad de líquido contenido: las espumas húmedas (Figura 3.1a) y las espumas secas (Figura 3.1b) [3.2]. Las industrias que elaboran y/o emplean espumas para diferentes aplicaciones, buscan técnicas para caracterizarlas, en términos de *espumabilidad* (capacidad para hacer espuma de un volumen líquido dado) la estabilidad (capacidad de una espuma para mantener su estructura con el tiempo), calidad (relación volumen de gas/volumen total), textura y otras de sus propiedades características como resistividad eléctrica o su conductividad. En otros casos se busca caracterizarlas para evitar que se produzcan, para controlar su producción o para eliminarlas.

Algunos estudios sobre las propiedades de espumas señalan que hay ciertas condiciones básicas para formar buenas espumas [3.3], [3.4]:

- i. Agua limpia.
- ii. Concentración consistente de los agentes espumantes.
- iii. Suficiente energía para crear pequeñas burbujas en la espuma.

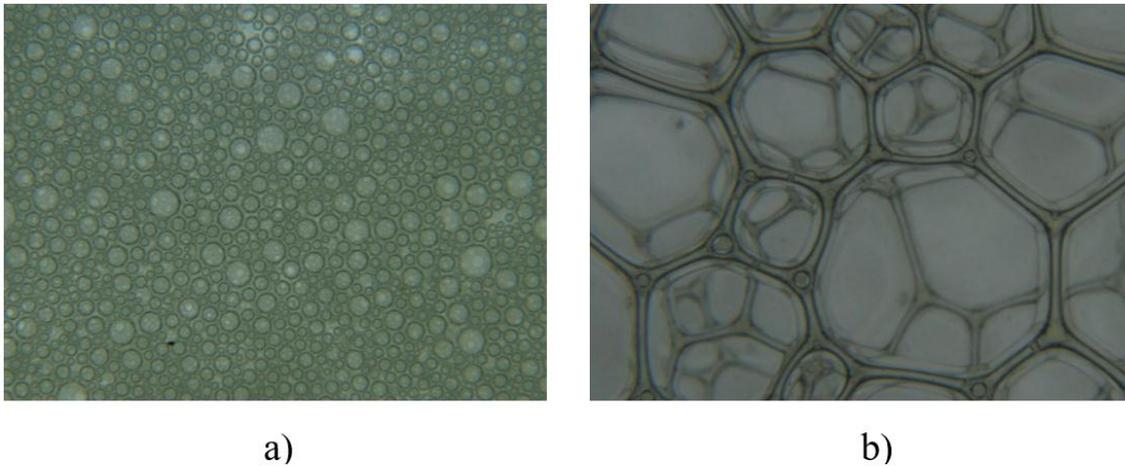


Figura 3. 1. Representación de burbujas de espumas con morfología a) esférica y b) poliédrica. A las espumas así formadas también se les conoce como espumas húmedas y secas, respectivamente

3.1.2. Estabilidad y Calidad de una Espuma

La estabilidad de una espuma se puede definir cualitativamente como la evolución de su estructura con el tiempo y se evalúa como el tiempo que tarda una columna de espuma en ser colapsada [3.5] y su medición se representa gráficamente en términos del tiempo y de su altura (Figura 3.2). Estos términos pueden ser medidos en un recipiente cilíndrico, y el punto inicial se toma desde que esta fue formada hasta su colapso, tomando un intervalo de tiempo como referencia. El tiempo de colapso puede variar desde segundos, minutos, horas o hasta semanas y esto se debe a las propiedades surfactantes del líquido. A continuación, se muestra un ejemplo gráfico de la estabilidad de una espuma.

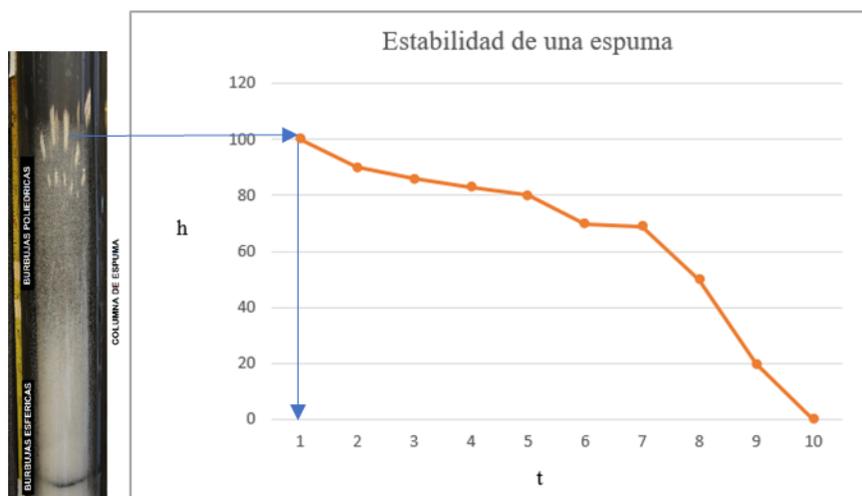


Figura 3. 2. Estabilidad de una espuma para una altura h en centímetros y un tiempo t en horas

La calidad Q de una espuma, es la relación entre el volumen de gas existente en una espuma y el volumen total de ella, y se expresa en porcentajes, para conocerla se toman en cuenta los siguientes tres parámetros: su volumen total V_T , el volumen del gas V_g y el volumen del líquido V_l , donde V_T es

$$V_T = V_g + V_l$$

Con la información previa, Q se calcula con la siguiente fórmula

$$Q = [(V_T - V_l) / V_T] \times 100$$

Las referencias [3.6] y [3.7], coinciden en afirmar que, dependiendo de su calidad, las espumas se definen como:

- a) Líquidos burbujeantes, $Q < 60\%$
- b) Espumas húmedas, $60\% < Q < 94\%$
- c) Espumas secas, $94\% < Q < 97.5\%$
- d) Aerosoles $97.5\% < Q$

3.1.3. Textura de una Espuma

La textura de una espuma es una característica de gran importancia en su conocimiento y manejo, y se conoce a partir de la *morfología*, la *distribución de tamaños* y el *tamaño promedio* de sus burbujas. Para las industrias que tratan directa o indirectamente con las espumas, es crucial conocer estas características, ya que en su elaboración y/o destrucción la textura, junto con la estabilidad y calidad, toma un papel importante, puesto que a partir de esta se puede determinar en qué área de la industria y/o en qué producto es viable su aplicación o su desecho. En efecto, a partir de las propiedades obtenidas de la textura de espumas:

- a) Se puede determinar el estado de avance en el drenaje de la espuma a partir de la morfología de sus burbujas y por ende su estabilidad potencial.
- b) Se tiene una idea de su estabilidad a partir de la forma y tamaño de las burbujas en la espuma.
- c) Se puede hacer una estimación rápida de la calidad de espumas a partir de imágenes de ellas, considerando el área proyectada de sus burbujas con respecto al área total de donde se encuentran.
- d) Es posible realizar estudios comparativos del efecto de otras variables en espectros de tamaño de burbujas.
- e) Es factible diseñar controles de experimentos a partir de la distribución de tamaños y tamaño medio de burbujas en las espumas.

Un ejemplo de lo anterior se muestra en la Figura 3.3, donde se muestra el efecto de procesos inducidos de ruptura de espuma a partir de los espectros de tamaño de burbuja, obsérvese

que el número medio de burbujas después del proceso se reduce, pero se conserva su tamaño medio, evidenciando destrucción de burbujas.

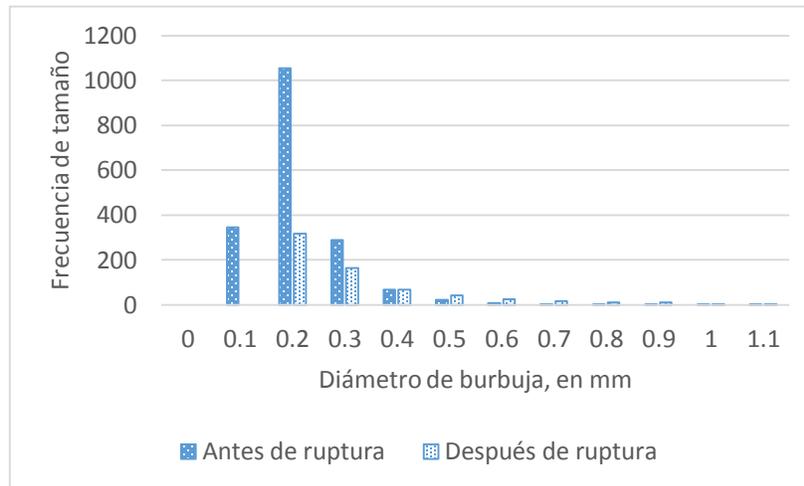


Figura 3. 3. Distribución de tamaños de burbuja antes y después de un proceso inducido de ruptura de espuma

3.1.4. Aplicaciones de las Espumas

3.1.4.1. Espuma en los Alimentos

Los alimentos son nutrientes que proporcionan energía y muchas veces estos son consumidos por su apariencia y elegancia, además de su sabor. Las bebidas y alimentos que contienen espuma suelen presentar buen aspecto y minimizan la cantidad que es suministrada, de esta forma aumentando el volumen del alimento con la ayuda de inserción de gas. En este campo de aplicación, la textura de la espuma juega un papel muy importante, ya que, debido a la dispersión y morfología de las burbujas se mejora tanto su apariencia física del alimento como el rendimiento de este. [3.8]

- Entre los Alimentos que incluyen espumas se encuentran:
 - Pan
 - Cerveza
 - Café
 - Crema
 - Comida Ligera

3.1.4.2. Uso Práctico de la Espuma

El campo de aplicaciones de las espumas para uso industrial o doméstico es amplio, existen espumas sólidas y líquidas, y ambas presentan propiedades particulares, tales como la dureza o suavidad, aislantes en contra del calor, frío o sonido, y pueden ser pesadas o ligeras. Las

burbujas contenidas en ellas generan alto volumen y pueden actuar como grandes almacenes de gas o cualquier otro material.

Cuando se habla de las espumas sólidas, se piensa en materiales ligeros y que presentan celdas o burbujas por donde puede fluir el gas o el líquido. No obstante, una aplicación relevante es cuando se desea minimizar el eco del sonido dentro de un cuarto, esto se logra mediante la elaboración y aplicación de un material sólido espumoso, pero con celdas de gas interconectadas entre sí, ya que cuando las ondas del sonido viajan y chocan con dicho material, la función de sus celdas es absorber el sonido y evitar el mayor eco posible.

La característica de las espumas líquidas es que son materiales que continuamente están cambiando sus características y en este sentido son dinámicos. Una aplicación doméstica de espumas es en las cremas de afeitar. Cuando se desea afeitar la barba, no es posible solo con ayuda del agua, debido a su falta de capacidad para formar espumas. La espuma de afeitar en esta aplicación tiene gran relevancia para lubricar el contacto entre la piel y la navaja, por esta razón es importante crear espumas estables y con textura uniforme. La función de las cremas de afeitar es suavizar la barba y mantenerla húmeda por un largo tiempo, para que su corte sea sencillo y flexible.

Para resumir las aplicaciones tanto de las espumas sólidas como líquidas, es importante tener en cuenta la importancia que tiene cada una de sus características, principalmente la textura, calidad y estabilidad. [3.8]. Otras aplicaciones incluyen:

- Jabones, shampoos, Cremas de Afeitar, medicamentos, etc.
- Plásticos, elementos aislantes, amortiguadores, lubricantes, etc.
- Espumas para prevenir y combatir fuegos
- Perforación de Petróleo, producción mejorada y control de la producción.

Capítulo 4. Objetivos

4.1. Objetivo General

- Desarrollar una herramienta computacional para analizar y evaluar la morfología y la morfometría de las burbujas en las espumas húmedas, por medio del procesamiento digital de imágenes.

4.2. Objetivos Específicos

- Realizar un mejoramiento de contraste en cada imagen.
- Identificar y ubicar los bordes de las burbujas por cada imagen.
- Calcular los diámetros de las burbujas identificadas, en pixeles.
- Desarrollar un algoritmo para la calibración y medición de las burbujas en el Sistema Internacional de Medidas, de acuerdo con una escala de referencia.
- Determinar la estadística de las muestras de espuma con base en los diámetros de cada burbuja.
- Diseñar e implementar un módulo para calcular la calidad de una espuma, de acuerdo con un conjunto de datos.
- Realizar un reporte con base en los resultados obtenidos.

Capítulo 5. Marco Teórico

En este capítulo se plasman los conceptos más relevantes del *Procesamiento de Imágenes Digitales* para tener una idea más clara de los pasos y técnicas usadas en la *Metodología*. Cabe mencionar que, la implementación de la herramienta computacional llamada *FoamTexQu* se desarrolló en el ambiente de programación de Matlab.

5.1. Procesamiento de Imágenes Digitales

El procesamiento de imágenes digitales o también conocido como *DIP (Digital Image Processing)*, por sus siglas en inglés), en la actualidad es de gran importancia, ya que con el tratamiento de imágenes se han logrado automatizar muchas tareas visuales que el ojo humano no alcanza a percibir, detectar o analizar, puesto que son análisis con alta complejidad, el ser humano se ha visto en la necesidad de crear nuevas herramientas computacionales que contribuyan a resolver tareas cada vez con mayor complejidad. Las imágenes digitales pueden ser definidas como un plano bidimensional, en el que los valores de sus colores están contenidos en tres matrices, cada una de tamaño $w \times h$, donde w se define como el ancho o columnas y h la altura o filas de la imagen digital. Los valores que contiene esta matriz son valores finitos y cada uno de sus elementos se define como un pixel. Para este Proyecto, en las imágenes que son tratadas para el procesamiento, cada pixel tiene un valor entero y perteneciente al rango de 0 a 255, donde el valor 0 define un pixel con color totalmente negro y el valor 255 un color totalmente blanco, para la imagen. Existen muchas técnicas para tratar imágenes digitales, sin embargo, el objeto principal del uso del *DIP* para este Proyecto es la manipulación de los pixeles con el fin de mejorar el contraste de una imagen, aplicar filtros para la eliminación del ruido gráfico y detectar formas de objetos con el fin de obtener resultados que contribuyan a la investigación del comportamiento de las espumas líquidas.

5.1.1. Representación de una Imagen Digital

Para poder representar una imagen digital a color, es importante tener en cuenta de dónde provienen los colores y cómo se forman. Como se sabe, los colores que visualizamos día con día son una mezcla de los tres colores primarios, *Rojo, Verde y Azul* ó también representados como *RGB (Red, Green y Blue)*, por sus siglas en inglés). Para formar una imagen digital a color, se ha tomado el mismo principio, la combinación de estos, sin embargo, para su representación computacional ha sido de gran importancia emplear tres matrices con las mismas dimensiones que contiene la imagen, cada una de ellas pertenece a los colores primarios, en donde el valor de sus elementos pertenece al rango de 0 a 255. Las superposiciones de los tonos de grises forman un espectro de colores. La Figura 5.1 muestra cómo se yuxtaponen las matrices para la formación de una imagen a color así como la

correspondencia de sus píxeles, para esta representación gráfica el punto $P(i, j)$ corresponde a un píxel y está en la misma posición en cada matriz [5.1].

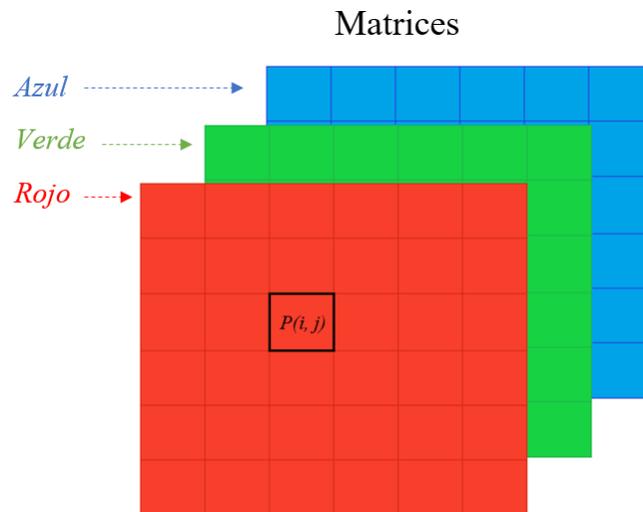


Figura 5. 1. Representación del color de una imagen digital

5.1.2. Mejoramiento del Contraste de una Imagen

El mejoramiento del contraste de una imagen consiste en aquellas acciones que se le aplican con el objetivo de extraer información y resolver un problema, por esta razón, este campo es de gran utilidad en casi todas las aplicaciones del *DIP*. Para llevarlo a cabo, existen muchas técnicas, una de ellas es la ecualización del histograma, ya que se pretende producir una imagen con un histograma uniforme, es decir, distribuir los tonos de gris; no obstante, la función del mejoramiento del contraste es controlar el brillo de una imagen para resaltar objetos que no se pueden observar claramente, con el fin de que el programador logre extraer la mayor información posible y poder trabajar con ella [5.2].

5.1.3. Filtros en Imágenes

Los filtros son una técnica del preprocesamiento de imágenes que sirven para descartar la mayor cantidad de ruido posible en una imagen, ya que el ruido es aquella información no deseada o que distorsiona los valores de los píxeles en una imagen. La funcionalidad de los filtros en imágenes consisten en que, a partir de una imagen de entrada, se pueden mejorar sus características con base en los valores de sus píxeles. Para esto, debe existir una submatriz con dimensiones predefinidas que se encargue de actuar sobre la imagen con el propósito de modificar los valores de sus píxeles. Existen muchos tipos de filtrado, no obstante, los más comunes y usados en este Proyecto son: el filtro de la mediana y el filtro de la media.

5.1.4. Imágenes Binarias

Las imágenes binarias son aquellas en donde sus píxeles son representados por dos valores, 0 o 1, los cuales están asociados a los colores negro y blanco, respectivamente. Sus ventajas residen en el poco uso de recursos computacionales y en la sencilla extracción de la forma de los objetos contenidos en esta [5.3], este procesamiento es conocido como *binarización de una imagen*. Para trabajar con imágenes binarias, muchas veces es necesario un previo procesamiento, como lo es el mejoramiento del contraste y/o la aplicación de filtros, con el fin de eliminar el mayor ruido gráfico posible y evitar la presencia de objetos no deseados en la imagen. Existe una gama de técnicas para trabajar con imágenes binarias, muchas de ellas se enfocan al procesamiento automatizado, donde su ventaja es el ahorro de tiempo en la detección de objetos tanto estáticos como en movimiento para, de esta forma, ofrecer resultados al operador o tomar decisiones, si se tratase de un robot.

5.1.5. Funciones de Matlab en el Procesamiento de Imágenes

Para ejemplificar las técnicas del procesamiento, se empleó una imagen con peculiaridades de ambiente natural capturada por el elaborador del Proyecto. La imagen original cuenta con dimensiones de 4592x2576 píxeles y presenta el siguiente aspecto.



Figura 5. 2. Imagen capturada por el autor de este Proyecto

5.1.5.1. imadjust

Descripción

imadjust se enfoca en ajustar los valores de intensidad de los píxeles en una imagen, por ende, busca reemplazarlos por aquellos que podrían afinar su intensidad y perfeccionar el contraste de una imagen expandiendo su histograma, también pretende resaltar objetos con poca intensidad; de igual forma, busca modificar el ruido gráfico, pero debido a que sus valores son aleatorios, no es una técnica eficaz para cumplir este objetivo, por tanto, en ocasiones es necesario el uso de otras técnicas del preprocesamiento, como son, aplicar más metodologías

del mejoramiento del contraste para ecualizar el histograma o aplicando filtros que ayuden a la atenuación o eliminación del ruido gráfico [5.4].

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar *imadjust*.

Dada la sintaxis:

$$S = \text{imadjust}(I), \text{ donde}$$

I es la imagen de entrada en escala de grises y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *imadjust* en la imagen I se visualiza a continuación



Figura 5. 3. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica *imadjust* en la imagen. a) Imagen en escala de grises b) Imagen con mejoramiento de intensidad

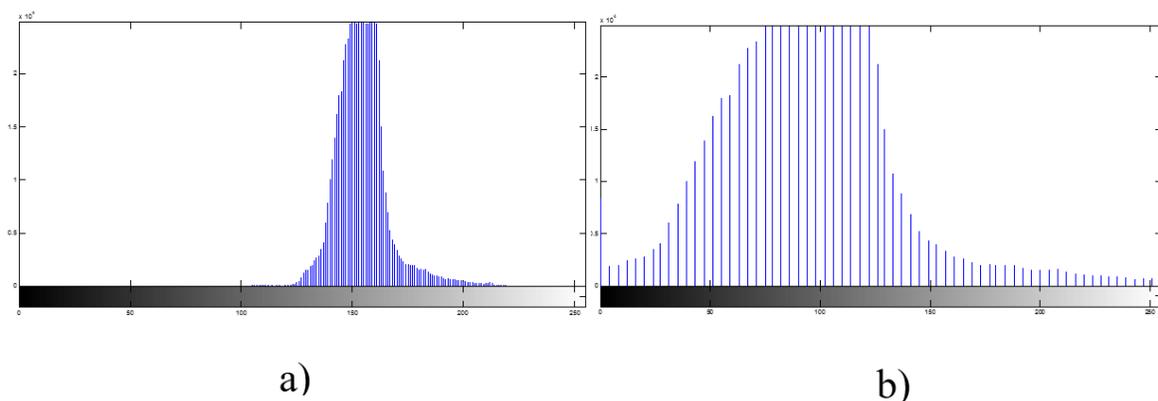


Figura 5. 4. Al aplicar la técnica *imadjust* en la imagen se visualiza una distribución de tonos en el histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con mejoramiento de los valores de intensidad

5.1.5.2. histeq

Descripción

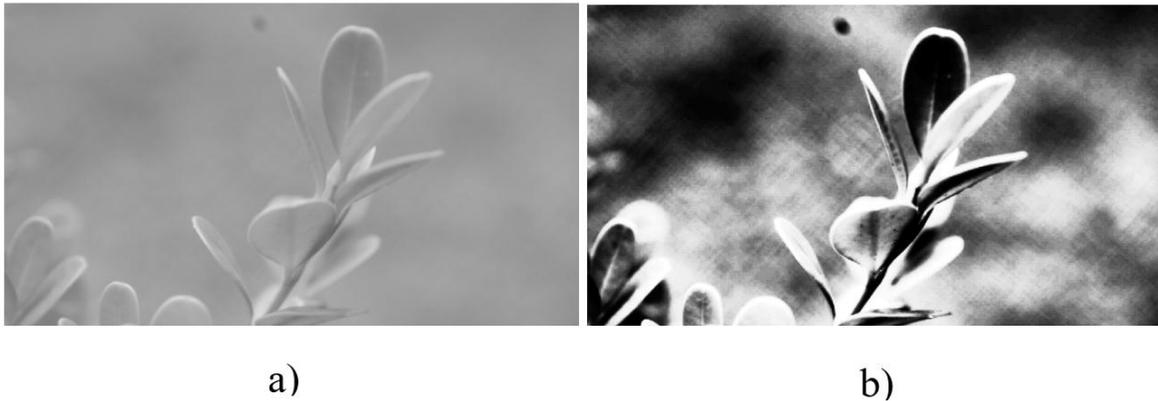
histeq se basa en mejorar el contraste de una imagen permitiendo distribuir los tonos de grises en todo el rango del histograma, provocando uniformidad de los valores presentes en este. Dicho procedimiento es muy útil para ecualizar el histograma y para obtener una imagen de salida con mejor distribución de brillo [5.4].

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar histeq

Dada la sintaxis:

$$S = \text{histeq}(I), \text{ donde}$$

I es la imagen de entrada en escala de grises y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *histeq* en la imagen I se visualiza a continuación



*Figura 5. 5. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica histeq en la imagen. a) Imagen en escala de grises
b) Imagen con distribución del brillo en toda la imagen*

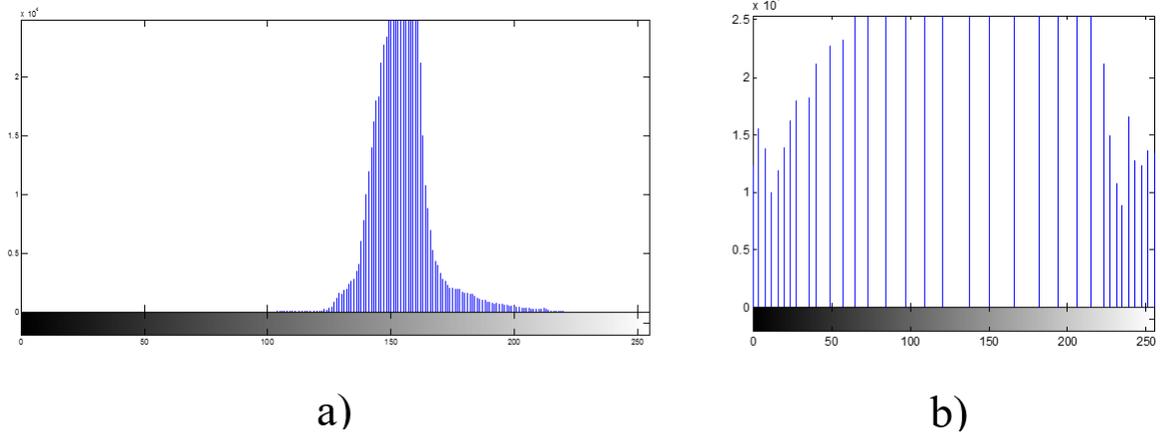


Figura 5. 6. Al aplicar la técnica *histeq* en la imagen se visualiza una distribución de tonos de grises en todo el histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con distribución de los valores en todo el rango

5.1.5.3. *adapthisteq*

Descripción

adapthisteq pretende mejorar el contraste de una imagen basándose en la eualización de su histograma, a diferencia de la técnica *histeq*, esta actúa en pequeñas regiones de la imagen mejorando el brillo. Permite evitar el aumento de la intensidad del ruido. Es una técnica que se adapta a los diferentes cambios de tonos de la imagen, por esta razón se considera un procedimiento potente para el mejoramiento del contraste [5.4].

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar *adapthisteq*

Dada la sintaxis:

$$S = \text{adapthisteq}(I), \text{ donde}$$

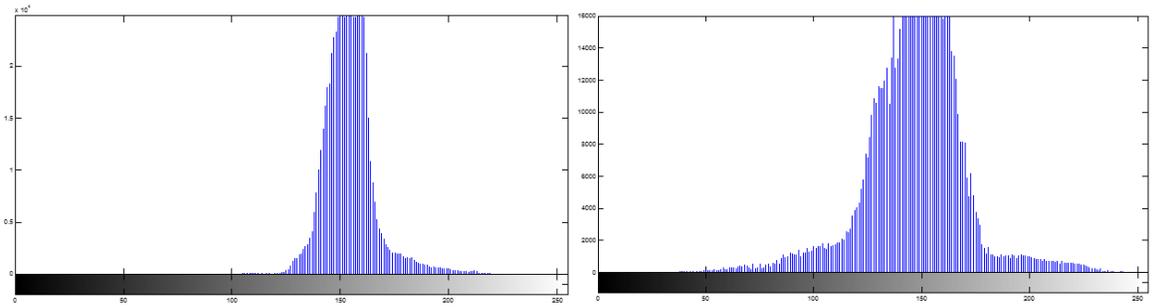
I es la imagen de entrada en escala de grises y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *adapthisteq* en la imagen I se visualiza a continuación



a)

b)

Figura 5. 7. Visualización del efecto que provoca al aplicar la técnica *adaphisteq* en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con distribución del brillo en diferentes regiones



a)

b)

Figura 5. 8. Al aplicar la técnica *adaphisteq* en la imagen se visualiza la distribución de tonos de grises en diferentes regiones del histograma. a) Histograma de la imagen en escala de grises b) Histograma de la imagen con distribución de valores

5.1.5.4. imfilter

Descripción

imfilter consiste en atenuar el ruido gráfico mediante el cálculo del promedio para los píxeles vecinos de un punto $P(i, j)$ en una imagen de entrada I para una imagen de salida S , donde el número de vecinos radica en el tamaño de una matriz M de entrada predefinida, donde su es el punto $P(i, j)$. En Matlab existe una función *fspecial* la cual genera los valores de M respecto a un tipo invocado, el cual puede ser: *average*, *disk*, *gaussian*, *laplacian*, *log*, *motion*, *prewitt*, *sobel*, *unsharp*; en este Proyecto se empleó el tipo *gaussian*.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar `imfilter`

Dada la sintaxis:

```
M = fspecial('gaussian')  
S = imfilter(I, M), donde
```

M es la matriz de entrada que contiene los valores a promediar, I es la imagen de entrada en escala de grises y S es la imagen de salida. El efecto que provoca `imfilter` en la imagen I se visualiza a continuación

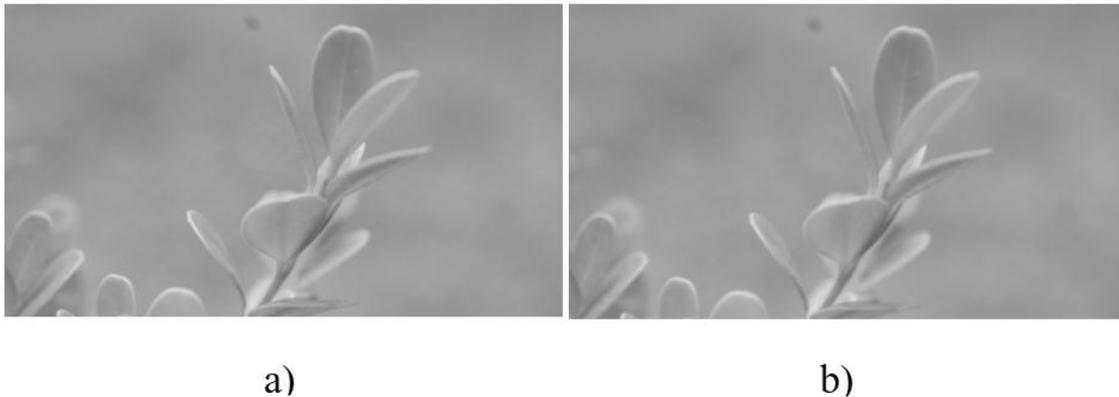


Figura 5. 9. Visualización del efecto que provoca al aplicar el filtro `imfilter` en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con promedio en los valores

5.1.5.5. `medfilt2`

Descripción

`medfilt2` consiste en la eliminación del ruido gráfico mediante la obtención de la mediana de los valores de los píxeles vecinos para un punto $P(i, j)$ en una imagen de entrada I y donde el resultado se almacena en una imagen de salida S . El número de píxeles vecinos depende de una matriz M de entrada, con tamaño n que representa el ancho o número de columnas y m que representa la altura o número de filas. Los valores de M son asignados en relación a un punto $P(i, j)$ conforme se recorren los píxeles de la imagen. Dicho filtro consiste en ordenar los valores de M y obtener su mediana med para después reemplazar el valor de $P(i, j)$ por med .

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar `medfilt2`

Dada la sintaxis:

```
m = 20
```

$$n = 20$$

$$S = \text{medfilt2}(I, [m \ n]), \text{ donde}$$

I es la imagen de entrada en escala de grises, m y n representan el tamaño de la matriz M de entrada y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *medfilt2* en la imagen I se visualiza a continuación

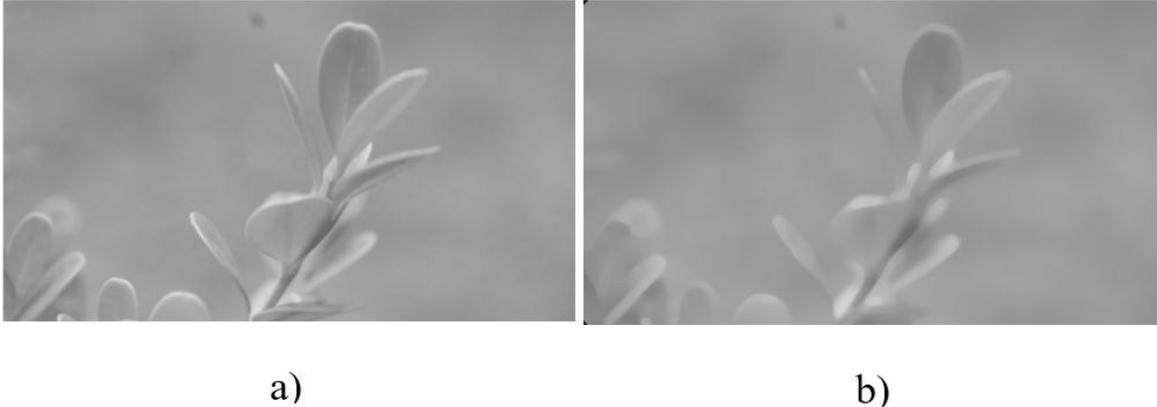


Figura 5. 10. Visualización del efecto que provoca al aplicar el filtro *medfilt2* en la imagen. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con filtro *medfilt2* aplicado

5.1.5.6. im2bw

Descripción

im2bw busca binarizar una imagen convirtiendo los valores de los píxeles a 0's o 1's mediante un umbral de entrada (perteneciente a los posibles valores reales entre 0 y 1), el cual tiene como única finalidad decidir si el valor de un píxel será reemplazado por 0 o 1, donde 0 define al color negro y 1 al color blanco en una imagen digital.

Para discriminar si un píxel es negro o blanco (0 o 1) puede ser calculado de la siguiente forma a partir de un umbral dado, considerando los posibles valores de un píxel de un rango entre 0 y 255.

$$\text{Valor} = \text{umbral} \times 255$$

Suponiendo que el valor de umbral es 0.5, entonces

$$\text{Valor} = 0.5 \times 255,$$

El resultado es

$$\text{Valor} = 127.5,$$

Debido a que, computacionalmente los valores de una imagen sólo pueden ser de tipo entero, el valor es redondeado y se obtiene

$$\text{Valor} = 128,$$

Lo que significa que a partir del 0 al 128 los valores en una imagen serán reemplazados por 0's y para el rango de 129 a 255 los valores serán sustituidos por 1's.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar `im2bw` para un umbral igual a 0.6

Dada la sintaxis:

$$\text{Umbral} = 0.6$$

$$S = \text{im2bw}(I, \text{umbral}), \text{ donde}$$

I es la imagen de entrada en escala de grises, umbral que define si el valor de un pixel es 0 o 1 y S es la imagen de salida. El efecto que provoca `im2bw` en la imagen I se visualiza a continuación

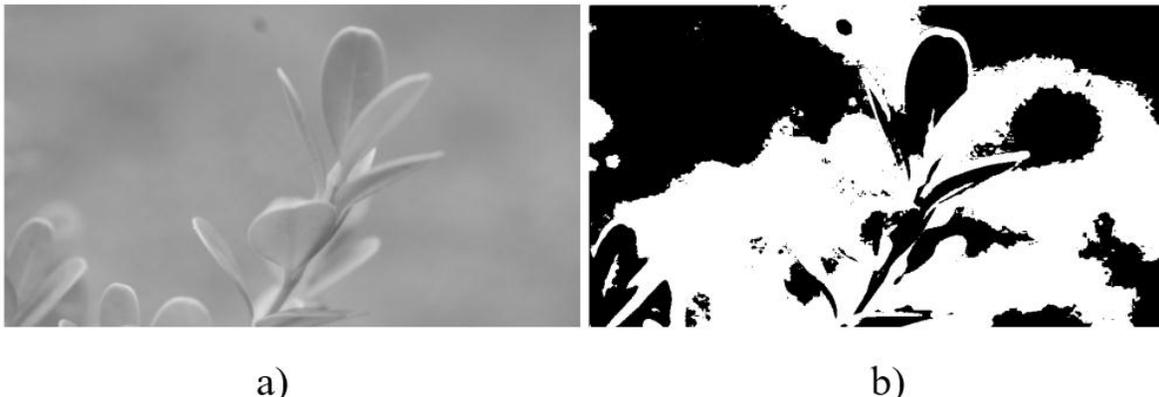


Figura 5. 11. Visualización del resultado al binarizar la imagen con la técnica `im2bw` con un umbral con valor igual a 0.6. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen binarizada

5.1.5.7. `imclearborder`

Descripción

`imclearborder`, para imágenes en escala de grises, consiste en limpiar pixeles que son más brillantes que sus alrededores. También, permite reducir el nivel de intensidad para toda la imagen y limpiar las fronteras de los objetos contenidos en esta.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar `imclearborder`

Dada la sintaxis:

$$S = \text{imclearborder}(I), \text{ donde}$$

I es la imagen de entrada en escala de grises y S es la imagen de salida. El efecto que provoca `imclearborder` en la imagen I se visualiza a continuación

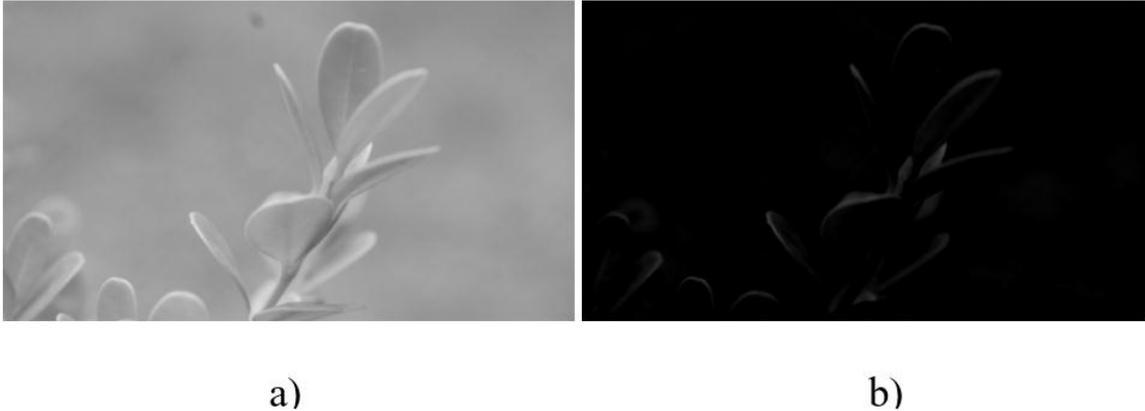


Figura 5. 12. Visualización del resultado al limpiar los bordes de la imagen con la técnica `imclearborder`. a) Imagen en escala de grises. b) Imagen con limpieza de bordes

5.1.5.8. `imdilate`

Descripción

`imdilate` se basa en el *engrosamiento* de objetos en una imagen, muchas veces con el fin de unir un objeto que fue afectado al aplicar cualquier otra técnica del preprocesamiento. Una de las ventajas es que existen maneras de *engrosar* un objeto con diferentes morfologías, para este Proyecto se aplicó la morfología *disk*, con ayuda del generador de estructuras *strel*, sobre imágenes binarias.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar `imdilate`

Dada la sintaxis:

$$\begin{aligned} se &= \text{strel}('disk', 3) \\ S &= \text{imdilate}(I, se), \text{ donde} \end{aligned}$$

se es la variable donde se almacenará la morfología `disk` con radio 3, I es la imagen binaria de entrada y S es la imagen de salida. El efecto que provoca `imdilate` en la imagen I se visualiza a continuación



a)

b)

Figura 5. 13. Visualización del resultado al engrosar los objetos de la imagen con la técnica imdilata. a) Imagen binaria.
b) Imagen con engrosamiento de objetos

5.1.5.9. bwareaopen

Descripción

bwareaopen trabaja sobre imágenes binarias y su finalidad es eliminar objetos que sean pequeños o que tengan un cierto número de píxeles, menor al especificado en la entrada.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar *bwareaopen*

Dada la sintaxis:

$$\text{area} = 2000$$

$$S = \text{bwareaopen}(I, \text{area}), \text{ donde}$$

area es el número de píxeles permitidos en un objeto, *I* es la imagen binaria de entrada y *S* es la imagen de salida. El efecto que provoca *bwareaopen* en la imagen *I* se visualiza a continuación



Figura 5. 14. Visualización del resultado al eliminar objetos de la imagen con la técnica *bwareaopen*. a) Imagen binaria.
b) Imagen con objetos que contienen mayor o igual a 2000 píxeles

5.1.5.10. imfill

Descripción

imfill con el parámetro de entrada *holes* son una técnica que consisten en el llenado de huecos para los objetos contenidos en una imagen. Esta técnica se empleó en este Proyecto para conocer el número de píxeles que viven en un objeto.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar *imfill*

Dada la sintaxis:

$$S = \text{imfill}(I, 'holes'), \text{ donde}$$

holes es un parámetro de entrada que se encarga de llenar los huecos que contiene un objeto, *I* es la imagen binaria de entrada y *S* es la imagen de salida. El efecto que provoca *imfill* en la imagen *I* se visualiza a continuación



Figura 5. 15. Visualización del resultado al llenar los huecos contenidos en cada uno de los objetos de la imagen con la técnica *imfill*. a) Imagen binaria. b) Imagen huecos rellenos

5.1.5.11. *bwboundaries*

Descripción

bwboundaries es una técnica que tiene como objetivo trazar los límites exteriores de cada uno de los objetos contenidos en una imagen binaria. Como resultado, devuelve para cada objeto una lista de puntos situados en el eje x y y , los cuales determinan la ubicación de sus límites.

Suponiendo que una imagen binaria contiene un objeto O , como se muestra en la Figura 5.16, la técnica *bwboundaries* actúa de tal forma que sólo define los puntos en los ejes x y y de los límites exteriores de O . Gráficamente este paso se visualiza en la Figura 5.17. Cuando se identifica cada punto del contorno de un objeto, se almacena su ubicación de cada uno de ellos para un posterior análisis. La Figura 5.18 representa gráficamente cómo se localiza cada uno de los puntos $P(i, j)$ de O .

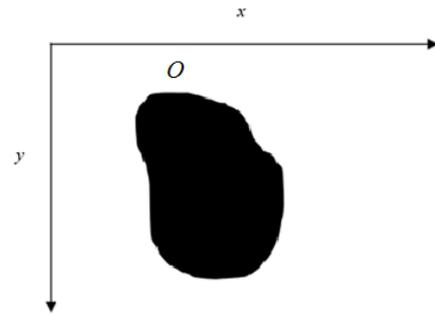


Figura 5. 16. Representación de un objeto O contenido en una imagen binaria

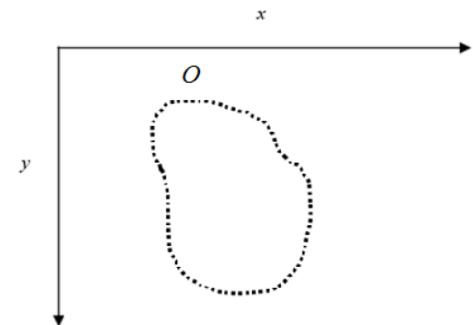


Figura 5. 17. Visualización de los puntos para el objeto O en una imagen binaria

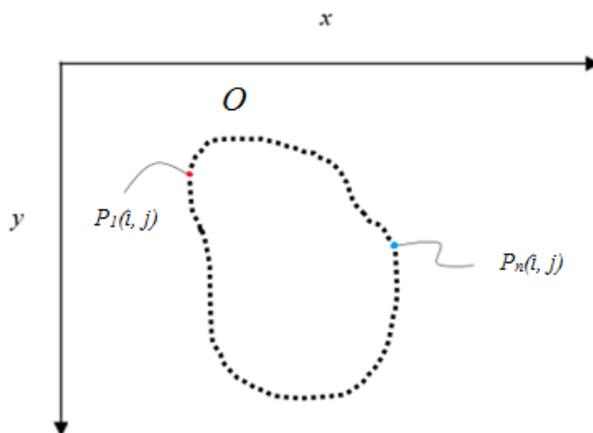


Figura 5. 18.. Localización de cada uno de los puntos para los límites de O

5.1.5.12. imcomplement

Descripción

imcomplement es una técnica que se aplica a una imagen binaria y su objetivo es invertir los valores de sus píxeles, es decir, para un píxel con valor inicial 1, al aplicar la técnica el resultado para dicho píxel será 0 y viceversa, representando, de esta forma, los colores negro y blanco invertidos.

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar imcomplement

Dada la sintaxis:

$$S = \text{imcomplement}(I), \text{ donde}$$

I es la imagen binaria de entrada y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *imcomplement* en la imagen I se visualiza a continuación



Figura 5. 19. Visualización del resultado al invertir los colores de la imagen usando la técnica *imcomplement*. a) Imagen binaria. b) Imagen con colores invertidos

5.1.5.13. *imfindcircles*

Descripción

imfindcircles es una gran herramienta que sirve para la detección de círculos en una imagen con plano en x , y y está basada en el método de la *Transformada de Hough*. Para obtener mejores resultados es importante trabajar con imágenes binarias después de un procesamiento previo. Los parámetros básicos de entrada para *imfindcircles* son una imagen I , los límites de búsqueda de los círculos, es decir radio mínimo R_{min} y radio máximo R_{max} , en píxeles, la polaridad del objeto *ObjectPolarity*, esto es, cómo identificará al objeto si negro o blanco y como resultado devuelve la ubicación de cada círculo encontrado y el radio en píxeles de cada uno de ellos. Debido a la complejidad de este método, el uso de los recursos computacionales es costoso, pero la ventaja es la detección precisa de círculos.

`[centersBright, rad] = imfindcircles(imD,[Rmin Rmax],'ObjectPolarity','bright');`

Visualización gráfica del efecto en una Imagen al aplicar *imfindcircles*



Figura 5. 20. Imagen de esferas de hidrogel, capturada por el autor de este Proyecto

Para representar esta técnica, se utilizó una imagen capturada por el elaborador del Proyecto, como se observa en la Figura 5.20. El contenido de la imagen son esferas de hidrogel.

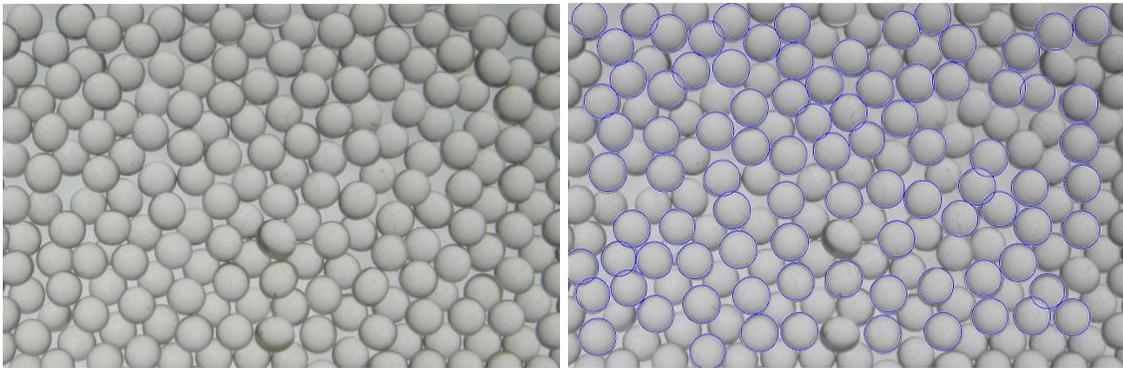
Dada la sintaxis:

```
Rmin = 15
```

```
Rmax = 50
```

```
S = imfindcircles(I, [Rmin Rmax], 'ObjectPolarity','bright'),  
donde
```

I es la imagen de entrada (el proceso se realizó sobre una imagen binaria, sin embargo, para una mejor representación de la técnica, se usaron las imágenes originales), Rmin y Rmax son los límites de los radios de búsqueda y S es la imagen de salida. El efecto que provoca *imfindcircles* en la imagen I se visualiza a continuación



a)

b)

Figura 5. 21. Visualización del resultado de la búsqueda de círculos en una imagen usando la técnica *imfindcircles*. a) Imagen original. b) Imagen con círculos circunscribiendo los objetos encontrados

Capítulo 6. Desarrollo del Proyecto

El propósito del software *FoamTexQu* es el análisis de imágenes de espumas húmedas y/o secas, con el fin de caracterizarlas en términos de su textura. Además, con base en diferentes parámetros de entrada, estimar su calidad.

La funcionalidad general de *FoamTexQu* se representa en el siguiente diagrama de flujo (Figura 6.1), donde sus módulos serán explicados posteriormente.

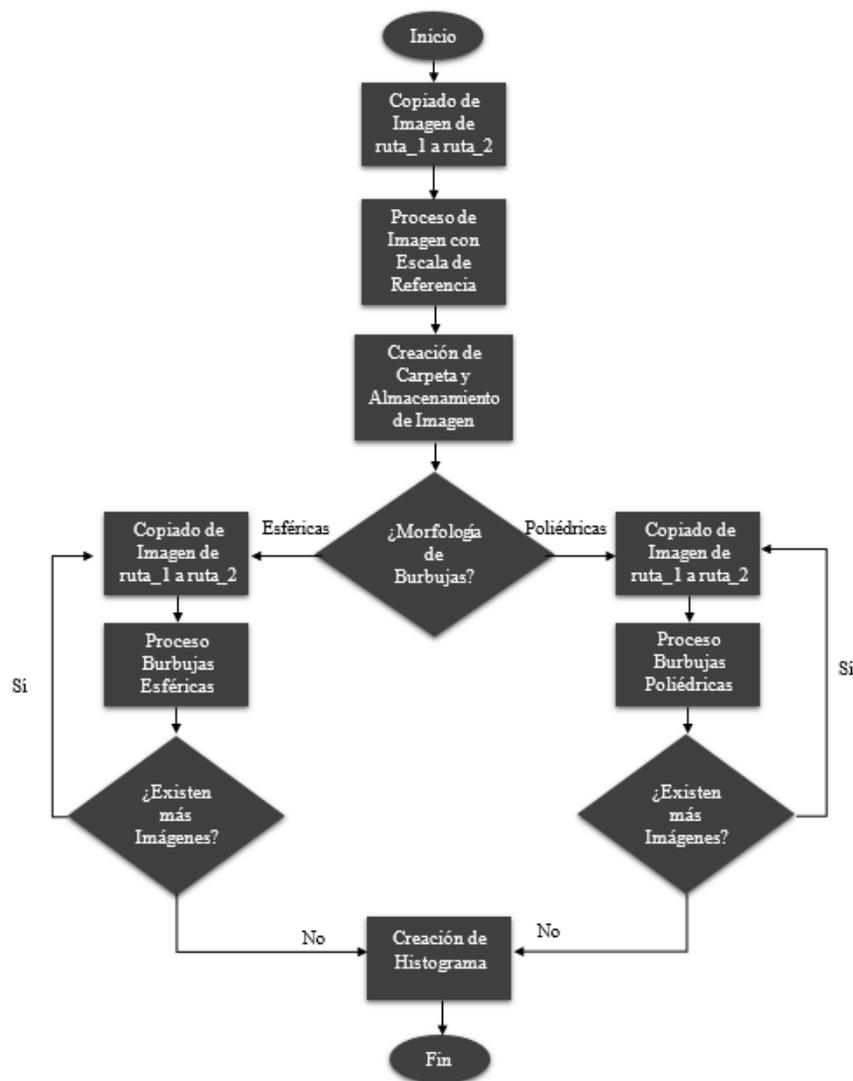


Figura 6.1. Diagrama de flujo para la funcionalidad de *FoamTexQu*

6.1. Funciones

Para entender los módulos que componen el diagrama de flujo, es de gran importancia explicar las funciones que construyen cada módulo.

6.1.1. Función un_pixel_a_area_milímetros_cuadrados

Es una función que se encarga de calcular el área (en milímetros) de un pixel, con el fin de, posteriormente, utilizarlo para calcular la densidad.

Esta función se define con el siguiente pseudocódigo donde, recibe como parámetros de entrada el radio en pixeles de la escala de referencia y su medida en milímetros. Como resultado devuelve el área de un pixel.

Inicia *un_pixel_a_area_milímetros_cuadrados* (*refRad_pix*, *refRad_mm*)

$$area_un_pixel \rightarrow ((un_pixel \times refRad_mm) / refRad_pix)^2$$

parámetro de retorno *area_un_pixel*

Fin de *un_pixel_a_area_milímetros_cuadrados*

6.1.2. Función pixeles_a_milímetros

Esta función tiene como objetivo convertir las unidades de los radios de cada una de las burbujas encontradas, es decir, su conversión de pixeles a milímetros. Esto se lleva a cabo con base al radio en pixeles de la escala de referencia y a su radio en milímetros, definido en el código como 0.3mm.

Esta función se define en el siguiente pseudocódigo donde, recibe tres parámetros, el primero es el radio en pixeles de la burbuja, el siguiente es el radio en pixeles de la escala de referencia, y el último es la medida real en milímetros de dicha escala. La función *pixeles_a_milímetros* devuelve el diámetro real (en milímetros) de cada una de las burbujas de entrada.

Inicia *pixeles_a_milímetros*(*radius_pix*, *refRad_pix*, *refRad_mm*)

El radio equivalente *rEQ* se obtiene con base en una regla de tres

$$rEQ \rightarrow (radius_pix \times refRad_mm) / refRad_pix$$

$$diametro \rightarrow 2 \times rEQ$$

variable de retorno, el arreglo *diametro*

fin de *pixeles_a_milímetros*

6.1.3. Función datos estadísticos

Para caracterizar una espuma, en términos de su textura, es muy importante conocer diferentes datos estadísticos de cada una de sus burbujas y de su conjunto, como lo son: sus diámetros, áreas, perímetros y la densidad, donde esta última se define como el área total del espacio que ocupan las burbujas en la imagen de muestreo entre el área total de la imagen y está denotada en porcentaje. La densidad puede ser relevante para estimar la calidad de una espuma. Por lo tanto, esta función se encarga de calcular estos datos y almacenarlos en un archivo de Excel.

El pseudocódigo para esta función se define a continuación, donde, recibe como parámetros de entrada un arreglo del diámetro equivalente de cada una de las burbujas detectadas (en milímetros), el número de la muestra procesada, la imagen procesada, el área (en milímetros) de un pixel, las opciones de resultados que el usuario desea que se almacenen en el archivo de Excel (*número de burbujas, densidad de la espuma y para el diámetro, área y perímetro obtener los mínimos, máximos, sus promedios y desviaciones estándar*), un parámetro que identifica si es espuma con morfología esférica o poliédrica y como parámetro final, recibe la circularidad del objeto, en caso de ser poliédrica. Como resultado devuelve el diámetro medio y su desviación estándar, el número de burbujas, el área del espacio ocupado por las burbujas y el área total de la muestra (imagen).

Inicia *datos_estadisticos(dEQ, noMuestra, imagen, área_de_un_pix, opciones, morf, circularidad)*

Se obtiene el número total de burbujas, *noBurb*, a partir del tamaño total del arreglo del diámetro equivalente, *dEQ*

noBurb → tamaño(*dEQ*)

se obtiene el diámetro mínimo, *Dmin*, máximo, *Dmax*, promedio, *Dmed*, y desviación estándar, *DSdiam*, a partir del arreglo *dEQ*

se calcula el área de cada burbuja y se almacena en el arreglo *area*, a partir de cada uno de los diámetros del arreglo *dEQ*, con la siguiente fórmula

area → $(\pi \times dEQ^2) / 4$

se obtiene el área mínima, *Amin*, máxima, *Amax*, promedio, *Amed*, y desviación estándar, *DSarea*, a partir del arreglo *area*

se calcula el perímetro de cada burbuja y se almacena en el arreglo *perímetro*, a partir de cada uno de los diámetros del arreglo *dEQ*, con la siguiente fórmula

perímetro → $\pi \times dEQ$

se obtiene el perímetro mínimo, *Pmin*, máximo, *Pmax*, promedio, *Pmed*, y desviación estándar, *DSper*, a partir del arreglo *perímetro*

se obtiene el área total de las burbujas, *areaT_burb*, a partir de la suma de todos los elementos del arreglo *area*

se obtienen las dimensiones *altura* y *ancho* de *imagen*

se calcula el área total de la imagen, *área_imagen*

$área_imagen \rightarrow altura \times ancho$

se calcula el área total de la espuma, *areaT_espuma*, para toda la imagen

$areaT_espuma \rightarrow área_imagen \times área_de_un_pix$

se calcula la densidad

$densidad \rightarrow (areaT_burb / areaT_espuma) \times 100$

crear archivo en Excel en la ruta_2 llamado *Datos_Muestra_noMuestra*, donde *noMuestra* es el número de la imagen procesada, con las siguientes condiciones

si morf es esférica

añadir campos en el archivo Excel para *noBurb*, *dEQ*, *área* y *perímetro*

en otro caso, si morf es poliédrica

añadir campos en el archivo Excel para *noBurb*, *dEQ*, *área*, *perímetro* y *circularidad*

Fin de *si*

Evaluar los parámetros de *opciones* y agregar los campos correspondientes en el archivo Excel

Finalmente, complementar el archivo creado con los datos estadísticos en los campos correspondientes

Como resultado, devuelve *Dmed*, *DSdiam*, *noBurb*, *areaT_burb* y *areaT_espuma*

Fin de *datos_estadisticos*

6.1.4. Función *recortar Imagen*.

Debido a que se capturaron imágenes de burbujas con tamaño del orden de micras, fue necesario usar lentes adicionales para aumentar la resolución, pero, se visualizó que esta técnica provocaba un efecto de aberración esférica y distorsionaba la imagen alrededor de su centro, alterando el valor de los píxeles y aumentando el ruido gráfico. Por ende, para disminuir este efecto se optó por recortar la imagen como se muestra en la Figura 6.2.

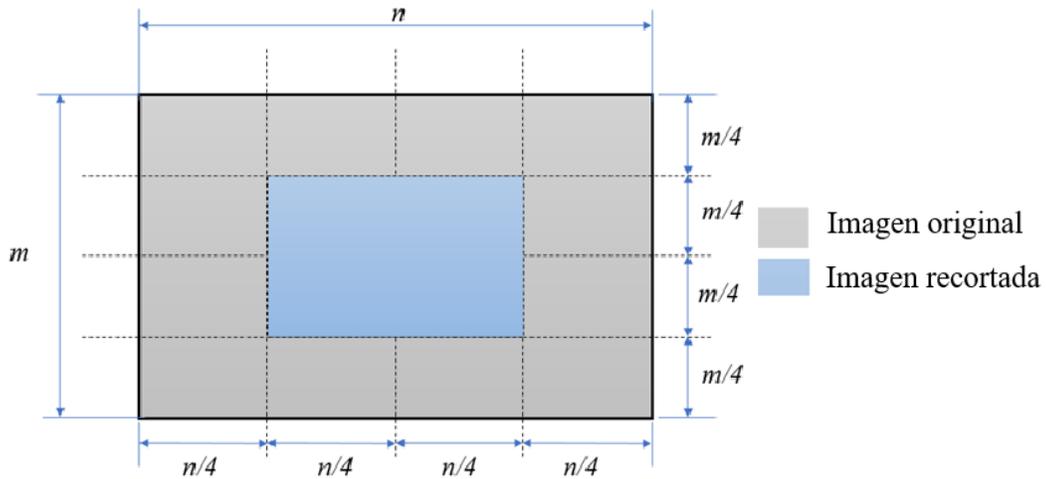


Figura 6. 2. Recorte de la imagen para disminuir el efecto de aberración

Esta función se define con el siguiente pseudocódigo donde, como parámetro de entrada es una imagen en escala de grises (para ejemplificar se tomó la imagen de la Figura 6.3) y como resultado devuelve la imagen recortada, como se observa en la Figura 6.4.

Inicia *recortar_Imagen (Imagen_Gris)*

Obtener *alturaTotal* y *anchoTotal* de *Imagen_Gris*

$n \rightarrow \text{anchoTotal}$

$m \rightarrow \text{alturaTotal}$

$n_{\min} \rightarrow n / 4$

$m_{\min} \rightarrow m / 4$

$\text{altura} \rightarrow m / 2$

$\text{ancho} \rightarrow n / 2$

se empleó la función *imcrop* de Matlab

$\text{vector} \rightarrow (n_{\min}, m_{\min}, \text{ancho}, \text{altura})$

$\text{imagen_R} \rightarrow \text{imcrop}(\text{Imagen_Gris}, \text{vector})$

imagen de retorno *imagen_R*

Fin de *recortar_Imagen*

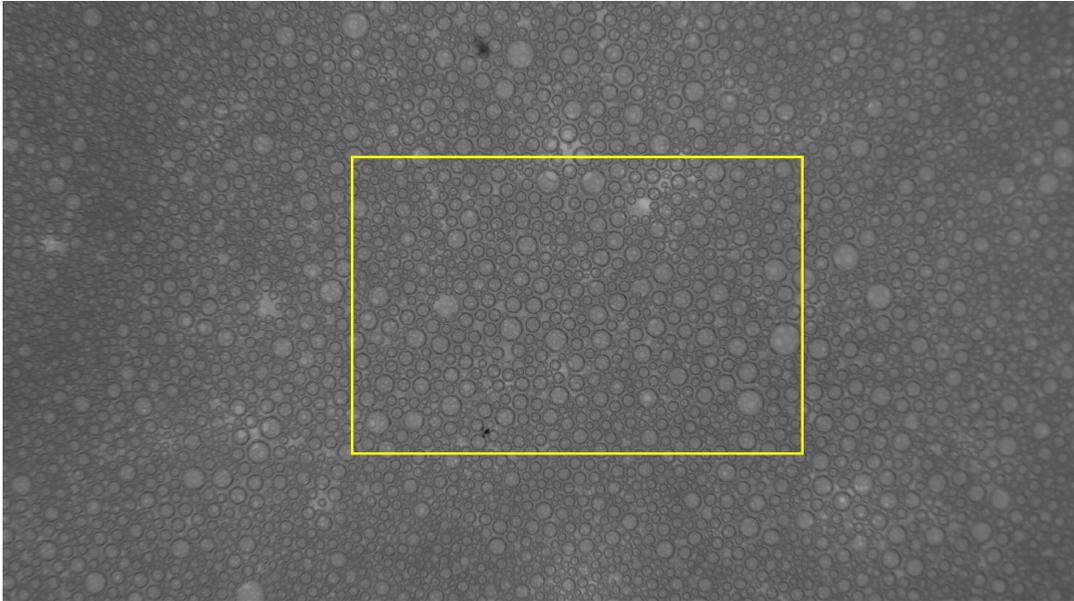


Figura 6. 3. Imagen con tamaño original

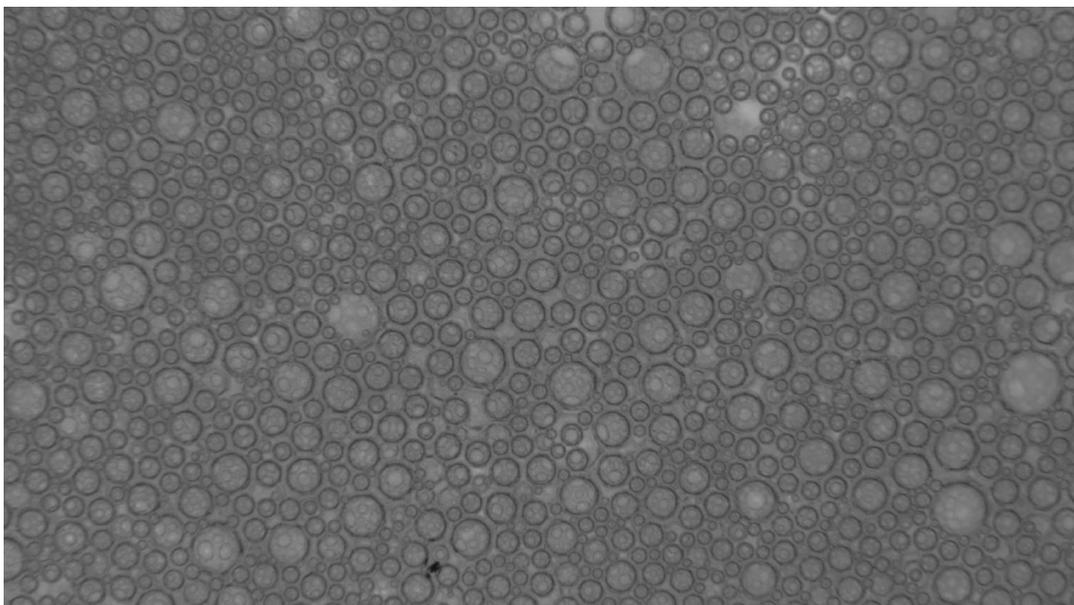


Figura 6. 4. Resultado de la función recortar_Imagen

6.1.5. Función mejorar_contraste

El objetivo de esta función es mejorar el contraste de una imagen, ecualizando el nivel de grises y aplicando filtros para atenuar el ruido gráfico.

La función *mejorar_contraste* se define por el siguiente pseudocódigo donde, recibe como parámetro la imagen original (para ejemplificar, se tomó la imagen perteneciente a la Figura

6.3) y como parámetros de retorno, devuelve dos imágenes, la primera presenta características de mejoramiento de brillo y la segunda es una imagen binaria después de haber sido atenuado el ruido gráfico, como se visualiza en las Figuras 6.5 y 6.6, respectivamente.

Inicia *mejorar_contraste(imagen)*

Se mejora el contraste con la técnica *adapthisteq* de Matlab, explicada en el *Capítulo 5*

$p1 \rightarrow \text{adapthisteq}(\text{imagen})$

se recortan las dimensiones de $p1$, con ayuda de la función *recortar_Imagen*

$p2 \rightarrow \text{recortar_Imagen}(p1)$

se aplica el filtro de la media, *imfilter*, con el tipo '*gaussian*', para la atenuación del ruido gráfico de $p2$

$M \rightarrow \text{fspecial}(\text{'gaussian'})$

$p3 \rightarrow \text{filtro_de_la_media}(p2, M)$

Se aplica el filtro de la mediana, *medfilt2*, para suavizar la imagen

$p4 \rightarrow \text{filtro_de_la_mediana}(p3, [2\ 2])$

Una vez esto, se aplica la técnica *imadjust* a $p4$, dando como resultado una nueva imagen $p5$

Finalmente, se binariza $p5$ y el resultado es almacenado en una nueva imagen $p6$

Las imágenes de retorno son $p2$ y $p6$

Fin de *mejorar_contraste*

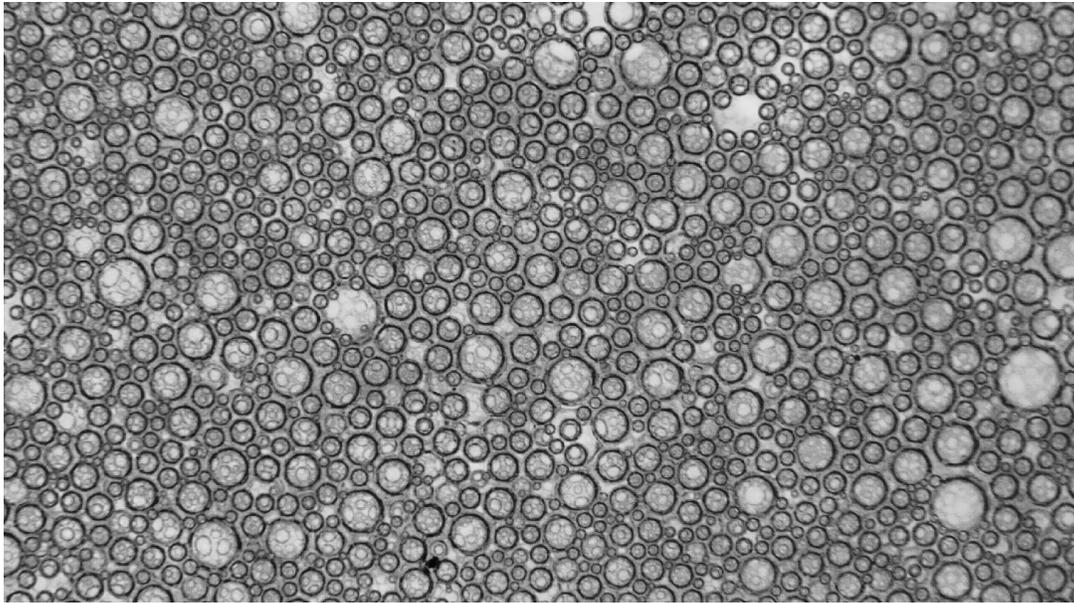


Figura 6. 5. Mejoramiento del contraste, usando la técnica adaptative

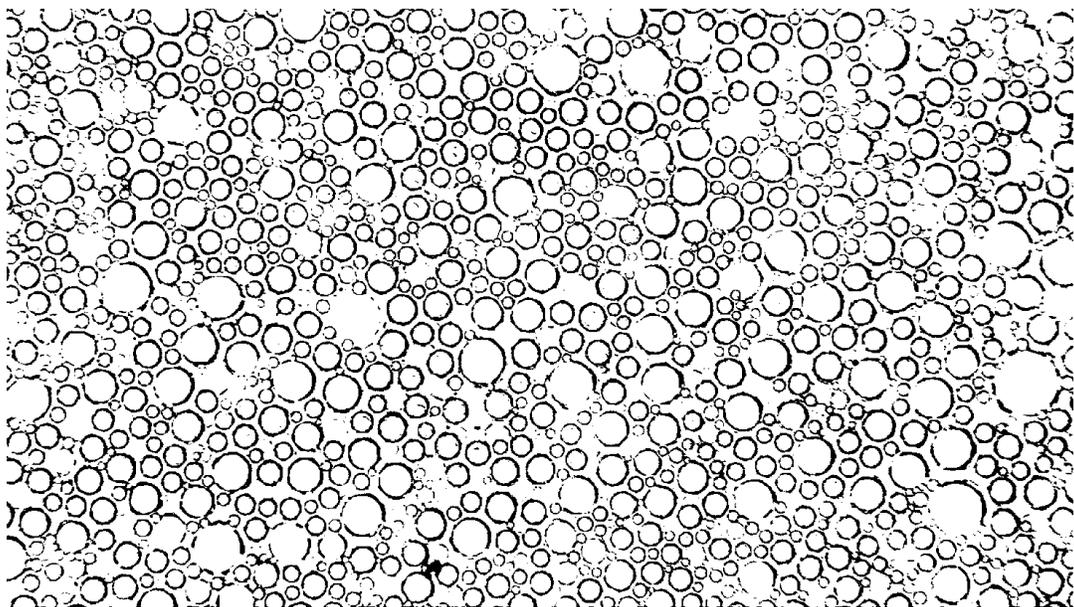


Figura 6. 6. Resultado final de la función mejorar_contraste. Imagen binaria con atenuación del ruido gráfico

6.1.6. Función disminuir borde objeto

Esta técnica fue útil para emplearla en las burbujas poliédricas, con el fin de disminuir el grosor de los objetos contenidos en una imagen binaria y así poder distinguir las fronteras entre ellos.

El pseudocódigo para esta función es el siguiente donde recibe como primer parámetro de entrada una imagen binaria, como ejemplo se tomó la Figura 6.7, la cual tiene como contenido burbujas poliédricas, el segundo y tercer parámetro que recibe tienen un valor entero de 2. El parámetro que devuelve es una imagen de tipo binaria, donde se mejora la división entre objetos, como se visualiza en la Figura 6.8.

Inicia *diminuir_borde_objeto(imB, rengM, colM)*

renglon → obtener altura total de imagen *imB*

columna → obtener ancho total de imagen *imB*

nuevaImagen → *imB*

para *i* que va desde *rengM+1* hasta *renglón*,

incrementar *i* después de cada iteración

para *j* que va desde *colM+1* hasta *columna*,

incrementar *j* después de cada iteración

si *imB(i,j)* es *color negro* y, además

si *i < renglón-1* y, además

si *j < columna-1*

para *ic* que va desde (-)*rengM* hasta (+)*rengM*,

incrementar *ic* después de cada iteración

para *jc* que va desde (-)*colM* hasta (+)*colM*,

incrementar *jc* después de cada iteración

nuevaImagen(i + ic, j + jc) → *color negro*

fin para *jc*

fin para *ic*

fin si

fin para *j*

fin para *i*

variable de retorno *nuevaImagen*

Fin de *diminuir_borde_objeto*

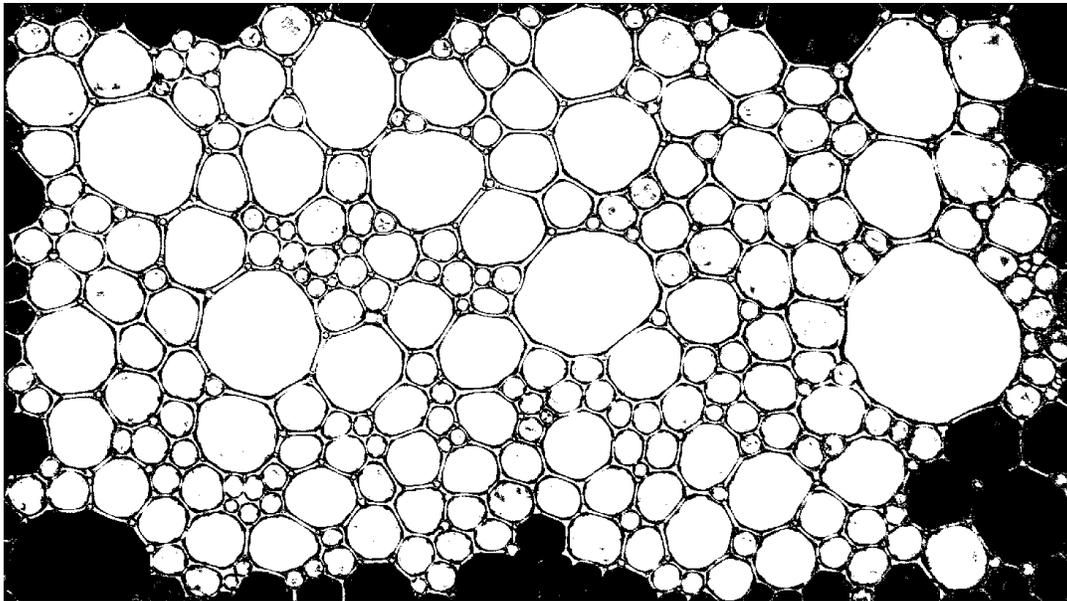


Figura 6. 7. Imagen binaria de burbujas poliédricas a procesar

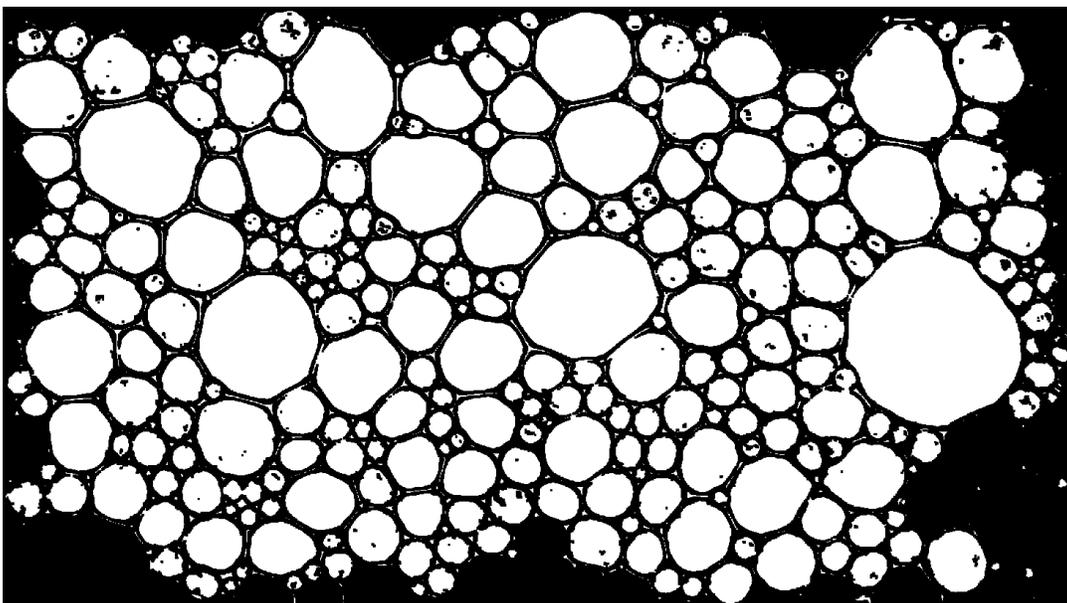


Figura 6. 8. Visualización del adelgazamiento de las fronteras de los objetos

6.1.7. Función burbujas esféricas

Esta función tiene como finalidad detectar la mayoría de las burbujas contenidas en una imagen y para cada una de ellas encontrar su radio, esta función es apta sólo para burbujas esféricas.

burbujas_esfericas el pseudocódigo que la define se detalla más adelante donde, recibe tres parámetros de entrada, de los cuales el primero es una imagen por procesar, (para ejemplificar su utilizó la imagen de la Figura 6.3), y los siguientes dos son los límites de los radios donde se realizará la búsqueda (*Rmin* y *Rmax*), estos parámetros son medidos por el usuario en una interface previa al procesamiento. Los parámetros que devuelve son los radios de cada una de las burbujas encontradas y dos imágenes, la primera con mejoramiento de brillo, obtenida de la función *mejorar_contraste*, y la siguiente una imagen binaria, mostradas en las Figuras 6.9 y 6.10, respectivamente.

Inicia *burbujas_esfericas(imagen, Rmin, Rmax)*

Se invoca a la función *mejorar_contraste*, la cual recibe como parámetro de entrada a *imagen* y devuelve una imagen con la técnica histeq, *imC* y una imagen binaria, *imB*

Finalmente se llama a la función *imfindcircles* de Matlab, explicada en el *Capítulo 5*, para los radios de cada una de las burbujas en la imagen binaria, *imB*.

[centroCírculo, radios] → encontrarCirculos(imB, [Rmin, Rmax], ...)

Las variables de retorno son *radios, imC, imB*

Fin de *burbujas_esfericas*

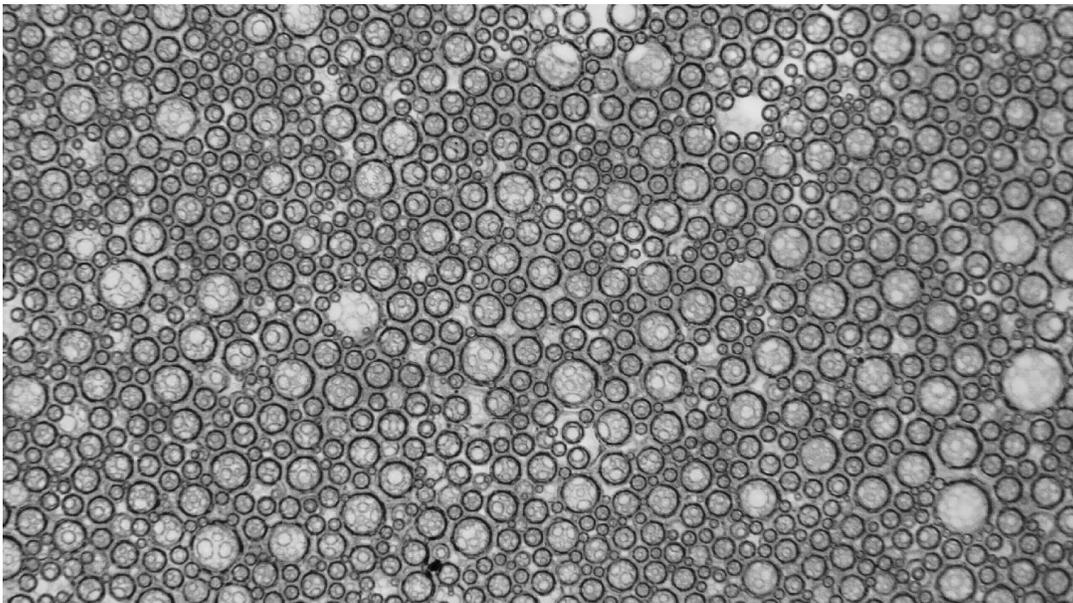


Figura 6. 9. *imC*, parámetro que devuelve la función *mejorar_contraste*

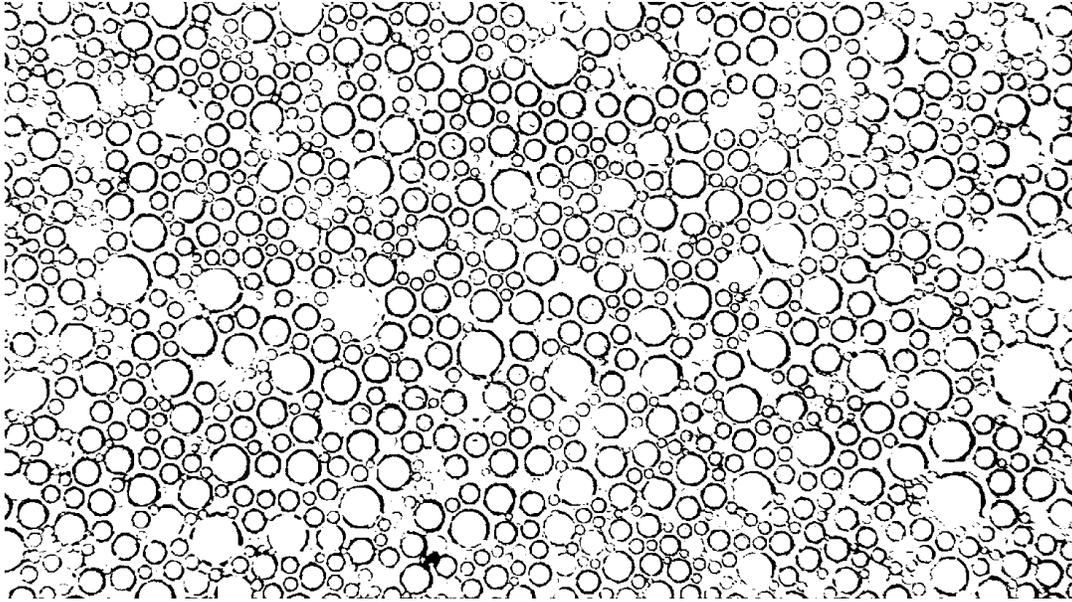


Figura 6. 10. *imB*, imagen que devuelve mejorar_contraste

6.1.8. Función burbujas_poliedricas

Esta función tiene como objetivo la detección de burbujas poliédricas mediante el mejoramiento del contenido de una imagen, usando técnicas para mejorar su contraste y filtros, que ayudan a la distinción óptima de objetos y a la atenuación de ruido gráfico.

Es crucial tener en cuenta que una burbuja no presentará una forma alargada, debido a su estructura y a cómo encierra el gas dentro de ella, por lo tanto, se ha tomado en cuenta evitar detectar objetos alargados. Esto se logra mediante el cálculo de su circularidad, proporcionando así una mejor detección de objetos. La definición de *circularidad* se define con la siguiente ecuación

$$\text{Circularidad} = (4 \times \text{área}) / (\pi \times (L_{\text{longitud máxima de Ferret}})^2), \text{ donde}$$

area, es el área del objeto,

Llongitud máxima de Ferret, es la longitud máxima que existe de un punto a otro, en el objeto, y

Circularidad, es el rango que define la circularidad de un objeto, es decir, si *Circularidad* = 0, el objeto no presenta ninguna forma circular en cambio, si *Circularidad* = 1, el objeto es 100% circular.

Esta función es representada por el siguiente pseudocódigo donde, recibe como parámetros la *imagen original a procesar*, la *medida real de la escala de referencia (0.6 mm)* y su *medida en pixeles*. Los

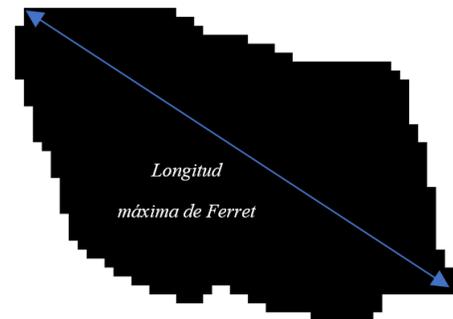


Figura 6. 11. Longitud máxima de los puntos de un objeto

parámetros de retorno son: el diámetro equivalente de las burbujas, en milímetros, la circularidad y una imagen con mejoramiento de brillo.

Inicia *burbuja_poliedricas(imagen, refRad_mm, refRad_pix)*

Se lleva a cabo un mejoramiento del contraste de *imagen* mediante la técnica *adapthisteq*, como se muestra en seguida

imC → *adapthisteq(imagen)*

se invoca la función *recortar_imagen*

imR → *recortar_Imagen(imC)*

se limpian los bordes de *imR* y se binariza la imagen, con ayuda de las técnicas de Matlab, *imclearborder* e *im2bw*, el resultado se almacena en *imBW*

Se disminuyen las fronteras de la imagen anterior invocando la función *diminuir_borde_objeto*, la imagen resultante se almacena en una nueva imagen llamada *borde_imagen*

borde_imagen → *diminuir_borde_objeto(imBW, 2, 2)*

para eliminar evitar que el área de cada objeto se modifique con los huecos contenidos en ellos, estos son rellenados de la siguiente forma

im_huecos → *imfill(borde_imagen, 'holes')*

Para omitir objetos que no son burbujas y que probablemente son ruido gráfico debido a su diminuto tamaño, se emplea la técnica de Matlab llamada *bwareaopen*

objeto_real → *bwareaopen(im_huecos, 400)*

posteriormente se obtienen los puntos para los ejes *x* y *y* en el espacio de la imagen para cada uno de los objetos, con ayuda del método *bwboundaries*, original de Matlab

se calculan el *área_i* en pixeles y las distancias máximas entre los puntos de cada objeto (o distancia máxima de Ferret), para poder determinar su *circularidad_i*

para *i* que va desde 0 hasta *número de objetos*, incrementar *i* en cada iteración

si circularidad(i) > 0.35

discriminar al *objeto(i)* como una burbuja

en otro caso

eliminar el *objeto(i)*

fin de *si*

fin de para *i*

Finalmente, para obtener un diámetro equivalente en milímetros se hace su conversión de la siguiente forma

$$un_pixel_en_mm \rightarrow (1 \text{ pixel} \times refRad_mm) / refRad_pix$$

y esta función termina con el siguiente ciclo

para i que va desde 0 hasta el número de objetos con $circularidad > 0.35$

calcular su diámetro equivalente, dEQ , de cada $objeto(i)$

$$dEQ(i) \rightarrow \sqrt{\frac{4 \times area(i)}{\pi}} \times un_pixel_en_mm$$

Fin para i

La función regresa los parámetros: dEQ , $circularidad$, imC

Fin de *burbujas_poliedricas*

Los resultados de la función *burbujas_poliedricas* se visualizan en las figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.16, a partir de la figura 6.12.

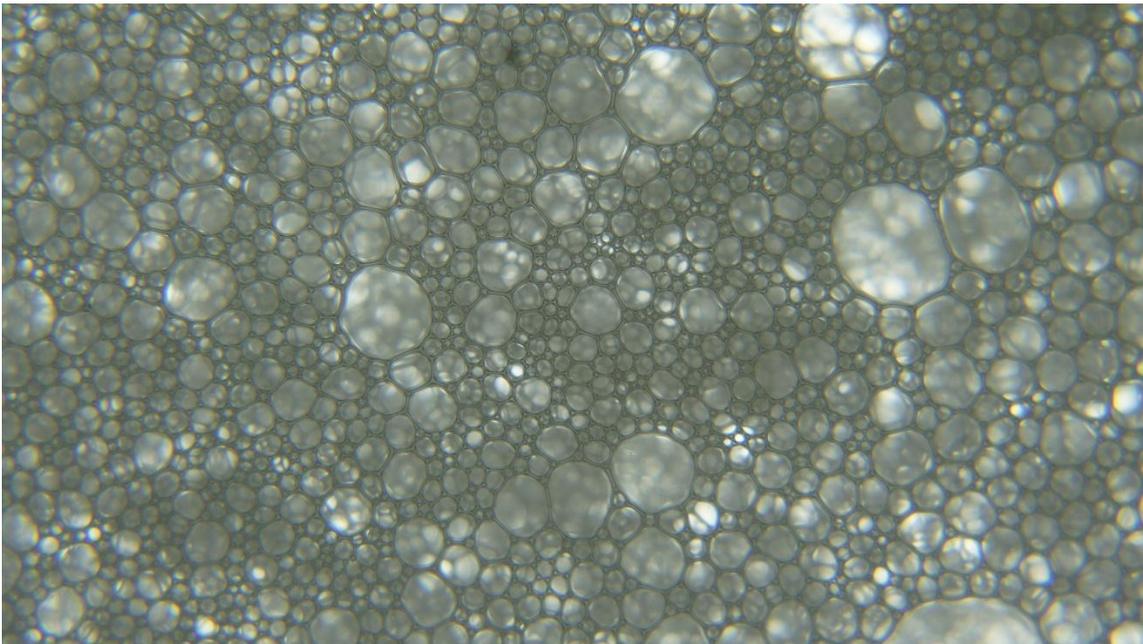


Figura 6. 12. Imagen de entrada para la función *burbujas_poliedricas*

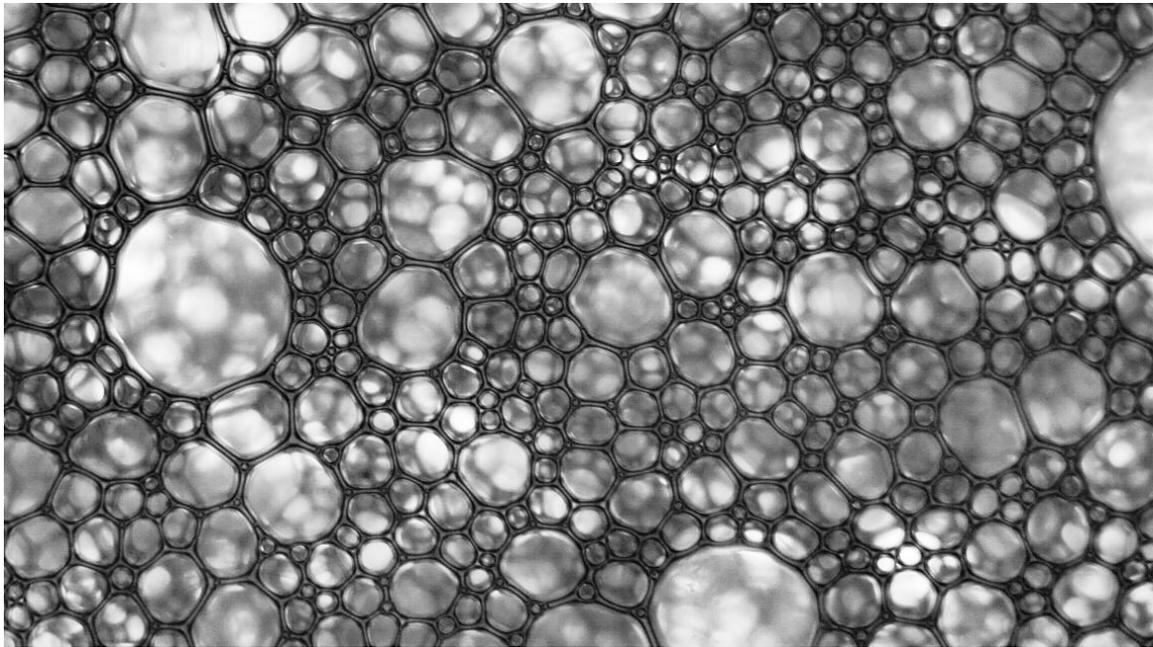


Figura 6. 13. Resultado de la técnica adaptative y de la función recortar_Imagen, también es el parámetro de retorno por la función

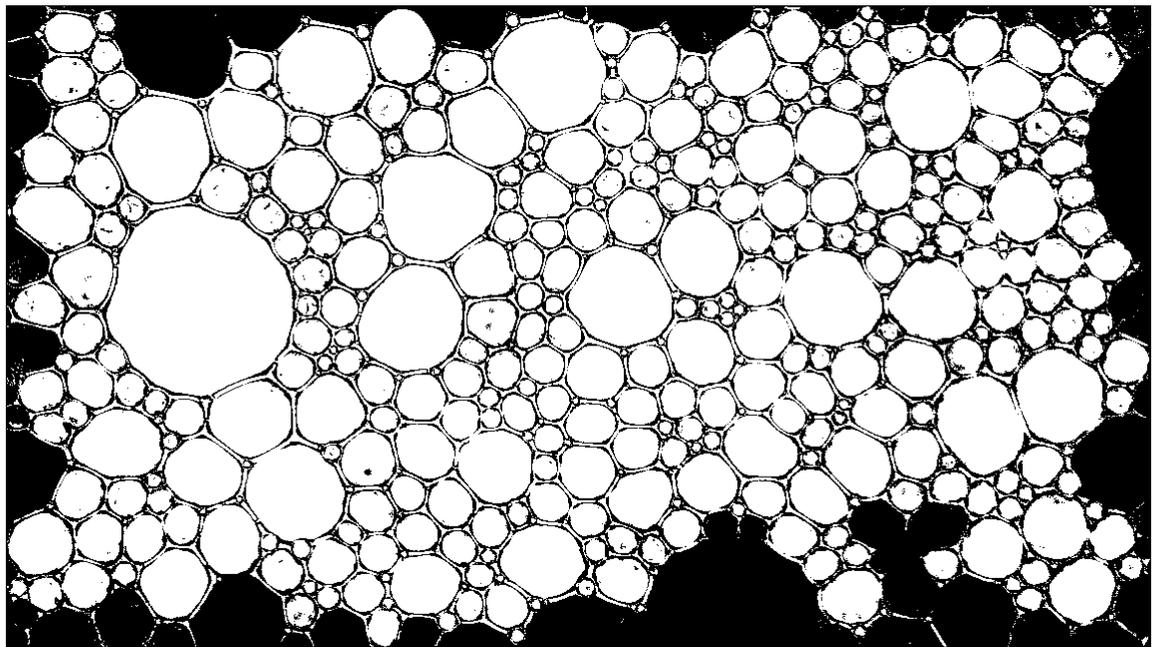


Figura 6. 14. Limpado de bordes y binarización de la imagen (imclearborder e im2bw)

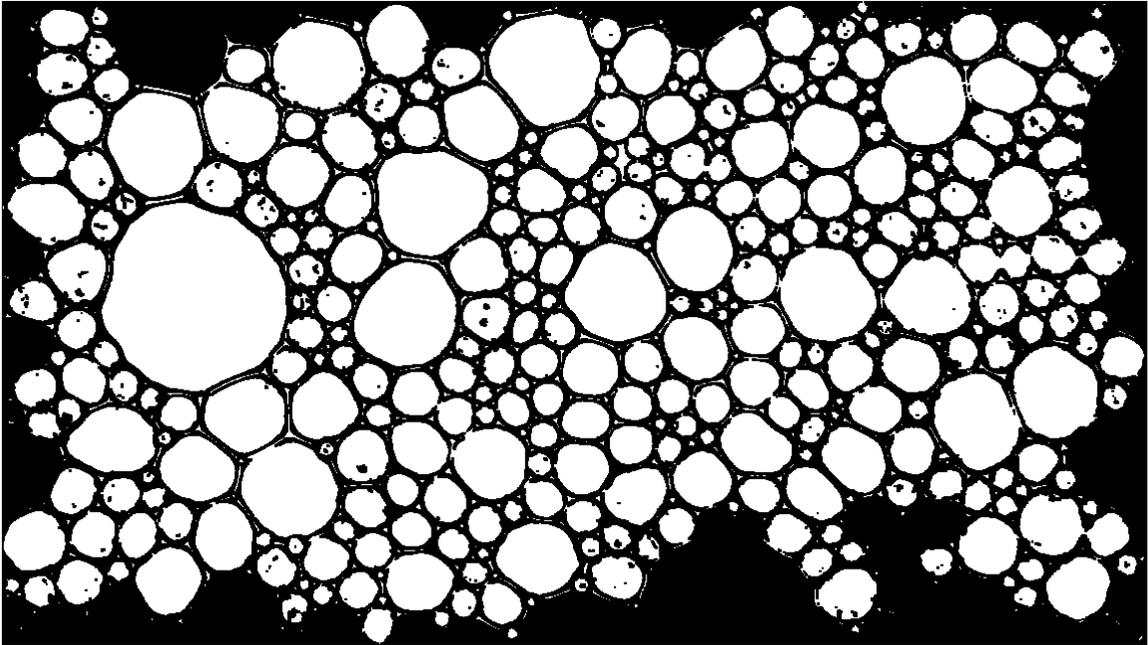


Figura 6. 15. Resultado de invocar la función disminuir_borde_objeto

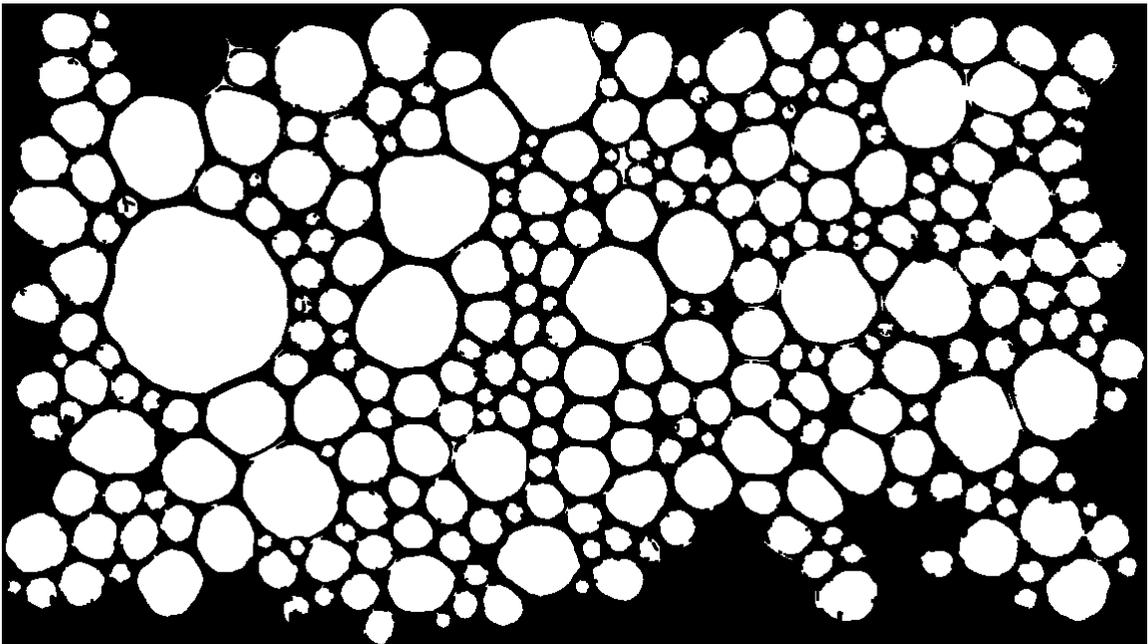


Figura 6. 16. Resultado final mediante imfill y bwareaopen

6.2. Copiado de Imagen de ruta 1 a ruta 2

Una vez que se hayan seleccionado los diferentes tipos de resultados estadísticos y la morfología de las burbujas, es necesario indicar la ruta de análisis (ruta_1) y de resultados

(ruta_2), donde ruta_1 es aquel directorio que contiene la secuencia de imágenes a procesar y la ruta_2 es la dirección de la carpeta donde se desean almacenar los resultados, el nombre de dichas carpetas es indistinto por el software.

Debido a que *FoamTexQu* tiene la capacidad de procesar n imágenes, es de vital importancia mencionar que la secuencia de estas tiene que llevar un orden alfanumérico, por lo tanto, se debe tener presente que la primera imagen, por protocolo, tiene que ser la escala de referencia y que, como característica fundamental debe contener sólo un círculo ubicado en el centro de la imagen, con diámetro de 0.6 mm, como se muestra a continuación

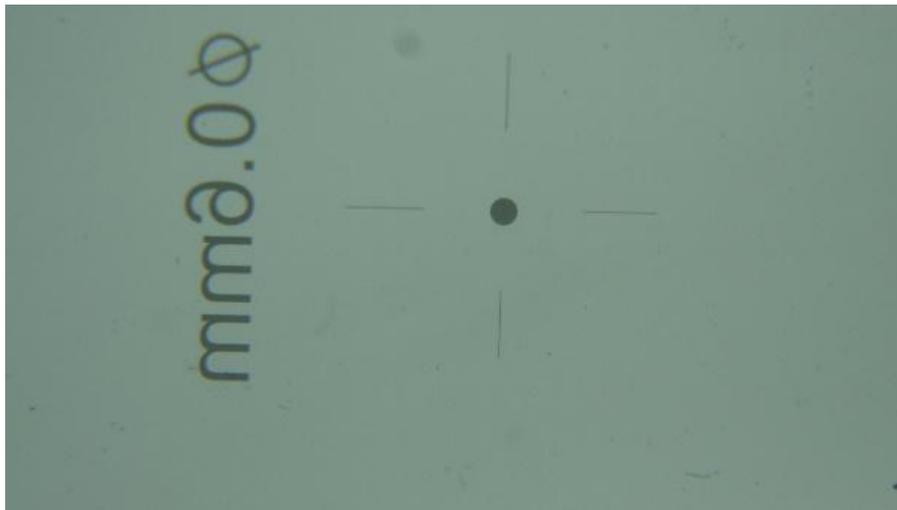


Figura 6. 17. Círculo de escala de referencia con 0.6mm de diámetro

6.3. Proceso de Imagen con Escala de Referencia

El proceso final para la detección de la escala referencia, definida como un círculo en el centro de la imagen, concluye con la invocación de algunas de las funciones explicadas en los subcapítulos anteriores. Su proceso consiste y se representa por el siguiente diagrama de flujo (Figura 6.18).

Este proceso recibe como parámetro de entrada la primera imagen contenida en la carpeta seleccionada por el usuario, la procesa para encontrar el círculo que determina la escala de referencia, como se muestra en el pseudocódigo, y finalmente regresa el radio (en pixeles) de este. El pseudocódigo que compone a esta función es el siguiente

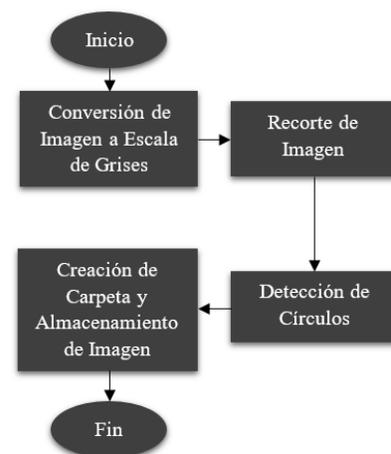


Figura 6. 18. Funcionalidad del proceso para la imagen con escala de referencia

Inicia *proceso_imagen_escala* (*Imagen_Original*)

con ayuda de la función *rgb2gray* de Matlab, se convierte la *Imagen_Original* a escala de grises

im_Gris \rightarrow *convertirAGrises(Imagen_Original)*

se recortan las dimensiones de *im_Gris*, con ayuda de la función *recortar_Imagen*

imR \rightarrow *recortar_Imagen(im_Gris)*

se definen los valores posibles del radio mínimo (*Rmin*) y máximo (*Rmax*), en pixeles, para encontrar el círculo. Ya que para esta imagen existe un solo círculo, los valores definidos son los siguientes

Rmin \rightarrow 30 pixeles

Rmax \rightarrow 100 pixeles

Para encontrar el radio del círculo de referencia, fue necesario usar la función *imfindcircles* del ToolBox de Matlab, explicada en el *Capítulo 5*.

[centroCírculo, refRad_pix] \rightarrow *encontrarCirculos(imR, [Rmin, Rmax], ...)*

regresa el *refRad_pix* del círculo, el cual está determinado en pixeles y, posteriormente, ayuda a determinar la medida real (milímetros) de cada una de las burbujas detectadas.

Fin de *proceso_imagen_escala*

6.4. Creación de Carpeta y Almacenamiento de Imágenes

Al finalizar el paso **6.3.**, el software crea una carpeta (de nombre *Imagen_de_referencia*) en la ruta_2, en donde se almacenan tanto la imagen original como la imagen con el círculo encontrado

6.5. Morfología de Burbujas

6.5.1. Copiado de Imagen de ruta_1 a ruta_2

Este paso es similar al punto **6.2.**, donde la función es copiar la imagen siguiente de la ruta_1 a la ruta_2, pero la diferencia es que en este paso se extrae una imagen de espumas en cada iteración hasta que la carpeta de imágenes por procesar esté vacía o sin archivos con formato *JPG*.

6.5.2. Proceso Burbujas Esféricas

Este es el proceso final para la detección, cuantificación y caracterización de las burbujas contenidas en una muestra de espuma, su funcionalidad se representa en el siguiente diagrama de flujo (Figura 6.19).

La función final llamada *proceso_burbujas_esfericas* se basa en invocar algunas de las funciones previamente explicadas. Es una técnica que consiste en recibir diferentes parámetros de entrada para que pueda satisfacer a las funciones indicadas. Devuelve el diámetro equivalente para cada una de las burbujas y algunos otros parámetros, los cuales serán mostrados en el siguiente pseudocódigo, con el fin de poder crear un histograma por cada imagen analizada y un reporte final sobre la textura de las espumas procesadas.

Inicia *proceso_burbujas_esfericas(imagen, Rmin, Rmax, opciones, refRad_pix, refRad_mm, área_de_un_pixel, noMuestra, morf)*

Se invoca la función *burbujas_esfericas(imagen, Rmin, Rmax)* la cual devuelve los radios de cada burbuja detectada, *radius_pix*, una imagen con mejoramiento de contraste, *imC*, y una imagen binaria, *imB*

Se crea una imagen con los círculos encontrados, *burbujasDetectadas*

En la *ruta_2* se guardan las siguientes imágenes: *burbujasDetectadas*, *imC*, *imagen*

Se invoca la función *pixeles_a_milímetros(radius_pix, refRad_pix, refRad_mm)*, esta función como se explicó anteriormente, devuelve los diámetros equivalentes de cada burbuja, *dEQ*, en la medida real, milímetros

Finalmente invoca a la función *datos_estadisticos(dEQ, noMuestra, imagen, área_de_un_pixel, opciones, morf, circularidad)* la cual genera un archivo en Excel con sus diferentes datos y de donde se obtienen los siguientes parámetros: diámetro medio, *Dmed*, su desviación estándar, *DSdiam*, el número de burbujas, *noBurb*, el área total del espacio ocupado por las burbujas, *areaT_burb* y el área total de la región muestreada (imagen procesada), *areaT_espuma*. Debido a que este proceso es para burbujas esféricas, el parámetro *morf* será definido como 'esféricas', ya que es un parámetro importante para la generación del archivo Excel.

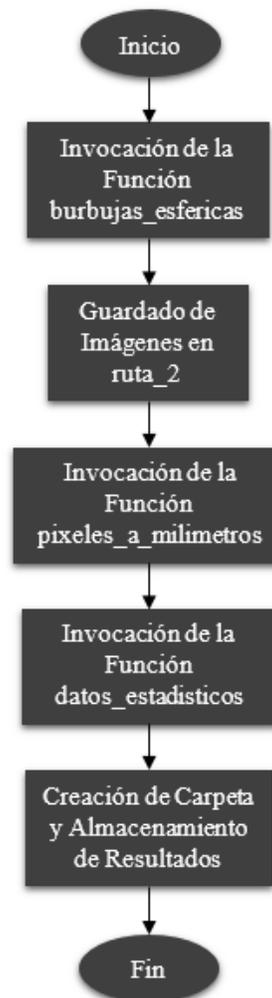


Figura 6. 19. Diagrama de flujo para la caracterización de burbujas esféricas

Como paso final, crea una carpeta en la ruta_2 para esta muestra y en ella se guardan los archivos generados anteriormente.

Devuelve los parámetros: *Dmed*, *DSdiam*, *noBurb*, *areaT_burb* y *areaT_espuma*

Fin de *proceso_burbujas_esfericas*

6.5.3. Proceso Burbujas Poliédricas

Los pasos para este proceso final son similares al del punto anterior (6.5.2) pero, la diferencia resalta en la morfología de la burbuja y en los algoritmos utilizados para cada una de ellas. La funcionalidad de este proceso se visualiza en la Figura 6.20.

El paso final para la detección y caracterización de burbujas poliédricas consiste en la siguiente función denominada *proceso_burbujas_esfericas* la cual se combina de algunas de las funciones explicadas con anterioridad y donde su objetivo es procesar una o *n* imágenes de espumas con estructura poliédrica. El siguiente pseudocódigo muestra la estructura de este proceso.

Inicia *proceso_burbujas_poliedricas(imagen, refRad_mm, refRad_pix, opciones, área_de_un_pixel, noMuestra)*

Se invoca la función *burbujas_poliedricas(imagen, refRad_mm, refRad_pix)* la cual devuelve los diámetros equivalentes, *dEQ*, y circularidad, *circularidad*, de cada una de las burbujas detectadas, también devuelve una imagen recortada, *imC*, con la aplicación de la técnica *adapthisteq*

Se crea una imagen con las burbujas detectadas, *burbujasDetectadas*

En la ruta_2 se guardan las siguientes imágenes: *burbujasDetectadas*, *imC*, *imagen*

Finalmente invoca a la función *datos_estadisticos(dEQ, noMuestra, imagen, área_de_un_pixel, opciones, morf, circularidad)* la cual genera un archivo en Excel con sus diferentes datos y de donde se obtienen los siguientes parámetros: diámetro medio, *Dmed*, su desviación estándar, *DSdiam*, el número de burbujas, *noBurb*, el área total del espacio ocupado por las burbujas, *areaT_burb* y el área total de la región muestreada (imagen procesada), *areaT_espuma*. El parámetro *morf*, para este proceso, es definido como '*poliedricas*'

Como paso final, crea una carpeta en la ruta_2 para esta muestra y en ella se guardan los archivos generados anteriormente



Devuelve los parámetros: *Dmed*, *DSdiam*, *noBurb*, *areaT_burb* y *areaT_espuma*

Fin de *proceso_burbujas_poliedricas*

6.6. Creación de Histograma

Debido a que la textura de una espuma se conoce a partir de la morfología, distribución de tamaños y tamaño promedio de sus burbujas, es importante conocer estos resultados para formar criterios sobre ellos. Un histograma se usa para observar la uniformidad o falta de ella en las burbujas y refleja, de forma gráfica, la distribución de sus tamaños respecto a la frecuencia con que se repiten. Para este Proyecto, fue relevante plasmar en una gráfica los histogramas de cada una de las burbujas, con el fin de observar la repetibilidad en las muestras y percatarse si la textura de una espuma cambia conforme a un muestreo aleatorio.

Los parámetros para crear un histograma fueron, el intervalo de clases y la frecuencia con que se repite la existencia de burbujas en este. La siguiente figura muestra un ejemplo de un histograma, donde en el eje *x* se plasman los valores de los diámetros de las burbujas y en el eje *y* el número de burbujas.

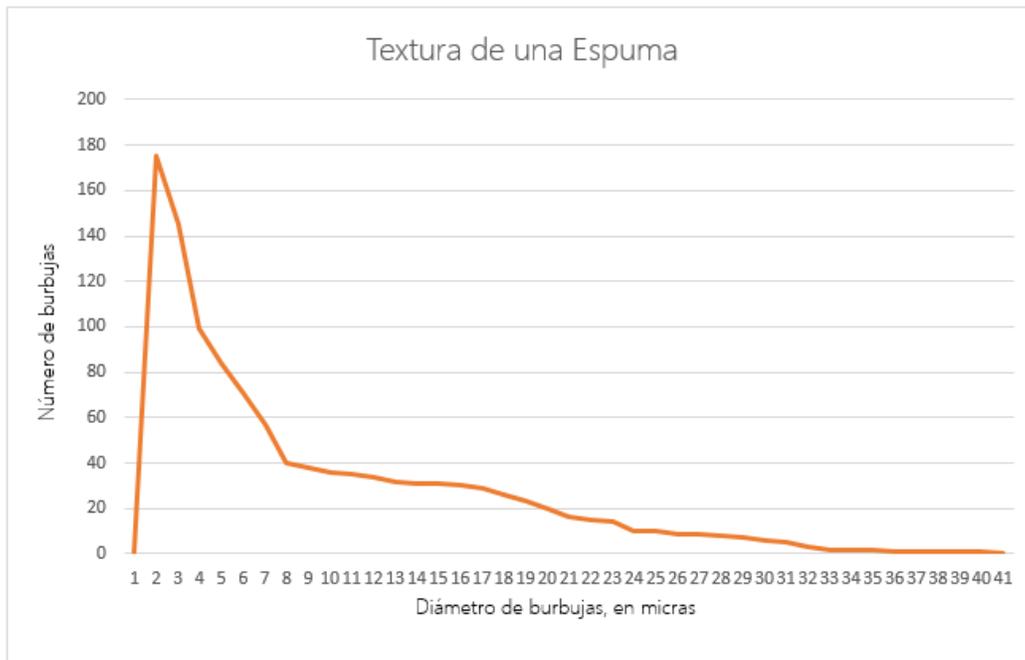


Figura 6. 21. Gráfica de la textura de una espuma

Capítulo 7. Resultados

Para evidenciar la funcionalidad de *FoamTexQu*, se realizaron pruebas empleando imágenes de espumas con estructura esférica y poliédrica, mostrando la interacción del usuario con la interfaz gráfica en el sistema operativo de Windows 7. A continuación, se muestra el diseño de la interfaz principal del programa desarrollado.

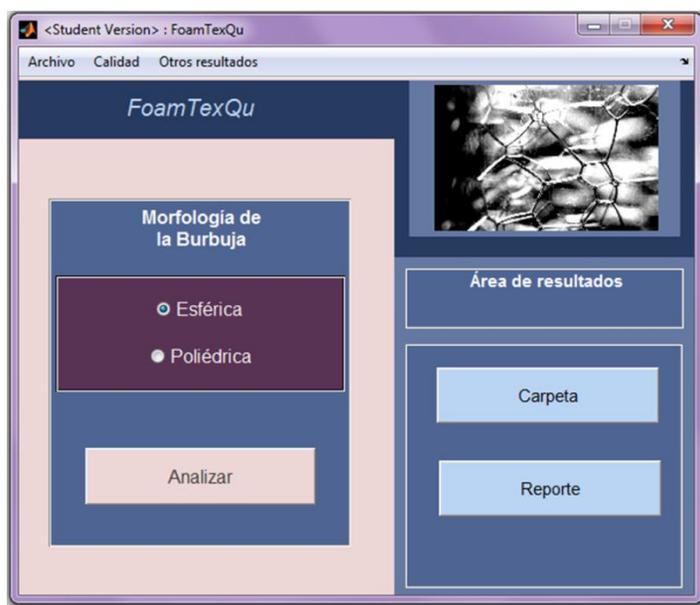


Figura 7. 1. Diseño de la interfaz del software *FoamTexQu*

Se puede visualizar que tiene diferentes opciones de análisis. Una de ellas es la opción del procesamiento de imágenes para determinar la textura de las espumas, la cual se puede llevar a cabo presionando el botón “*Analizar*”, además, se tienen diferentes opciones de resultados estadísticos, visualizados en una nueva interfaz al momento de presionar “*Otros resultados*”. Otra característica capaz de determinar es el cálculo de la calidad de una espuma, donde basta con oprimir la opción nombrada “*Calidad*” y enseguida aparecerá una interfaz que requiere los datos necesarios para realizar dicho cálculo. El botón nombrado como “*Carpeta*” tiene como finalidad abrir la carpeta donde fueron almacenados los resultados. La última tarea que puede llevar a cabo este sistema es la generación de un reporte, éste se puede realizar una vez que termine el análisis de la textura, y es posible oprimiendo el botón “*Reporte*”, ubicado en la parte derecha de la interfaz principal, el cual lleva a cabo la creación de un reporte global de las imágenes analizadas, en formato PDF.

En seguida se mostrará la interacción con la interfaz, a fin de lograr el análisis de textura para espumas con morfología esférica, poliédrica y el cálculo de la calidad, mostrados en los próximos subcapítulos.

7.1. Análisis de Imágenes para Espumas con Estructura Esférica

Para llevar a cabo este proceso, fue necesario la creación de dos carpetas, la primera es nombrada como “*Imágenes por Procesar*” y es aquella que contenía la secuencia de imágenes a analizar, respetando el orden alfanumérico de las imágenes, donde la primera es la escala de referencia y las demás son las imágenes de espumas, para esta prueba, se tomaron 5 imágenes. La segunda es el directorio donde se desean almacenar los resultados y por ello fue necesario que no contuviera archivos. La figura 7.2 muestra las carpetas creadas.

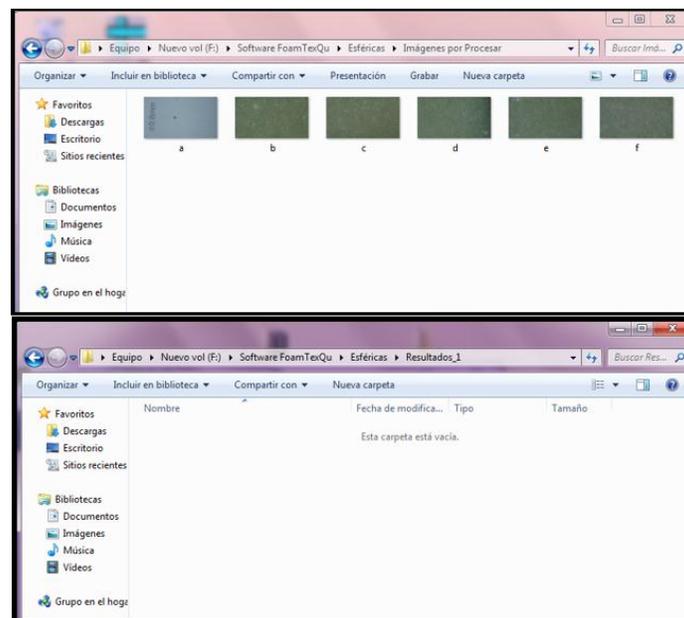


Figura 7. 2. Creación de las carpetas

Se decidió obtener resultados estadísticos adicionales, para ello fue necesario oprimir el botón “*Otros resultados*”, de donde se mostró una interfaz adicional, de la cual se marcaron las opciones que se visualizan en la siguiente figura.

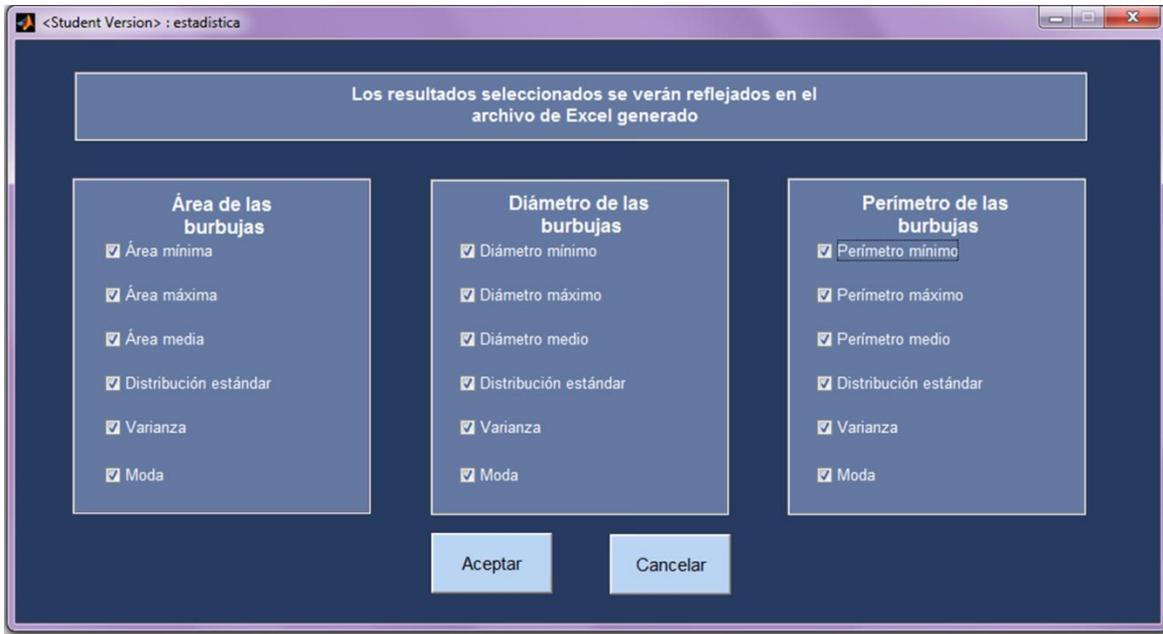


Figura 7. 3. Selección de las opciones de resultados

Posterior a ello, se decidió que el tipo de espuma a analizar serán burbujas esféricas y se seleccionó de la sección “*Morfología de la Burbuja*”, contenida en la interfaz principal.

Una vez seleccionados los parámetros necesarios, se prosiguió al análisis, oprimiendo el botón “*Analizar*”, de donde se presentó una nueva interfaz en la que es posible: 1. Seleccionar una nueva imagen en formato JPG, y a partir de ella 2. Amplificar su tamaño, 3. Reducir su tamaño y 4. Manipular su posición, esto con el fin de medir el diámetro máximo y mínimo de las burbujas.

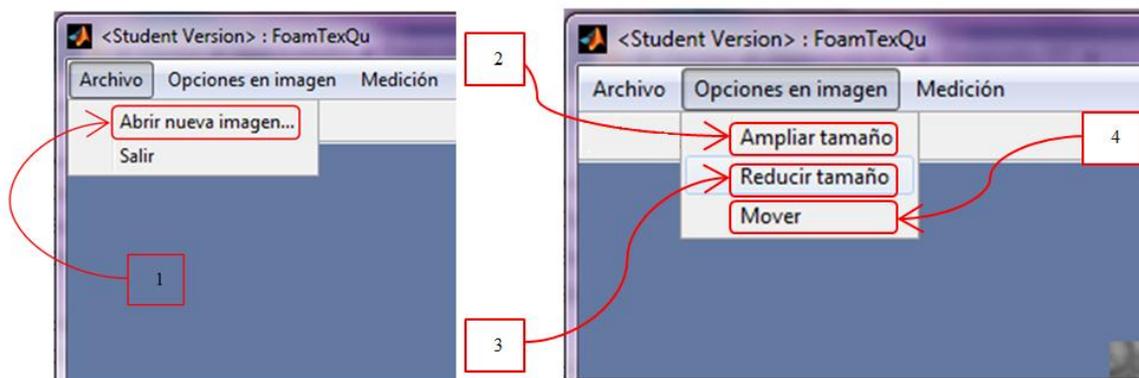


Figura 7. 4. Opciones de la nueva interfaz presentada

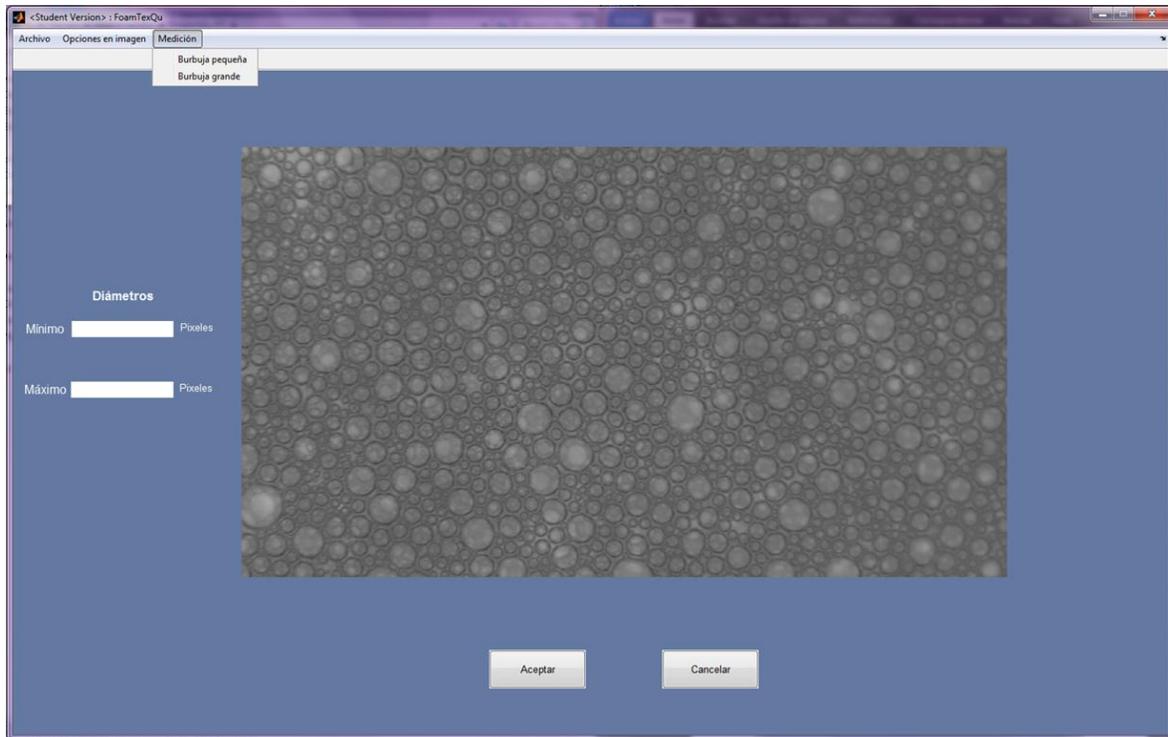


Figura 7. 5. Interface para seleccionar el diámetro máximo y mínimo

Para lograr la medición de los diámetros, se seleccionó de la barra “Medición” el diámetro que se deseó medir y se llevaron a cabo las mediciones.

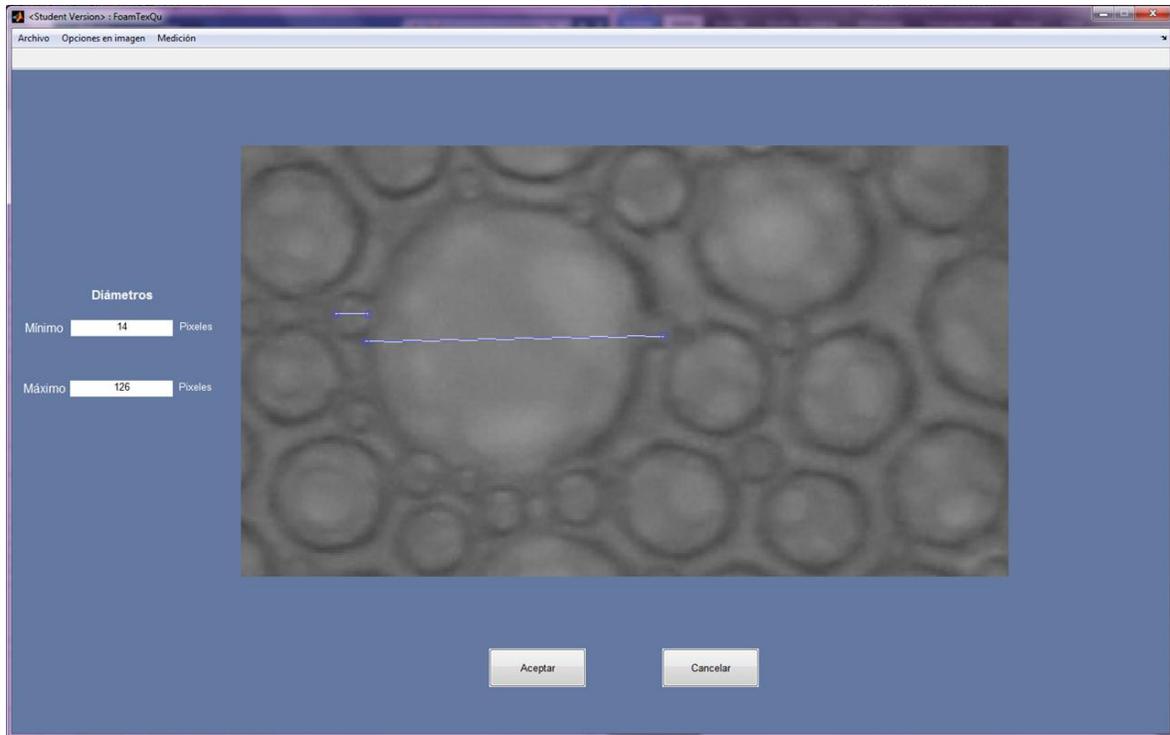


Figura 7. 6. Medición de las burbujas



Figura 7. 7. Cuadro de diálogo

Para guardar los tamaños medidos, se presionó el botón “Calibrar Medidas” y se aceptaron los datos medidos (Figura 7.7) para pasar a la última interfaz, en donde se seleccionaron los directorios de las carpetas creadas anteriormente.

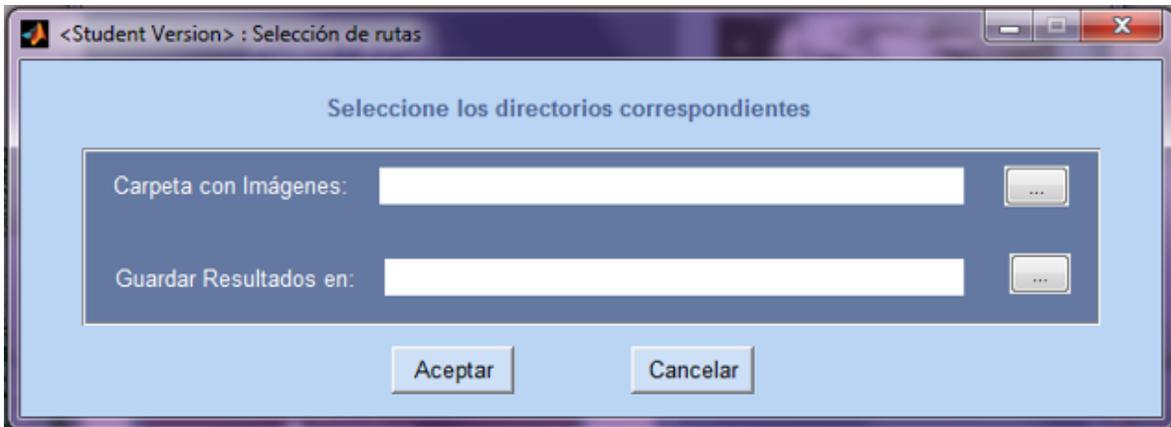


Figura 7. 8. Interface sin rutas seleccionadas

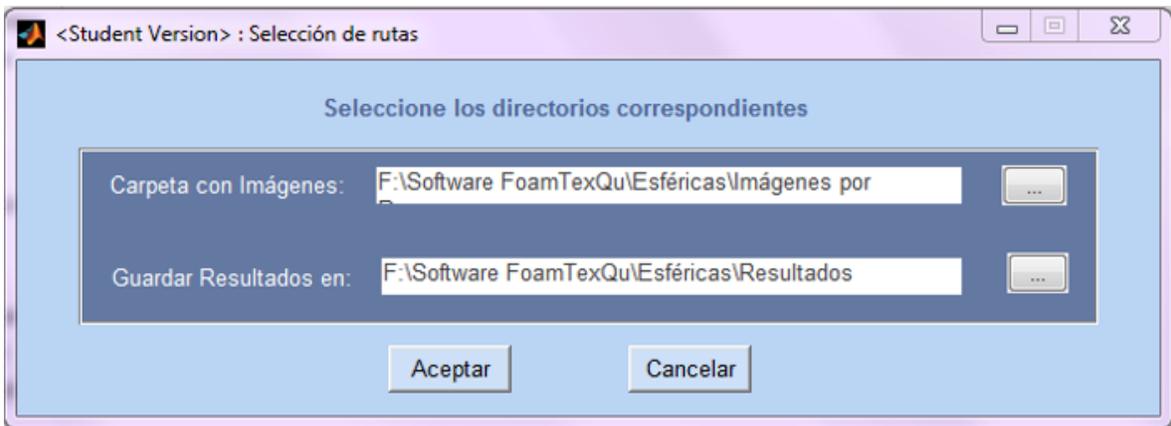


Figura 7. 9. Interface con de rutas seleccionadas

El software comenzó a trabajar y presentó las siguientes barras de estado para cada imagen, mostrando las etapas que se estaban ejecutando y el porcentaje del procesamiento.

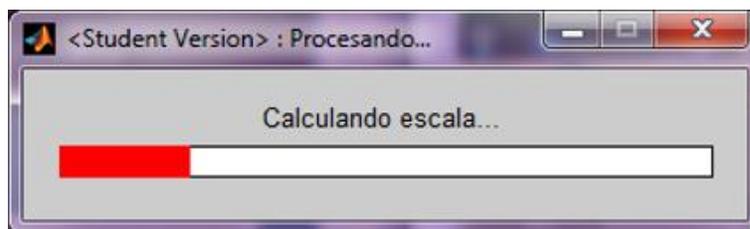


Figura 7. 10. Búsqueda del círculo de escala de referencia

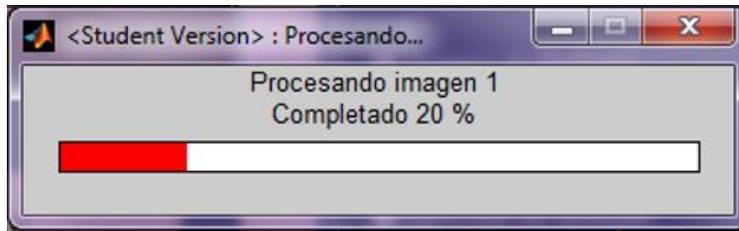


Figura 7. 11. Porcentaje del procesamiento para la imagen 1

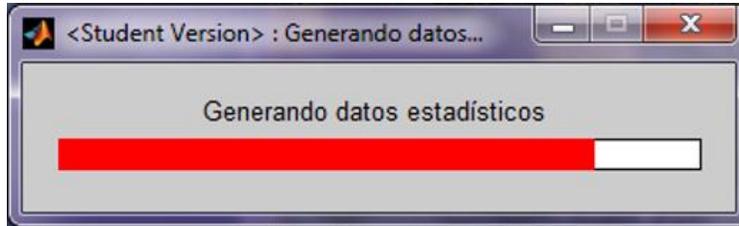


Figura 7. 12. Escribiendo datos en archivo Excel

Una vez terminado el proceso de todas las muestras, se desplegó un diálogo indicando el fin del proceso.

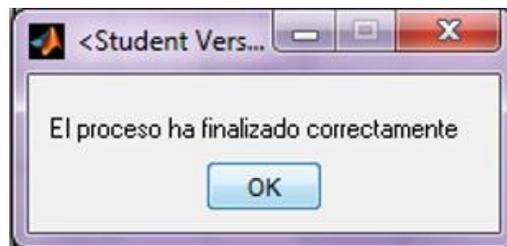


Figura 7. 13. Fin del procesamiento

Para visualizar los resultados, fue necesario visitar la carpeta de resultados seleccionada. Se puede observar que anteriormente esta carpeta estaba vacía (ver Figura 7.2), no obstante, el software hizo su función y almacenó los resultados donde se indicó. Aunado a esto, se generó una carpeta por cada imagen y esta tenía las imágenes: original, con mejoramiento de contraste y la imagen que contiene los círculos encontrados, también se generó un archivo en Excel llamado “*Datos_Muestra_i*” (donde *i* es el número de imagen procesada), como se muestra en la Figura 7.15.

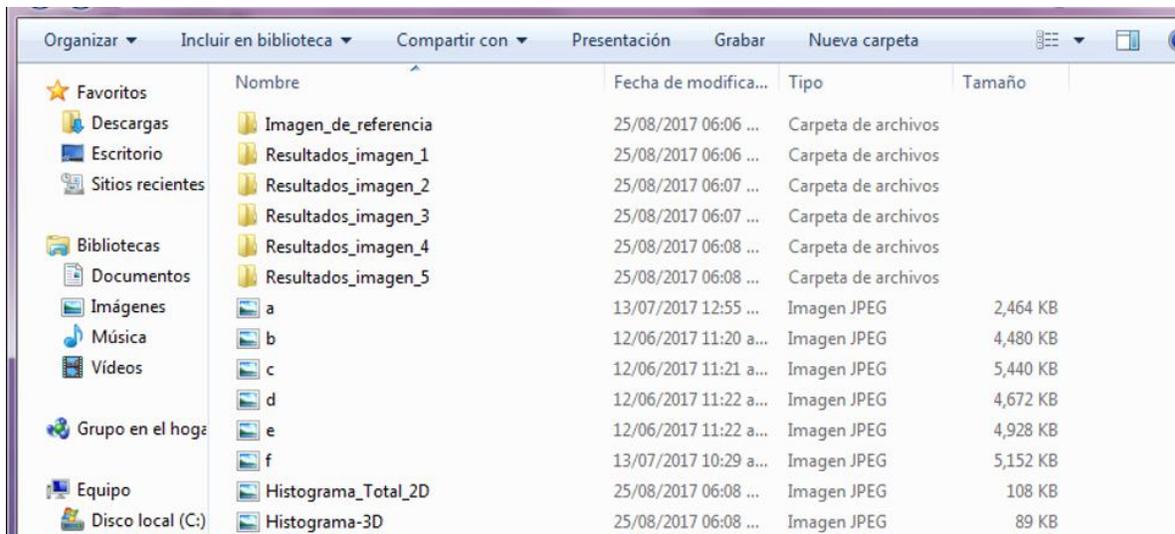


Figura 7. 14. Carpeta con resultados

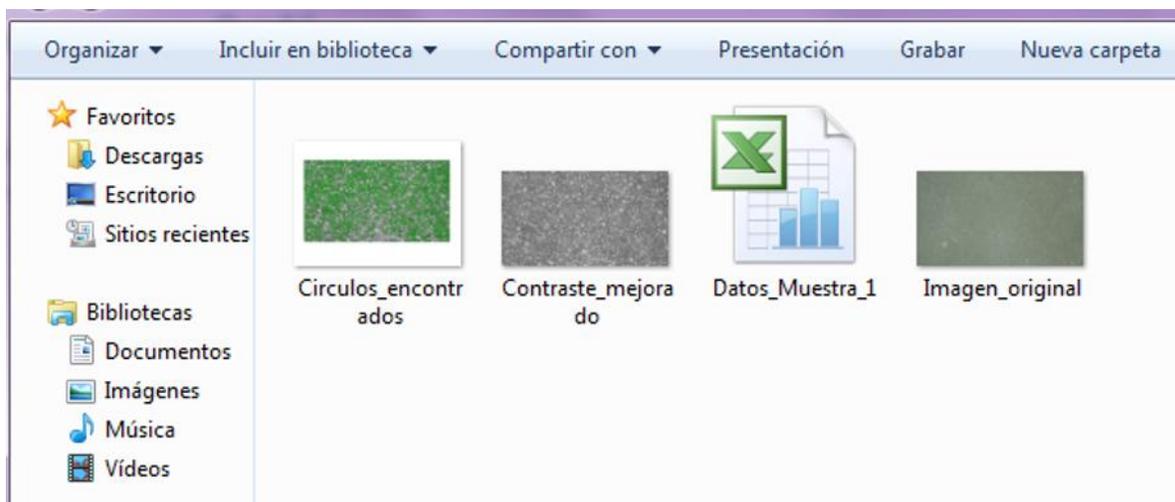


Figura 7. 15. Contenido de la carpeta generada para la imagen 1

Los resultados obtenidos para este análisis fueron los siguientes

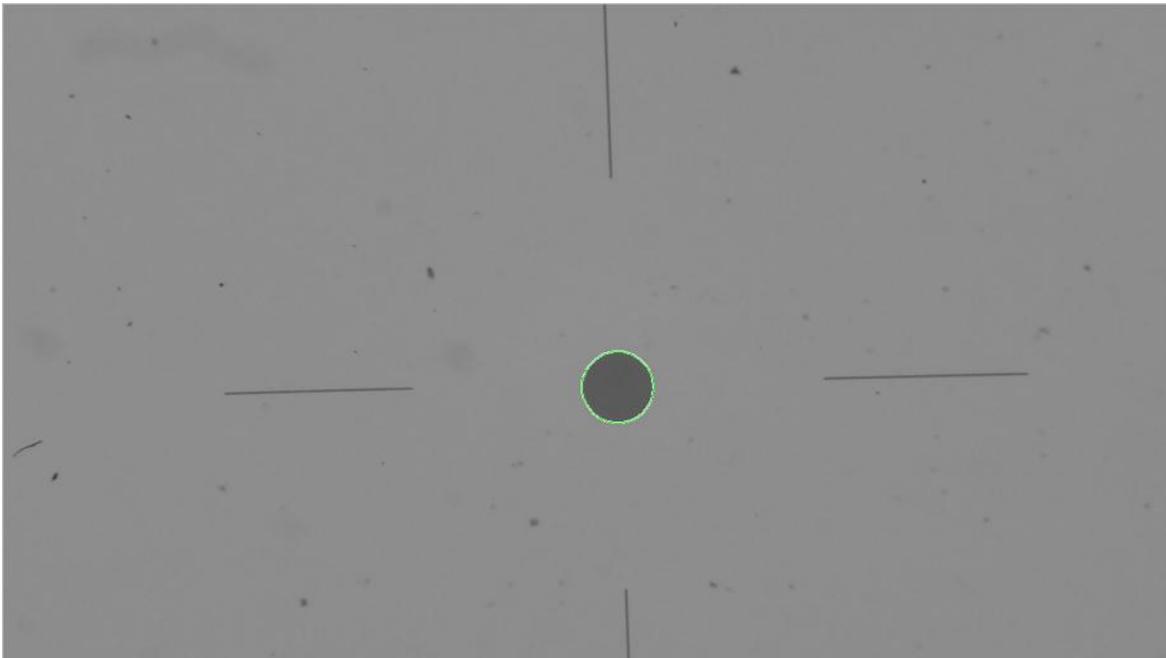


Figura 7. 16. Detección de escala de referencia

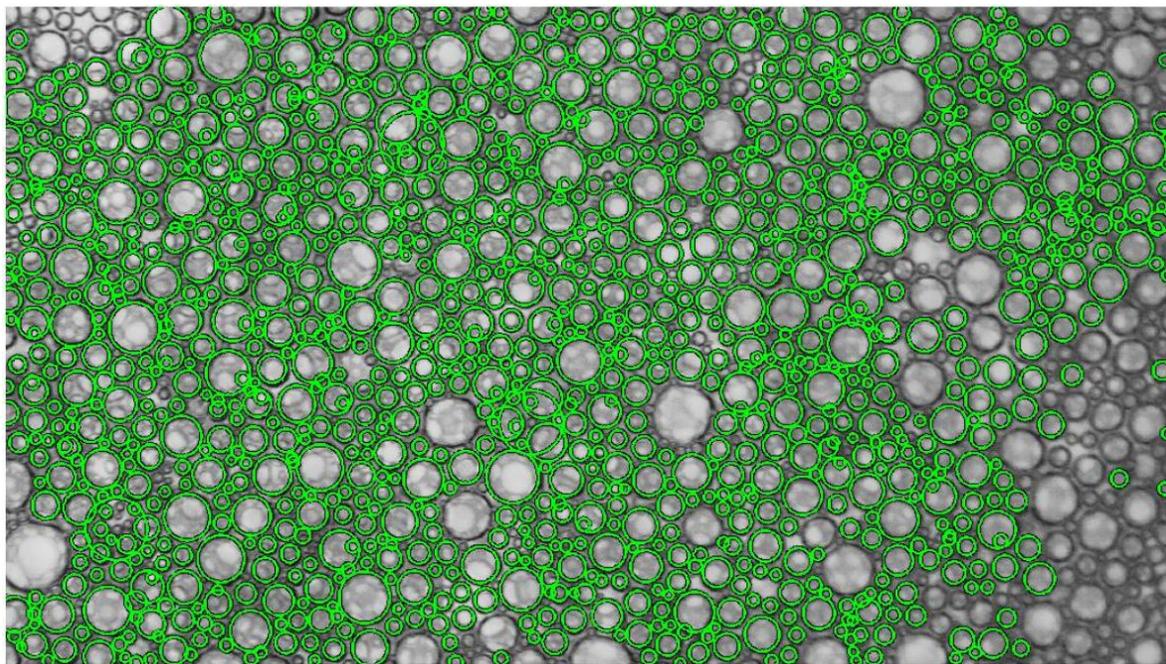


Figura 7. 17. Burbujas detectadas en la imagen 1

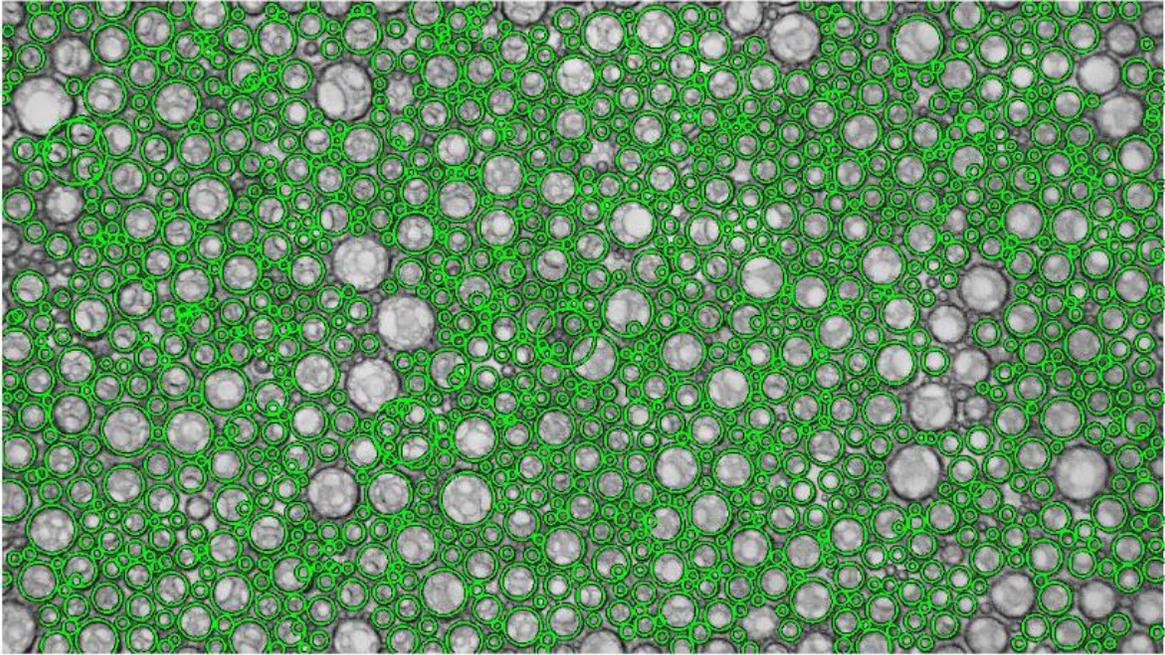


Figura 7. 18. Burbujas detectadas en la imagen 2

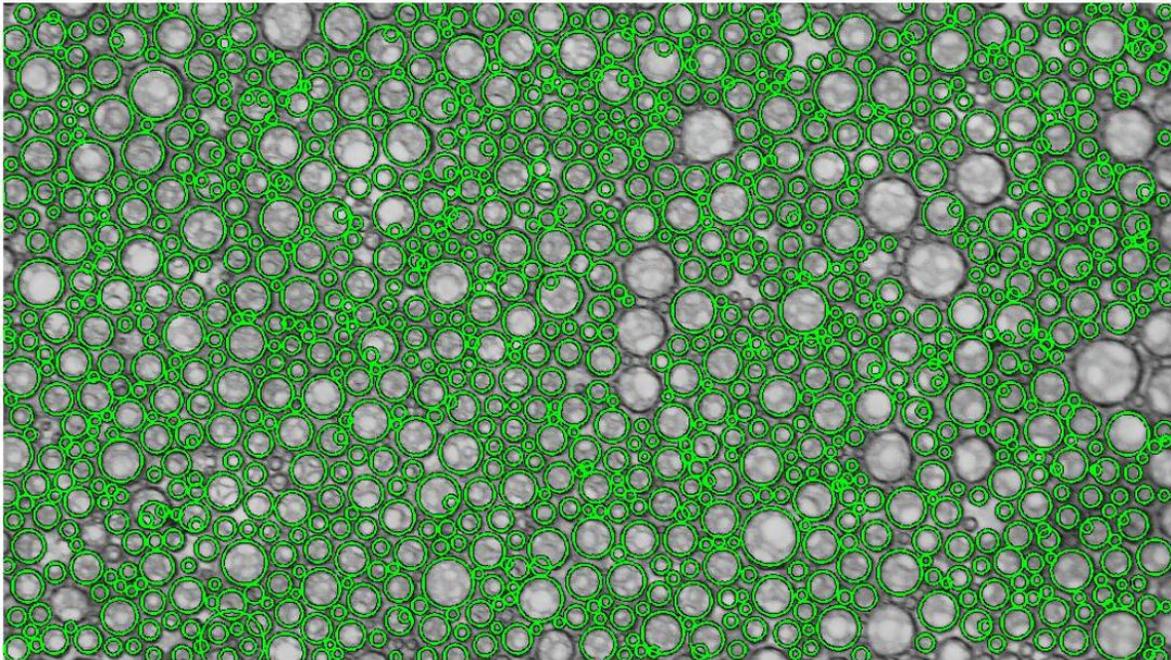


Figura 7. 19. Burbujas detectadas en la imagen 3

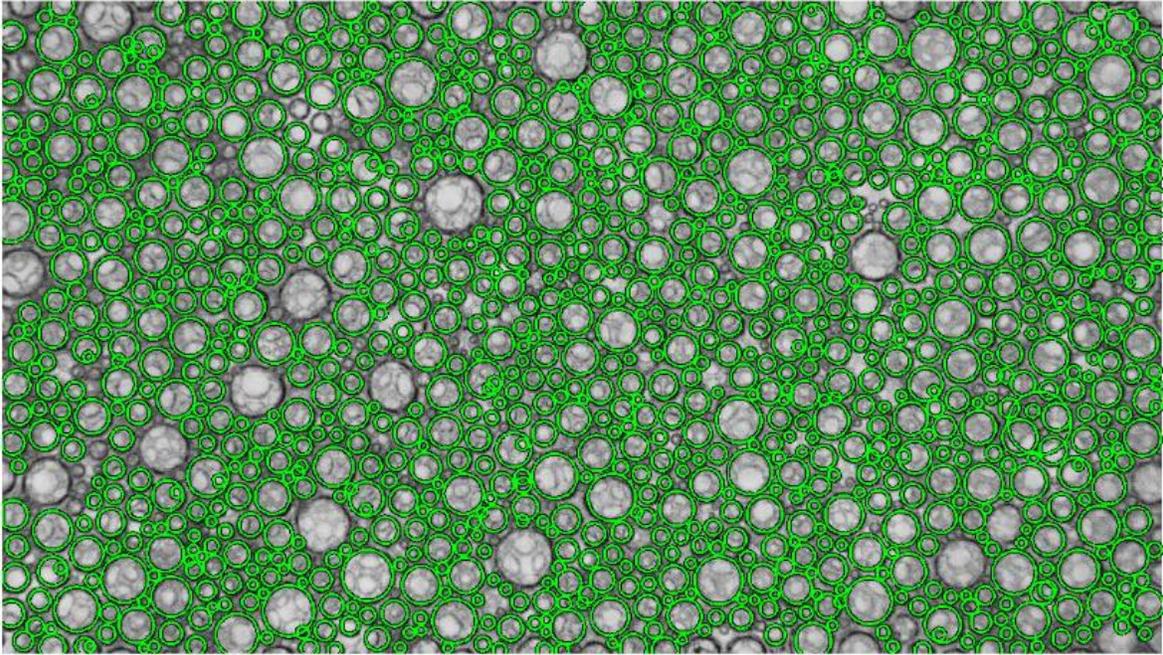


Figura 7. 20. Burbujas detectadas en la imagen 4

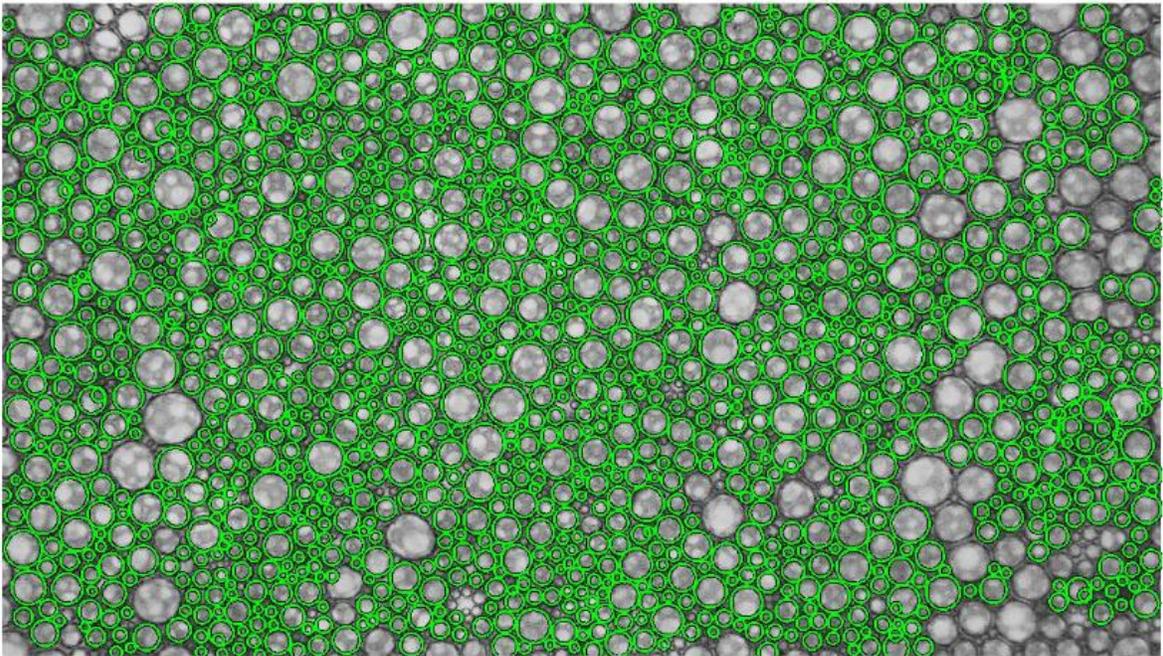


Figura 7. 21. Burbujas detectadas en la imagen 5

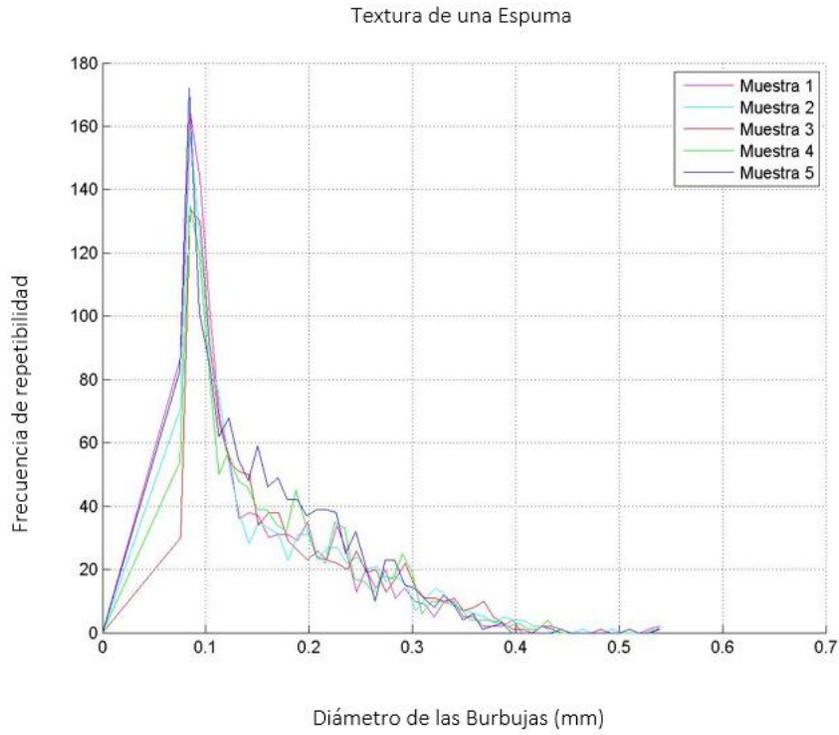


Figura 7. 22. Histograma en 2D de cada una de las imágenes

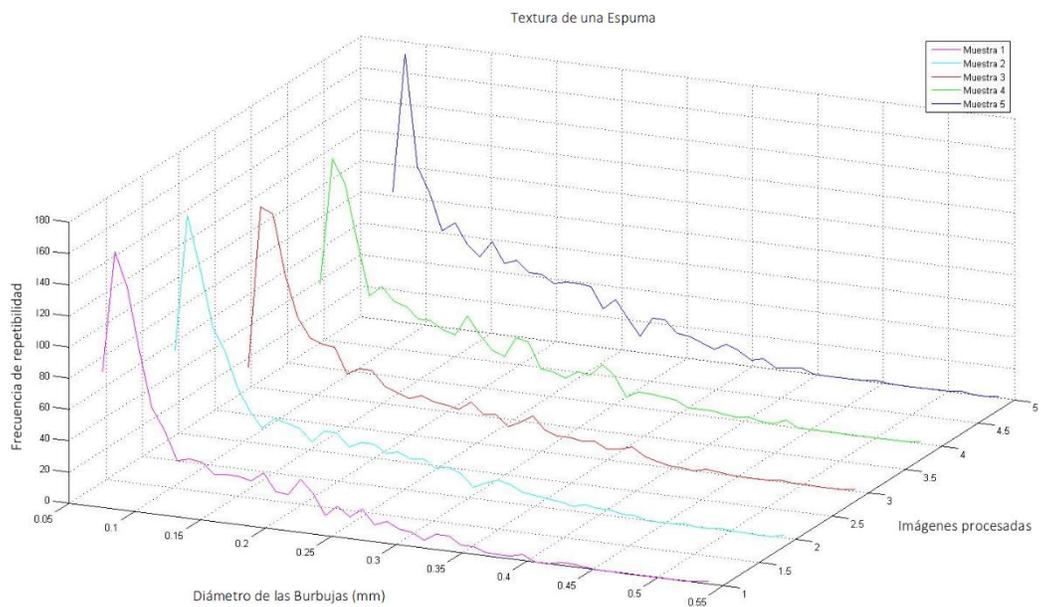


Figura 7. 23. Histograma en 3D de cada una de las imágenes

El archivo Excel generado para cada imagen procesada, presenta características similares a la siguiente imagen

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2			UNIDAD	DE	MEDIDA:	MILÍMETROS								
3														
4		No Burbuja	Diámetro	Área	Perímetro		No Burbujas	1159		Amin	0.0039293		Pmin	0.22220934
5		1	0.10409985	0.00851119	0.32703934					Amax	0.23172787		Pmax	1.70645195
6		2	0.12202205	0.01169409	0.38334356					Amed	0.0231262		Pmed	0.47923504
7		3	0.140432	0.01548895	0.44118014					DSarea	0.02631803		DSperimetro	0.24697926
8		4	0.16953198	0.0225732	0.53260044									
9		5	0.10514915	0.00868363	0.33033579		Dmin	0.07073143		medianaDiam	0.12112105		medianArea	0.01152203
10		6	0.11602386	0.01057267	0.36449971		Dmax	0.54318052		modaDiam	0.07073143		modaArea	0.0039293
11		7	0.10498778	0.008657	0.32982882		Dmed	0.15254525		varianzaDiam	0.00617513		varianzaArea	0.00069204
12		8	0.1795169	0.02531049	0.56396896		DSdiametro	0.07861594						
13		9	0.09557917	0.00717491	0.30027083									
14		10	0.09668286	0.00734157	0.30373817									
15		11	0.08325948	0.00544449	0.26156736		Densidad	47.8882975		medianaPer	0.38051299		Área total	26.8032612
16		12	0.11339699	0.01009934	0.35624714					modaPer	0.22220934			
17		13	0.15358022	0.01852509	0.48248649					varianzaPer	0.06094612			
18		14	0.08198031	0.00527848	0.25754875									
19		15	0.11983747	0.01127912	0.3764805									
20		16	0.12139216	0.01157367	0.38136471									
21		17	0.08520525	0.00570194	0.26768019									
22		18	0.13366914	0.01403305	0.41993398									
23		19	0.13696026	0.01473259	0.43027336									
24		20	0.13145465	0.01357194	0.41297697									

↓

Continúan los datos...

↓

1154		1150	0.1/461084	0.02394596	0.54855614									
1155		1151	0.11317187	0.01005928	0.35553991									
1156		1152	0.09495335	0.00708126	0.29830476									
1157		1153	0.0728679	0.00417025	0.22892126									
1158		1154	0.07526252	0.00444885	0.23644418									
1159		1155	0.08536995	0.005724	0.26819761									
1160		1156	0.09144861	0.00656817	0.28729427									
1161		1157	0.53768685	0.22706422	1.68919306									
1162		1158	0.08370315	0.00550267	0.2629612									
1163		1159	0.08919812	0.00624887	0.28022417									
1164														
1165														

Figura 7. 24. Resultados de las burbujas detectadas para la imagen 1

Finalmente, se decidió generar un reporte de todas las imágenes procesadas, donde se desplegó una nueva interfaz pidiendo los datos del proyecto y operador como se muestra en seguida.

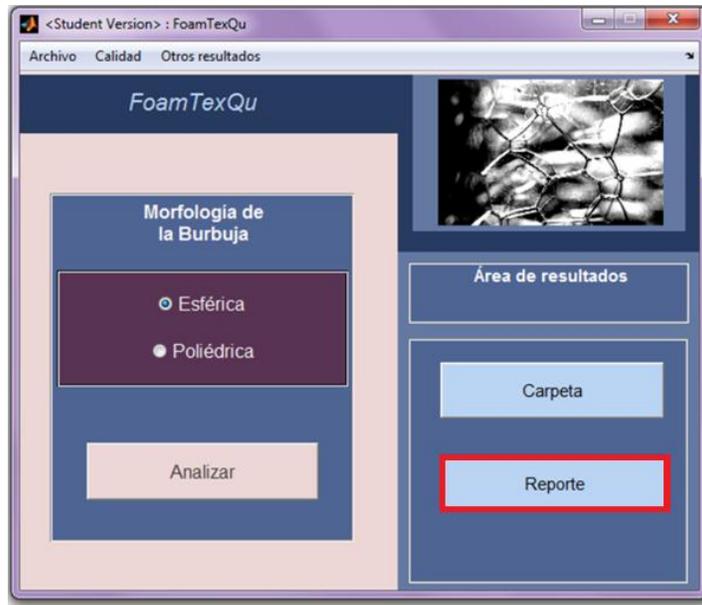


Figura 7. 25. Generar reporte

The image shows a dialog box titled '<Student Version> : Datos para el reporte'. It contains several input fields and a selection control. The fields are: 'Empresa:' with a long text input field; 'Número de Proyecto:' with a short text input field; 'Nombre del Proyecto:' with a long text input field; 'Nombre del Operador:' with a long text input field; and 'Morfología de las Burbujas:' with two radio button options: 'Esféricas' (selected) and 'Polidéricas'. At the bottom of the dialog, there are two buttons: 'Aceptar' and 'Cancelar'.

Figura 7. 26. Campos de información para generar reporte

<Student Version> : Datos para el reporte

Empresa: Universidad Autónoma Metropolitana

Número de Proyecto: UAM.1

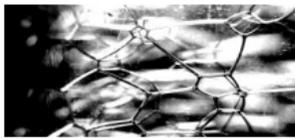
Nombre del Proyecto: Textura de Burbujas con Morfología Esférica

Nombre del Operador: Isidro Raúl Cano Martínez

Morfología de las Burbujas: Esféricas Poliédricas

Aceptar Cancelar

Figura 7. 27. Llenado de campos



REPORTE PARA LA TEXTURA DE ESPUMAS

Fecha: 25-Aug-2017
 Hora: 18 : 11 : 0

Empresa: Universidad Autónoma Metropolitana
 No. Proyecto: UAM.1
 Proyecto: Textura de Burbujas con Morfología Esférica
 Operador: Isidro Raúl Cano Martínez
 Morfología de las Burbujas: Esférica

Resultados:

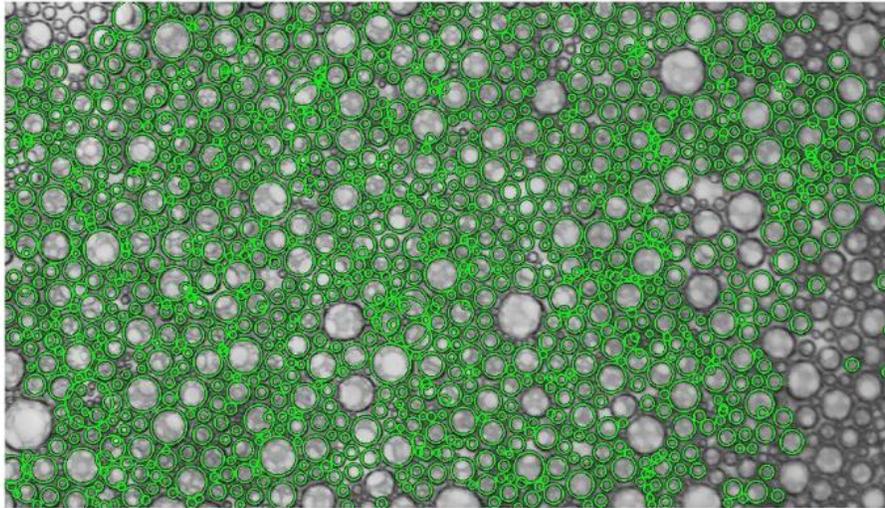
Unidad de Medida: milímetros

Diam mínimo 0.070109
 Diam máximo 0.545303

Muestra	No. Burbujas	Diam medio	D.S.	Area Total de Burbujas	Área Total de Espuma
1	1159	0.15254525	0.07861594	26.8032612	55.9703781
2	1125	0.16116605	0.08482266	29.3019145	55.9703781
3	1100	0.16428097	0.08199866	29.1198109	55.9703781
4	1127	0.16299707	0.07971464	29.1361269	55.9703781
5	1287	0.1585517	0.07402739	30.9453008	55.9703781

Figura 7. 28. Hoja 1 del reporte generado

Referencia:



Histograma:

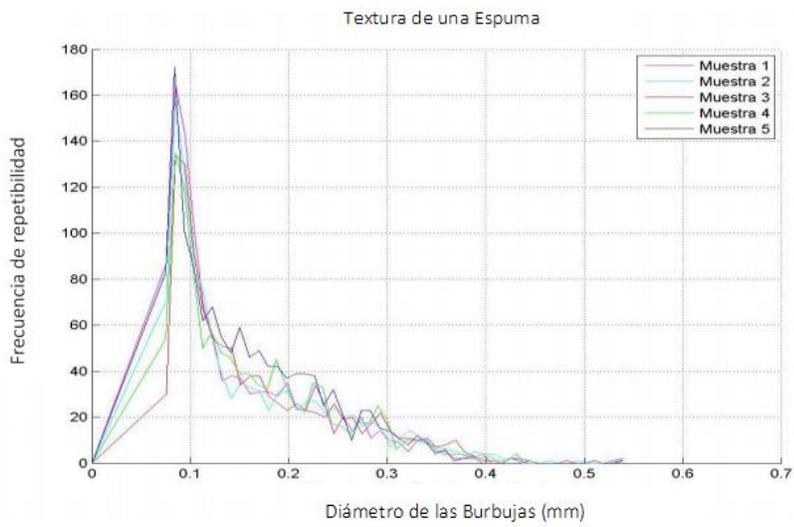


Figura 7. 29. Hoja 2 del reporte generado

7.2. Análisis de Imágenes para Espumas con Estructura Poliédrica

Para este análisis, el procedimiento fue similar al subcapítulo 7.1, pero, la diferencia recae en que, debido a que fueron imágenes de burbujas poliédricas, no fue necesario la medición del diámetro máximo y mínimo, como se realizó anteriormente. Para este análisis, fue importante en la sección “*Tipo de Espuma*”, seleccionar “*Poliédrica*”. Los resultados obtenidos para un conjunto de 5 imágenes de espumas y una escala de referencia, se plasman en las siguientes figuras.

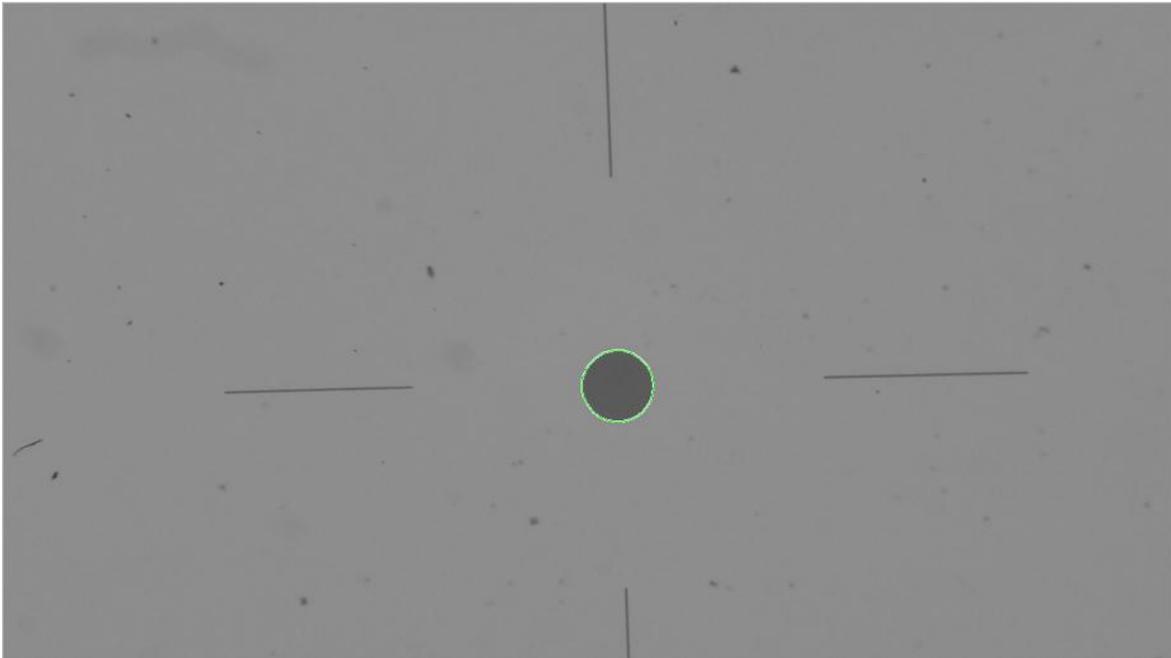


Figura 7. 30. Detección de escala de referencia

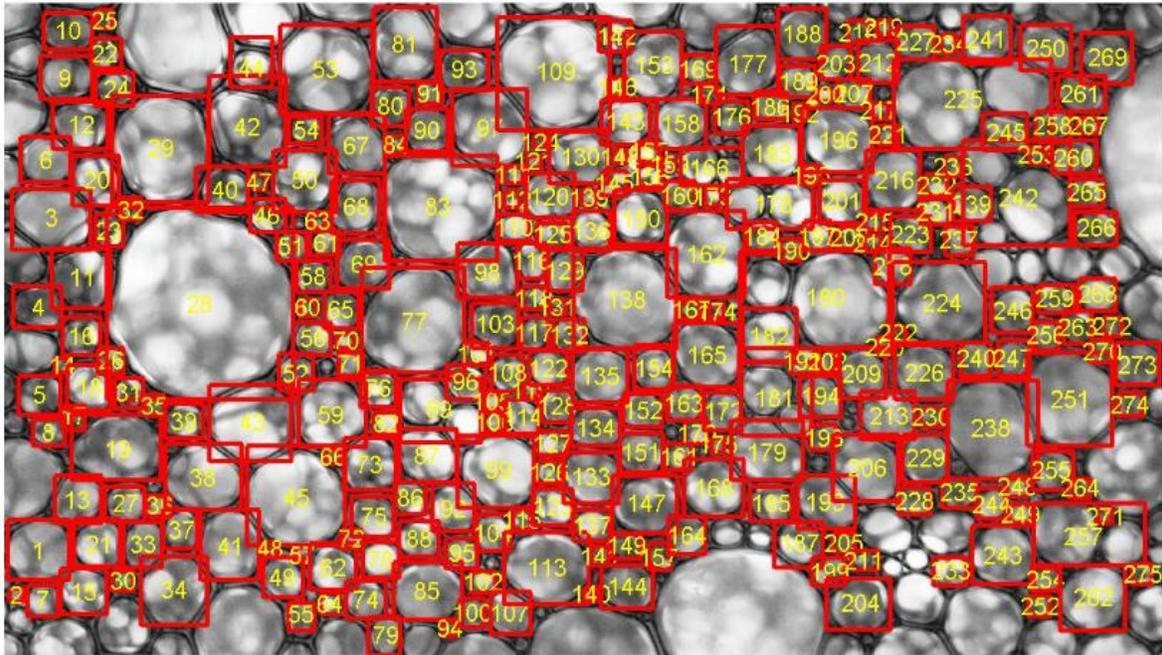


Figura 7. 31. Burbujas detectadas en la imagen 1

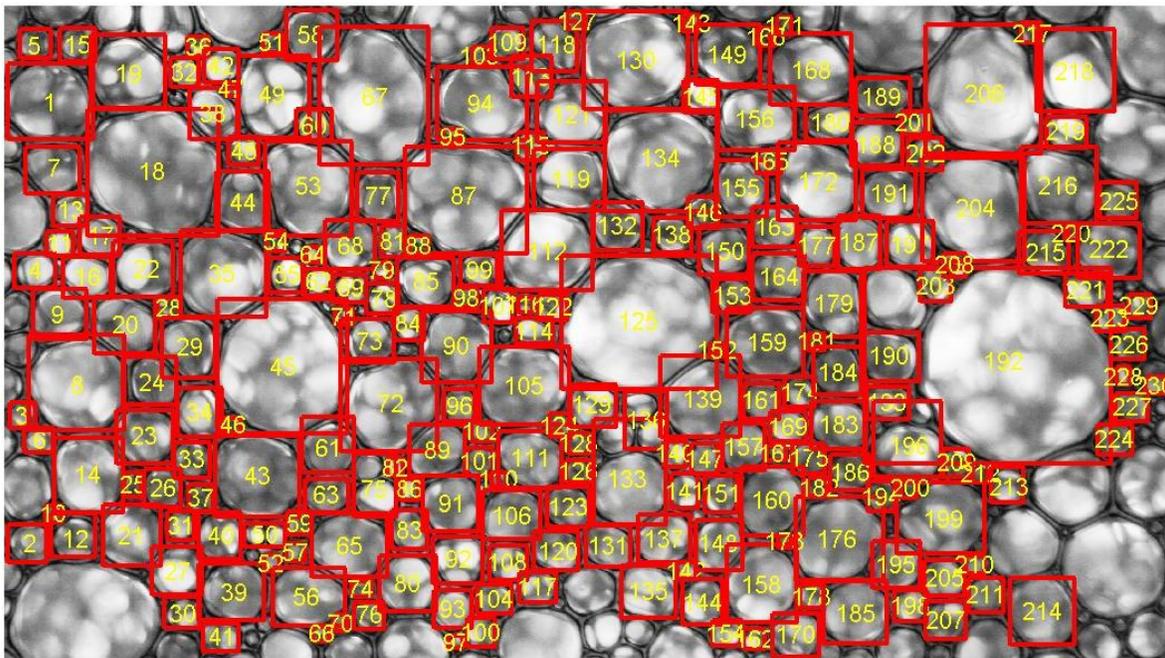


Figura 7. 32. Burbujas detectadas en la imagen 2

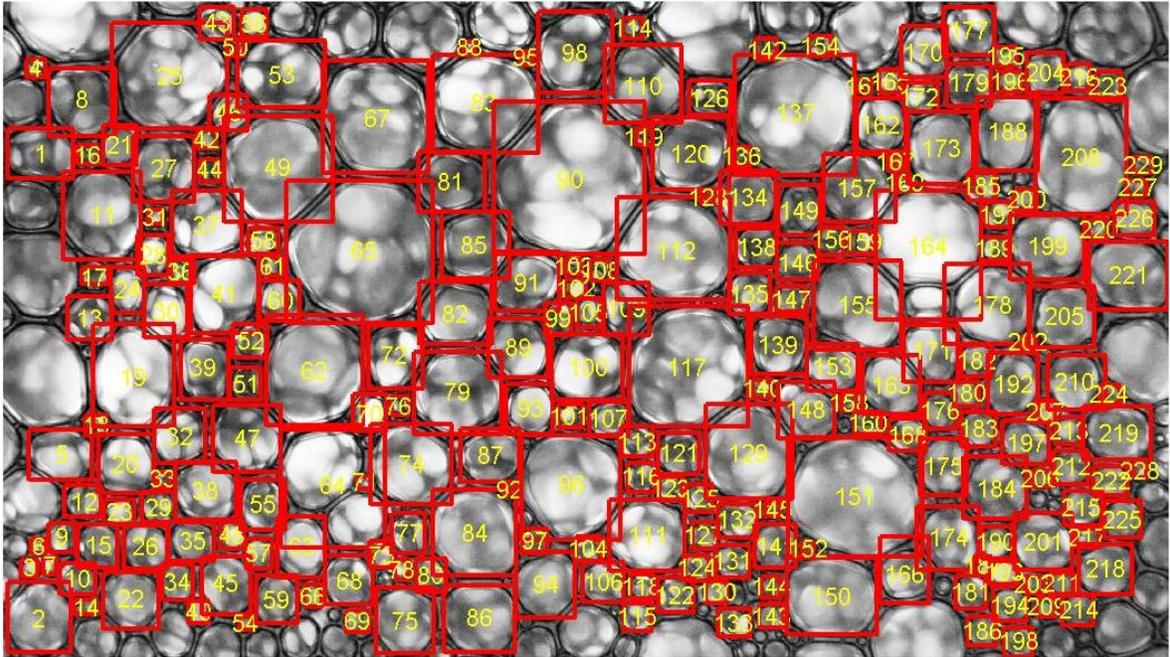


Figura 7. 33. Burbujas detectadas en la imagen 3

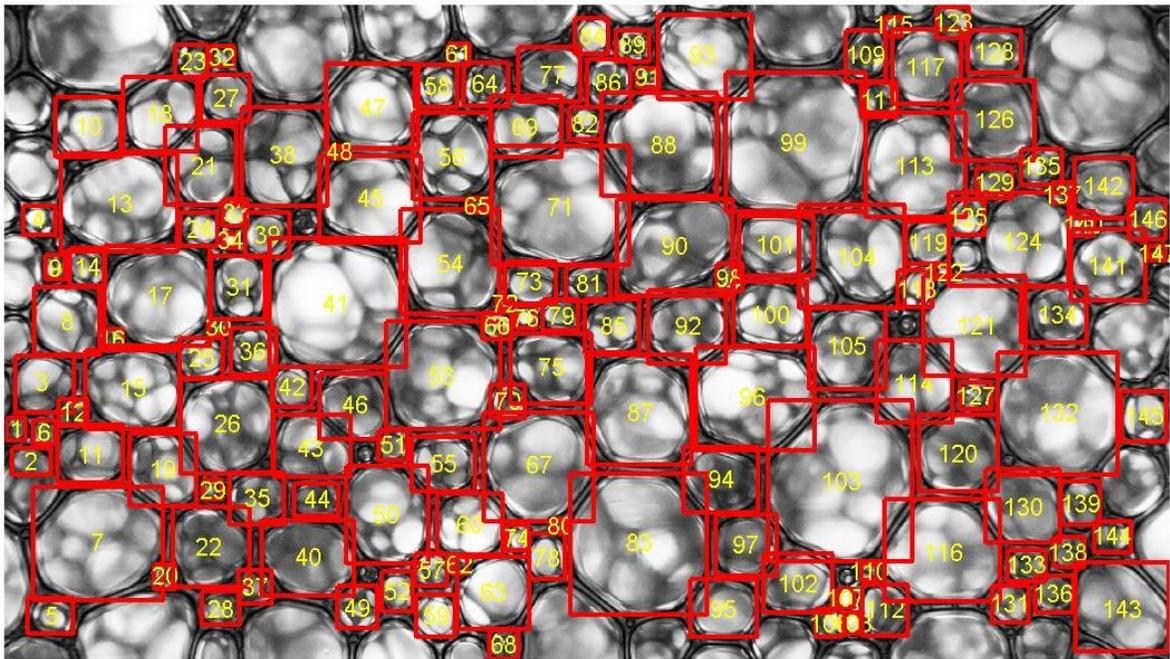


Figura 7. 34. Burbujas detectadas en la imagen 4

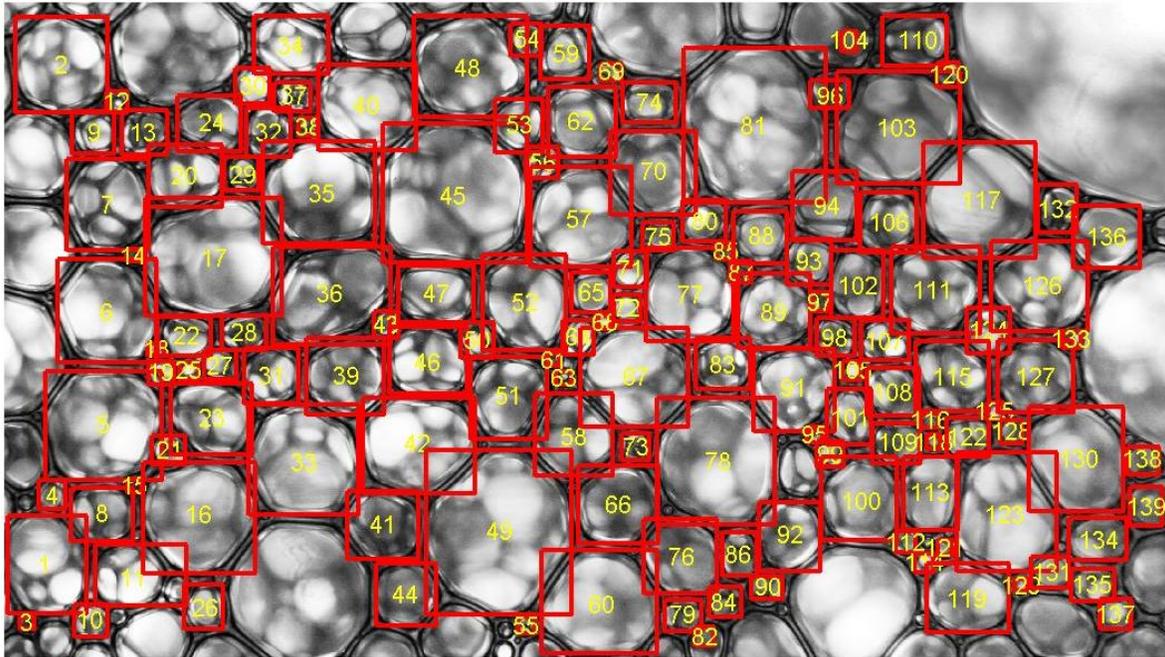


Figura 7. 35. Burbujas detectadas en la imagen 5

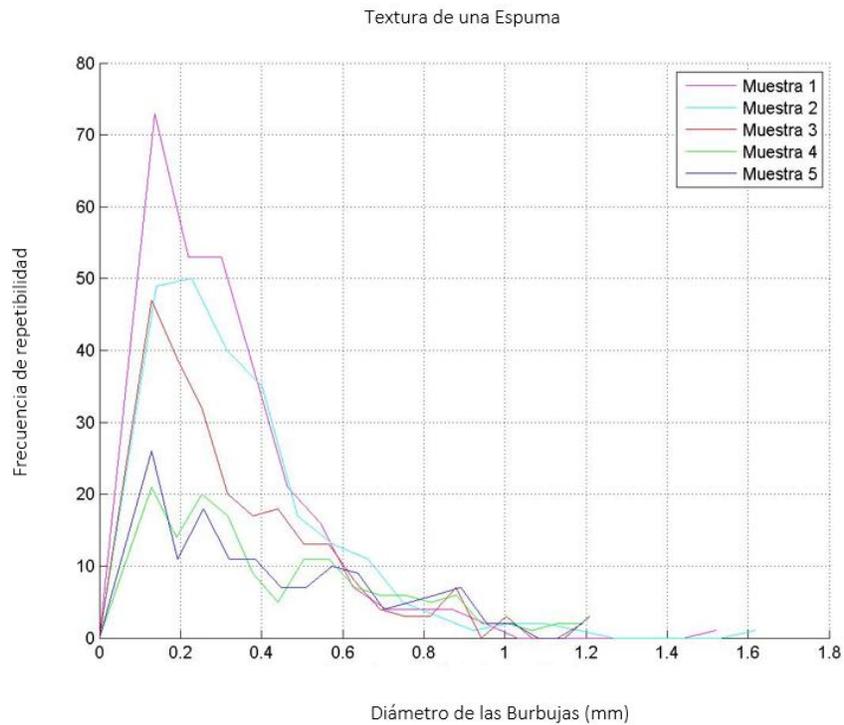


Figura 7. 36. Histograma en 2D de cada una de las imágenes

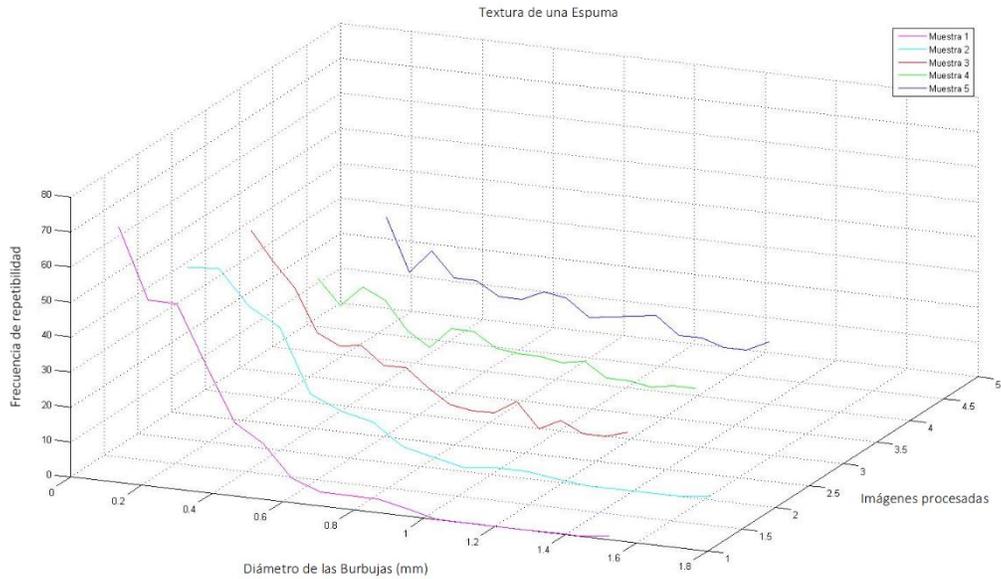


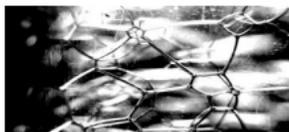
Figura 7. 37. Histograma en 3D de cada una de las imágenes

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1														
2			UNIDAD	DE	MEDIDA:	MILÍMETROS								
3														
4		No Burbuja	Diámetro	Área	Perímetro	Circularidad	No Burbujas	275		Amin	0.00734694		Pmin	0.30384923
5		1	0.508415	0.20301429	1.59723284	0.90444195				Amax	1.91532857		Pmax	4.90598906
6		2	0.10224264	0.0082102	0.32120471	0.73722549				Amed	0.10779495		Pmed	0.99667215
7		3	0.56627668	0.25185306	1.77901065	0.70053209				DSarea	0.16392942		DSperimetro	0.60212485
8		4	0.35477264	0.09885306	1.11455112	0.74533122								
9		5	0.32584135	0.08338776	1.0236608	0.83041338	Dmin	0.09671821		medianaDiam	0.27683213		medianaArea	0.0601898
10		6	0.39468261	0.1223449	1.23993199	0.77743593	Dmax	1.56162482		modaDiam	0.09934237		modaArea	0.00775102
11		7	0.24800255	0.04830612	0.77912299	0.88005782	Dmed	0.3172506		varianzaDiam	0.03660086		varianzaArea	0.02677514
12		8	0.23477836	0.04329184	0.73757797	0.65624877	DSdiametro	0.19166229						
13		9	0.38672171	0.11745918	1.21492207	0.74782944								
14		10	0.35873854	0.10107551	1.12701035	0.74081595								
15		11	0.48104552	0.1817449	1.51124907	0.88016664	Densidad	54.5093222		medianaPer	0.86969379		Área total	29.6436122
16		12	0.41445194	0.13490816	1.30203916	0.80620211				modaPer	0.31209325			
17		13	0.37754188	0.11194898	1.18608278	0.85241597				varianzaPer	0.36123596			
18		14	0.11736428	0.01081837	0.36871075	0.8875007								
19		15	0.36889473	0.10687959	1.15891698	0.85732248								
20		16	0.3152999	0.07807959	0.99054383	0.90814451								
21		17	0.17335239	0.02360204	0.5446026	0.68029639								
22		18	0.36733827	0.10597959	1.15402722	0.79012607								
23		19	0.63405779	0.31575306	1.9919513	0.70434615								
24		20	0.3826486	0.11499796	1.20212602	0.76828766								

Continúan los datos...

272		268	0.27968961	0.06143878	0.87867083	0.79163514								
273		269	0.38484249	0.11632041	1.20901835	0.7770479								
274		270	0.17675899	0.02453878	0.55530473	0.82695578								
275		271	0.11361818	0.01013878	0.35694203	0.82685674								
276		272	0.14873865	0.01737551	0.46727626	0.78724484								
277		273	0.3561214	0.09960612	1.11878838	0.81568553								
278		274	0.19106438	0.02867143	0.60024645	0.86791569								
279		275	0.1589978	0.0198551	0.49950633	0.80161441								
280														
281														

Figura 7. 38. Resultados de las burbujas detectadas para la imagen 1



REPORTE PARA LA TEXTURA DE ESPUMAS

Fecha: 25-Aug-2017

Hora: 18 : 36 : 54

Empresa: Universidad Autónoma Metropolitana

No. Proyecto: UAM.2

Proyecto: Textura de una Espuma

Operador: Isidro Raúl Cano Martínez

Morfología de las Burbujas: Poliédrica

Resultados:

Unidad de Medida: milímetros

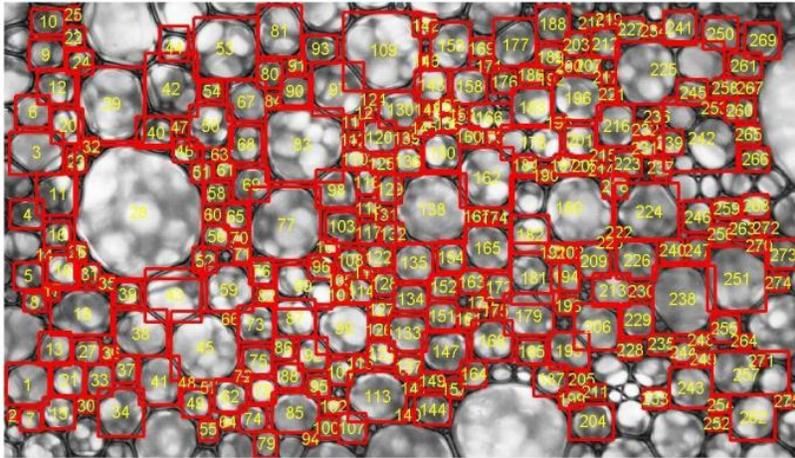
Diam mínimo 0.096718

Diam máximo 1.660845

Muestra	No. Burbujas	Diam medio	D.S.	Area Total de Burbujas	Área Total de Espuma
1	275	0.3172506	0.19166229	29.6436122	54.3826469
2	230	0.35542071	0.22279397	31.7468939	54.3826469
3	229	0.34943087	0.22687838	31.1782408	54.3826469
4	147	0.44716161	0.27306684	31.6356245	54.3826469
5	139	0.44124708	0.27944775	29.719249	54.3826469

Figura 7. 39. Hoja 1 del reporte generado

Referencia:



Histograma:



Figura 7. 40. Hoja 2 del reporte generado

7.3. Cálculo de la Calidad de una Espuma

Esta sección se basa en conocer la calidad, Q , de una espuma (%), respecto a su volumen total, V_t , y al volumen del líquido, V_l , como parámetros de entrada. Se sabe que la ecuación para calcular Q es la siguiente

$$Q = \frac{(V_t - V_l)}{V_t} \times 100$$

Para llevar a cabo este cálculo, bastó con oprimir la etiqueta “Calidad” ubicada en la barra de tareas de la interfaz principal y de donde se desplegó una nueva, en donde se llenaron los

campos necesarios. En seguida se muestran los pasos, reportando este procedimiento, tomando como ejemplo los datos de la Figura 7.41.

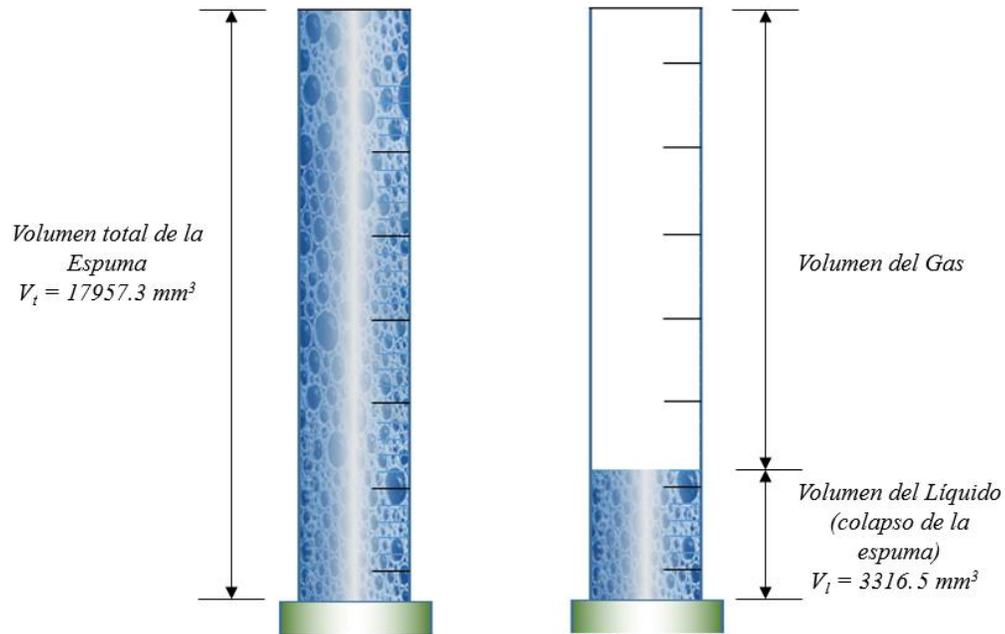


Figura 7. 41. Ejemplo de una espuma contenida en un cilindro, con sus respectivos volúmenes

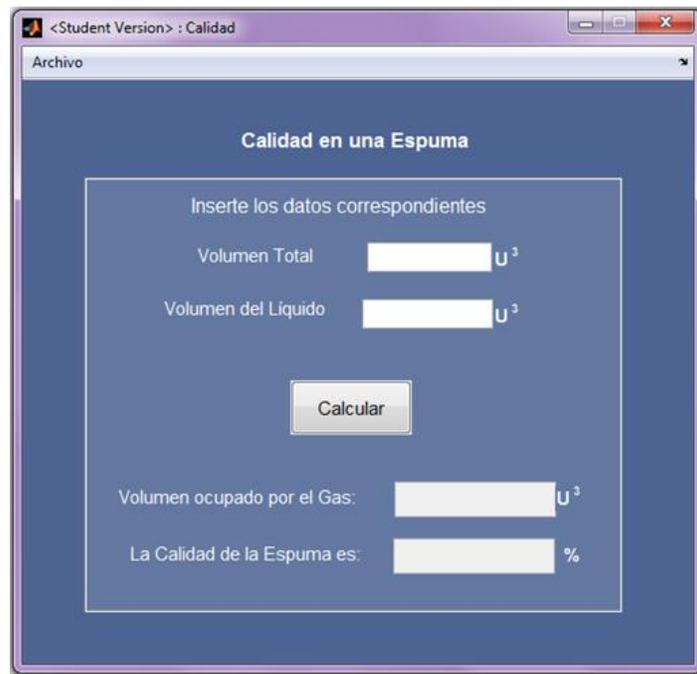


Figura 7. 42. Interfaz para el cálculo de calidad de una espuma

<Student Version> : Calidad
 Archivo

Calidad en una Espuma

Inserte los datos correspondientes

Volumen Total U³

Volumen del Líquido U³

Volumen ocupado por el Gas: U³

La Calidad de la Espuma es: %

Figura 7. 43. Llenado de los campos correspondientes

<Student Version> : Calidad
 Archivo

Calidad en una Espuma

Inserte los datos correspondientes

Volumen Total

Volumen del Líquido

Volumen ocupado por el Gas: U³

La Calidad de la Espuma es: %

Figura 7. 44. Resultado de los datos ingresados

Capítulo 8. Análisis y Discusión de Resultados

8.1. Detección de Burbujas con Morfología Esférica y Poliédrica

En la sección 7.1 y 7.2 del capítulo anterior, se llevó a cabo una corrida de 5 imágenes de espumas en cada una, con estructura esférica y poliédrica, respectivamente, en donde el objetivo fue la detección, cuantificación y caracterización, en términos estadísticos, de las burbujas contenidas en cada una de las imágenes, sin embargo, se puede visualizar que, en las figuras 7.17 a 7.21 y de 7.31 a 7.35, no se detectó la población completa de burbujas, así mismo se encontró que los resultados presentaban un mínimo error del tipo *negativo-positivo* (que sí se detectó un objeto, pero no era la burbuja correcta) y *positivo-negativo* (que a pesar de existir burbujas, el mínimo número de estas no fueron detectadas). En lo que sigue se discuten las fuentes potenciales de estos resultados

- La cámara empleada para este experimento es de muy alta resolución y sus características fueron competentes, sin embargo, debido a la adición de lentes de amplificación se logró el mayor acercamiento posible, esto provocó un efecto de aberración y aunque a simple vista las imágenes parecen tener buena calidad, se optó por recortar un porcentaje de la parte central, mencionado en capítulo 6, ya que la literatura menciona que tales aberraciones se presentan en las orillas de la imagen.
- Respecto a las figuras mencionadas anteriormente, las imágenes presentan el contraste apropiado y parece comprenderse que la detección de todas las burbujas debió ser completa para este procesamiento, sin embargo, a pesar de que se equalizó el brillo en las imágenes, la variación de este en el fondo de la imagen persistía, alterando o modificando la forma de sus objetos. Esto demuestra que no siempre los resultados son totalmente efectivos. El procesamiento de imágenes digitales nos enseña que, no siempre existen resultados totalmente eficientes, ya que un computador está programado para hacer tareas que se le indican, lo cual implica que no tiene la capacidad intelectual para tomar decisiones por sí solo.

Lo mencionado anteriormente muestra que no fue detectada la población completa, pero sí el mayor porcentaje, por ello los resultados estadísticos muestran repetitividad y tendencias consistentes entre los espectros de frecuencia. Aunque los análisis de comprobación de detección con esferas gelificadas fueron exitosos, las espumas por su naturaleza muestran una gran variedad de regiones de brillo, contraste y regiones de frontera, así como fenómenos de difracción y refracción, todo esto cambiando constantemente con el tiempo, lo que hace difícil tener un cien por ciento de detección de burbujas. Considerando lo anterior se puede afirmar que el algoritmo desarrollado produce resultados que satisfacen las necesidades de detección del proyecto.

8.2. Datos Estadísticos de las Burbujas Esféricas y Poliédricas

Parecería que explicar los resultados estadísticos obtenidos constituye una discusión sencilla, pero, tratándose del comportamiento de las espumas no lo es. En seguida se hablará del histograma obtenido y de los datos del reporte, ya que generalizan los resultados del procesamiento.

8.2.1. Histograma y Reporte para Burbujas Esféricas

El histograma obtenido del procesamiento de las 5 imágenes con burbujas esféricas (ver Figura 7.22) representa la repetitividad en la distribución de tamaños de las burbujas en diferentes regiones de una misma muestra de espuma, aunado a una tendencia similar de las curvas, entre los resultados de las imágenes procesadas. Observando la Figura 7.22, el comportamiento de las curvas de las imágenes procesadas (*muestras*) exponen una tendencia casi igual entre ellas, esto implica que existe repetibilidad entre las *muestras* y que las burbujas contenidas en cada una de las imágenes presentan casi el mismo tamaño, definiendo una espuma monodispersa en los tamaños de las burbujas. Entonces, el histograma obtenido permite concluir que la espuma formada aparenta ser uniforme y esto se refuerza con los datos visualizados en el reporte, mostrado en la Figura 7.28, en la sección del diámetro medio (*Diam medio*), ya que se observa que el valor de cada una de las muestras no cambia significativamente, existiendo poca dispersión, como se observa en los valores de la desviación estándar (*DS*).

En términos de los resultados de *FoamTexQu*, puede visualizarse que los errores de detección no fueron de gran relevancia, ya que, si se hubiese presentado un alto porcentaje de error, la tendencia de la curva y el promedio de los diámetros no habría sido similar al de los demás.

8.2.2. Histograma y Reporte para Burbujas Poliédricas

En el histograma mostrado en la Figura 7.36 se observa que la tendencia de las curvas es similar, pero, lo que las hace diferentes es la frecuencia con que se repiten. Esto se debe al número de burbujas detectadas, por ejemplo, la curva más alta representa a la *muestra 1*, y el número de burbujas detectada en esta es 275. La *muestra* con menor número de burbujas es la 5 y contiene 139, como se plasma en el reporte (ver Figura 7.39). Este fenómeno se debe al tamaño de las burbujas en cada imagen, esto es, mientras las burbujas existentes en una imagen tengan mayor tamaño, existirán menos en una imagen y, por lo tanto, la curva expuesta será de menor altura que aquella imagen que contenga más burbujas, y viceversa. El criterio del tamaño de las burbujas se puede contemplar en las imágenes 7.31 y 7.35, respectivamente.

Capítulo 9. Conclusiones

A lo largo del desarrollo del presente estudio se abordó el tema de la caracterización morfométrica y morfológica de espumas húmedas con tamaños de burbuja menores a quinientas micras, desde el punto de vista del Procesamiento de Imágenes Digitales. En el transcurso de este trabajo se demostró que los algoritmos empleados produjeron un alto índice de detección, cuantificación y caracterización de las burbujas contenidas en las imágenes procesadas. Complementario a este análisis, se incluyen los pseudocódigos para análisis estadístico de los resultados obtenidos. Estos cálculos estadísticos complementaron la evaluación morfométrica, que es uno de los tres aspectos que definen a la textura de espumas. Aunque no se detectó el cien por ciento de la población de burbujas en una imagen, como se observa en los resultados, el software se puede clasificar como un sistema confiable en este análisis, puesto que el porcentaje identificado corresponde a más del ochenta por ciento de la población y, además, en términos estadísticos, las imágenes de las muestras capturadas representan un mínimo número de elementos, si se realiza la comparación con el producto real, por lo tanto, los resultados reflejan una detección efectiva y alta confiabilidad. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de los resultados de este trabajo.

Con respecto al mejoramiento del contraste de las imágenes, este se logró utilizando herramientas de ecualización del fondo en una imagen, así como, el uso de filtros que ayudan a la atenuación o eliminación del ruido gráfico, proporcionando imágenes de salida con menor perturbación de los valores en los píxeles, y como resultado imágenes con objetos bien definidos. Esto impacta favorablemente a los análisis haciendo más eficiente la detección de las burbujas.

La identificación de bordes en los objetos de una imagen se consiguió con ayuda de diferentes etapas del procesamiento, la primera de ellas fue el mejoramiento del contraste de una imagen. Otra importante etapa posterior para la detección de bordes, en burbujas esféricas, es el uso de la *Transformada de Hough* orientada a la detección de círculos, esta Transformada proporciona como datos de salida los radios de cada una de las burbujas detectadas, además, lo que hace más eficiente a esta técnica es que las formas geométricas generadas son circulares en su totalidad, realizando una aproximación a los datos reales. La detección de bordes para las burbujas poliédricas se caracterizó por la combinación de diferentes técnicas realizadas sobre imágenes binarias, una de ellas fue la identificación de diferentes regiones, proyectando efectividad en los resultados para la detección de objetos. Las salidas reflejan un cálculo cuasi exacto de los diámetros de cada burbuja identificada, lo que ilustra resultados consistentes con la realidad.

Con relación al desarrollo de un algoritmo capaz de calibrar las unidades de medidas, de píxeles a milímetros (*mm*), este se logró satisfactoriamente con ayuda de métodos que implican proporcionalidad para tres valores conocidos (dos en unidades de píxeles y uno en *mm*) y una incógnita a resolver en *mm*, empleando la regla de tres. Este método ofreció una calibración satisfactoria, proporcionando confiabilidad y efectividad en los valores

obtenidos. De esta forma, la estadística calculada para cada muestra tiene fuerte relación con la calibración de unidades de medida, por lo tanto, esto produce resultados calculados con los valores reales.

Con relación a la generación de un reporte, se logró utilizando métodos con archivos, especialmente en los formatos Excel para su posterior conversión a formato PDF estándar. En este último archivo se integran los resultados estadísticos generales y más representativos para cada imagen procesada, lo que lo hace un archivo completo y enriquecido de información.

Con respecto al software desarrollado, se puede decir que es un sistema nuevo en el ambiente de las espumas, y completo en el área al que ha sido orientado, ya que no sólo consiste en emplear el procesamiento de imágenes, si no también ofrecer un conjunto completo de resultados estadísticos, los cuales facilitan su análisis por parte del investigador. Esto generó éxito en el campo de investigación de las espumas, de tal forma que fue valorado e incluido en un sistema óptico-mecánico, del que se ha realizado la solicitud de una patente.

Como se sabe, el campo de las espumas es un tema extenso, en donde en muchas ocasiones es necesario conocer sus diferentes propiedades y comportamientos. Sin embargo, actualmente se carece de herramientas computacionales que complementen esta necesidad, por lo tanto, la visión del trabajo computacional hacia un futuro se debe orientar a la adaptación del software en un lenguaje de programación estándar, como lo es *java*, *C++*, *C#*, *etc.*, con el fin de independizarlo de las restricciones que proporciona el ambiente de Matlab, por ejemplo, la limitación para crear una aplicación de escritorio sin la instalación de Matlab. También, dirigirlo hacia un algoritmo capaz de minimizar más eficientemente el ruido gráfico, así como desarrollar nuevos métodos específicamente orientados hacia la detección, medición y conteo de burbujas poliédricas, y un mejoramiento sobre las técnicas usadas en este software para enriquecerlo con nuevos métodos que identifiquen el tipo de burbuja y realice la aplicación automática del algoritmo correspondiente; la escalabilidad desde diferentes escalas de referencia como reglas graduadas y otras, así como la flexibilidad para que el usuario pueda definir su propia escala de medida.

Capítulo 10. Referencias Bibliográficas

Referencias del Capítulo 1

- [1.1] L. L. Schramm, “Emulsions, foams and suspensions: Fundamentals and Applications”, pág. 7, editorial Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, 2005.
- [1.2] M. Awang, B. M. Negash, N. A. Md Akhir, L. A. Lubis, A. G. Md. Rafek, “ICIPEG 2016: Proceedings of the International Conference on Integrated Petroleum Engineering and Geosciences”, pág. 209, Editorial Springer, Gateway East, Singapore, 2016.
- [1.3] M. Awang, B. M. Negash, N. A. Md Akhir, L. A. Lubis, A. G. Md. Rafek, “ICIPEG 2016: Proceedings of the International Conference on Integrated Petroleum Engineering and Geosciences”, pág. 208, Editorial Springer, Gateway East, Singapore, 2016.
- [1.4] ZF Zhang, VL Freedman, L Zhong, “Foam Transport in Porus Media – A Review”, United States of America, pág. 2.1, 2009.
- [1.5] L. L. Schramm, “Emulsions, foams and suspensions: Fundamentals and Applications”, pág. 8, editorial Wiley-VCH, Weinheim, Alemania, 2005.

Referencias del Capítulo 2

- [2.1] C. Matías Lorenzo, "Inyección de espumas en proyectos de recuperación mejorada; control de movilidad del gas", Tesis de Licenciatura, División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2011.

Referencias del Capítulo 3

- [3.1] L. L. Schramm, “Foams: Fundamentals and Applications in the Petroleum Industry”, United States of America, pág. 4, 1994.
- [3.2] P. Stevenson, “Foam Engineering: Fundamentals and Applications”, pág. 7, United Kingdom, 2012.
- [3.3] Rehm, B., Haghshenas, A., Paknejad, A., Al-Yami, A., Hughes, J., Schubert, J., “Underbalanced Drilling - Limits and Extremes” Gulf Publishing Company, 2012.
- [3.4] Cuevas, E., Zaldivar, D., Pérez, M. “Procesamiento digital de imágenes con Matlab y Simulink.” Alfaomega Grupo Editorial S.A. de C. V. México, 2010.
- [3.5] M. Awang, B. M. Negash, N. A. Md Akhir, L. A. Lubis, A. G. Md. Rafek, “ICIPEG 2016: Proceedings of the International Conference on Integrated Petroleum Engineering and Geosciences”, pág. 209, Editorial Springer, Gateway East, Singapore, 2016.
- [3.6] Chen, Zhu, “Cuttings Transport with Foam in Horizontal Concentric Annulus Under Elevated Pressure and Temperature Condition.” Ph. D. Thesis. The University of Tulsa, Tulsa, Oklahoma, 2005.
- [3.7] Mitchell, B.J., “Viscosity of Foam”, Ph.D. Dissertation, University of Oklahoma, Norman, 1969.
- [3.8] S. Perkowitz, “Universal Foam_ From capuccino to the cosmos”, United States of America, 2000.

Referencias del Capítulo 5

[5.1] W. Burger, M. Burge, “Digital image processing: An Algorithmic Introduction Using Java”, 2da Ed., London: Springer, 2016.

[5.2] R. R. Morales, J. H. Sossa, “Procesamiento y Análisis Digitales de Imágenes”, 1ra Ed., México, D.F., 2012.

[5.3] <http://www.librovision.eii.uva.es/pdf/cap4.pdf>, consultada el 11 de agosto de 2017.

[5.4] E. L. Fiter, “Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesado digital de imágenes”, Proyecto Fin de Carrera, Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, España, 2012.

Justificación para la no publicación del código

Un sistema óptico-mecánico que incluye el código desarrollado durante el Proyecto Terminal del Alumno Isidro Raúl Cano Martínez está en proceso de patentarse en el Instituto Mexicano del Petróleo, razón por la cual se ha solicitado no publicar dicho código. Cabe aclarar que el Alumno está incluido dentro de los autores de este sistema.