

**IDENTIFICACIÓN AUTOMÁTICA DE FASES DE LA MICROESTRUCTURA DE  
ACEROS DE FASE DUAL A PARTIR DEL PROCESAMIENTO DIGITAL DE  
IMÁGENES**

**JUAN JOSÉ MURILLO BARRAZA**

**Proyecto integral de grado para optar para el título de ingeniero mecánico**

**Orientador**

**Diego Fernando Avendaño Rodríguez**

**Ing. Mecánico, MSc.**

**William Alfonso Suarez Ortiz**

**Ing. Mecánico, MSc.**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA**

**FACULTAD DE INGENIERÍAS**

**PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**BOGOTÁ D.C.**

**2020**

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

---

---

---

---

---

---

---

Diego Fernando Avendaño  
Firma del Director

---

Jair Leopoldo Loaiza  
Firma del Presidente Jurado

---

William Alfonso Suarez  
Firma del Codirector

---

Oscar Chamarravi  
Firma del Presidente Jurado

---

Nombre  
Firma del Jurado

**Bogotá D.C. 8 de octubre de 2020**

## **DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD**

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

(Dr.) Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

(Dr.) Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica y de Investigación

(Dra.) María Claudia Aponte Gonzáles

Vicerrector Administrativo y Financiero

(Dr.) Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretaria General

(Dr.) Alexandra Mejía Guzmán

Decano de la Facultad

(Dr.) Julio Cesar Fuentes Arismendi

Director del Programa

(Dr.) Carlos Mauricio Veloza Villamil

## **DEDICATORIA**

A mis padres por el apoyo brindado en cada momento de mi vida, por su amor incondicional, entrega y formación llena de valores que me han permitido llegar hasta donde estoy actualmente.

A mi hermana por ser mi guía en todos los pasos que he dado, mi consejera y brindarme el apoyo que siempre necesito y esos regaños que me permiten estar donde estoy en este momento.

A mi abuela y tíos por su cariño, apoyo y enseñanza que me motivan a ser mejor día a día.

A mi abuelo, por su cariño, enseñanza y alegría, desde el cielo sé que estás orgulloso de mi formación como profesional.

A Catalina por ser esa persona especial que me impulsa a sacar lo mejor de mí, por su amor y apoyo durante este proceso.

## **AGRADECIMIENTOS**

Presento mis agradecimientos a todas aquellas personas que brindaron su apoyo de forma directa o indirecta para realizar este trabajo de grado.

A mis directores Diego Fernando Avendaño Rodríguez y William Alfonso Suarez Ortiz por brindarme su apoyo, tiempo, conocimiento, confianza y ayuda académica en la orientación hacia la formulación y ejecución de este proyecto de grado.

A los orientadores del comité de proyecto de grado de ingeniería mecánica por la guía durante el desarrollo del proyecto desde sus inicios.

A todos los docentes de la Fundación Universidad de América quienes se encargaron de transmitirme su conocimiento para formarme como Ingeniero Mecánico.

A todos, muchas gracias.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

## TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	20
INTRODUCCIÓN	21
OBJETIVOS	27
1. METALURGIA Y FÍSICA DEL ACERO	28
1.1 Aceros de doble fase	28
1.2 Obtención de un acero de doble fase	33
1.3 Propiedades mecánicas	45
1.4 Aplicaciones industriales	50
1.5 Estereología	52
1.5.1 Fracción de volumen	53
1.5.2 Tamaño de grano	57
1.5.3 Espaciamiento entre fases	59
2. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES	61
2.1 Componentes de una imagen digital	63
2.2 Digitalización de imagen	65
2.3 Procesamiento digital en el dominio espacial	68
2.4 Filtración	71
2.4.1 Manipulación de histogramas	71
2.4.2 Enmascaramiento sin enfoque	74
2.4.3 Ecuilización de histogramas adaptativos por contrastes (CLAHE)	75
2.4.4 Filtros de eliminación de ruido lineales	76
2.4.5 Filtros de eliminación de ruido no lineales	81
2.5 Segmentación	85
2.5.1 Binarización	85

2.5.2 Clustering K-means	90
2.5.3 Segmentación por regiones	93
2.5.4 Filtros y operadores de detección de bordes	95
2.5.5 Operaciones morfológicas	102
2.6 Medición de datos	108
<b>3. DESARROLLO METODOLÓGICO</b>	<b>110</b>
3.1 Selección de la muestra a analizar	110
3.2 Selección del software	111
3.3 Selección de las herramientas del procesamiento digital de imágenes	114
3.3.1 Herramientas de filtración	114
3.3.2 Segmentación	115
3.3.3 Medición	115
3.4 Implementación	116
3.4.1 Lectura de imágenes.	117
3.4.2 Fragmentación de imagen	119
3.4.3 Manipulación de contraste, intensidad y brillo	123
3.4.4 Filtros de eliminación de ruido	126
3.4.5 Segmentación.	139
3.4.6 Mejoramiento de la sensibilidad.	140
3.4.7 Cambios de morfología	144
3.4.8 Extracción de discontinuidades.	145
3.4.9 Identificación y conteo de centroides.	147
3.4.10 Identificación de bordes.	148
3.4.11 Fusión de fragmentos.	152
3.4.12 Medición de propiedades esteológicas.	154

3.5 Interfaz de usuario	168
3.5.1 Bienvenida.	169
3.5.2 Filtración.	170
3.5.3 Segmentación.	171
3.5.4 Herramienta de dibujo (refinamiento).	172
3.5.5 Medición.	173
3.5.6 Fragmentación y fusión.	177
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES	180
4.1 Acero de doble fase (16.9 % MVF)	180
4.2 Acero de doble fase (38.8% MVF)	193
4.3 Acero de doble fase (54.5% MVF)	205
4.4 Acero hipoeutectoide	217
4.5 Acero hipoeutectoide	225
4.6 Acero de doble fase (fragmento de muestra 1)	231
4.7 Fragmento de acero de doble fase (muestra 1)	234
4.8 Acero de doble fase (Imagen completa de muestra 1)	241
4.9 Acero de doble fase (muestra 2)	254
5. CONCLUSIONES	266
6. RECOMENDACIONES	268
BIBLIOGRAFÍA	269
ANEXOS	277

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Diagrama causa efecto del problema	21
Figura 2. Modelamiento por FEM	23
Figura 3. Representación de acero de doble fase (DP) por teselación de Voronoi	25
Figura 4. Metodología desarrollada	26
Figura 5. Clasificación de metalurgia física	28
Figura 6. Clasificación de aceros avanzados de alta resistencia	29
Figura 7. Acero de doble fase visto en un microscopio y representación gráfica	30
Figura 8. Microestructura de un acero de doble fase y representación atómica	31
Figura 9. Estructuras cristalinas de un acero de doble fase	32
Figura 10. Diagrama de fase hierro carbono	33
Figura 11. Diagrama de fase hierro carbono para los aceros	34
Figura 12. Diagrama de fase hierro carbono para los aceros	36
Figura 13. Ductilidad y resistencia a la tracción en función del carbono	37
Figura 14. Etapas de transformación de un acero hipoeutectoide a doble fase	39
Figura 15. Curva TTT para un acero de doble fase	42
Figura 16. Modificación cristalográfica FCC a BCT	44
Figura 17. Distorsión de Bain	45
Figura 18. Dureza y resistencia a la tracción en función del volumen en fracción de martensita	46
Figura 19. Máxima resistencia a la tracción en función del volumen de martensita	47
Figura 20. Deformación unitaria en función del volumen de martensita	48
Figura 21. Gráfica esfuerzo-deformación para aceros de doble fase	49
Figura 22. Amplitud total de la deformación frente al número de ciclos	50
Figura 23. Gráfica esfuerzo-deformación para diferentes partes en la estructura de un vehículo	51
Figura 24. Malla de 315 elementos con 16 formas circulares en su interior	54
Figura 25. 14 líneas de prueba sobre la muestra de 16 elementos	55
Figura 26. Malla de 352 intersecciones con 16 formas circulares en su interior	56
Figura 27. 14 líneas de prueba y conteo de intersecciones sobre la muestra de 16 elementos	60

Figura 28. Representación de píxeles de una imagen	61
Figura 29. Tamaño de imagen NxM (Ancho X Alto) y representación matricial	62
Figura 30. Sistema coordenado matricial de un imagen	62
Figura 31. Magnificación de imagen digital	63
Figura 32. Resolución de imagen	64
Figura 33. Aumento del lente objetivo	65
Figura 34. Aumento del lente ocular	66
Figura 35. Microscopio óptico metalográfico	67
Figura 36. Diagrama de flujo del procesamiento digital de imágenes	68
Figura 37. Diagrama flujo general de proceso para el procesamiento digital de microscopías de aceros de doble fase	69
Figura 38. Representación de píxeles para cada tipo de imagen	70
Figura 39. Histograma de píxeles para una imagen	72
Figura 40. Histograma original y modificado de una microscopía de acero de fase dual	72
Figura 41. Desplazamiento del histograma y modificación de luminosidad	73
Figura 42. Enmascaramiento sin enfoque	75
Figura 43. Ecuilización de histogramas adaptativos por contrastes (CLAHE)	76
Figura 44. Entorno del píxel central	77
Figura 45. Filtro de la media	78
Figura 46. Distribución normal o Campana de Gauss	79
Figura 47. Aplicación del filtro gaussiano y matriz de distribución gaussiana	80
Figura 48. Selección del dato máximo en una matriz 5x5	82
Figura 49. Aplicación del filtro máximo	82
Figura 50. Selección del dato mínimo en una matriz 5x5	83
Figura 51. Aplicación del filtro mínimo	83
Figura 52. Selección del dato mediano en una matriz 5x5	84
Figura 53. Aplicación del filtro mínimo.	84
Figura 54. Binarización de imágenes	86
Figura 55. Tipos de distribución de histogramas	87
Figura 56. Histograma bimodal	89
Figura 57. Aplicación de sensibilidad de la binarización	90

Figura 58. Agrupación K-means para una muestra aleatoria de puntos	91
Figura 59. Agrupación K-means y distancia euclidiana	92
Figura 60. Segmentación por el método clustering K-means	93
Figura 61. Segmentación por filtrado de segmentación por regiones	94
Figura 62. Función y derivada de distribución del histograma	95
Figura 63. Aplicación de la detección de bordes (operador Prewitt)	97
Figura 64. Aplicación de la detección de bordes (operador Sobel)	98
Figura 65. Aplicación de la detección de bordes (operador Roberts)	99
Figura 66. Aplicación de la detección de bordes (algoritmo Canny)	100
Figura 67. Aplicación del filtro laplaciano	101
Figura 68. Operaciones de encogimiento y crecimiento de formas de una imagen	102
Figura 69. Dilatación morfológica dentro de una representación de píxeles	103
Figura 70. Dilatación morfológica	103
Figura 71. Erosión morfológica dentro de una representación de píxeles	104
Figura 72. Erosión morfológica	105
Figura 73. Cuantificación de áreas en una imagen	105
Figura 74. Definición del área de un segmento a partir de su conectividad	106
Figura 75. Eliminación de áreas	107
Figura 76. Transformación de cuenca hidrográfica	107
Figura 77. Acero de doble fase en estado de entrega	110
Figura 78. Acero de doble fase tratado térmicamente	111
Figura 79. Etapas del proceso para la selección de herramientas	114
Figura 80. Etapas de la implementación de las herramientas del procesamiento digital de imágenes	116
Figura 81. Fragmento del acero de doble fase en estado de entrega	117
Figura 82. Diagrama de flujo del proceso de lectura de imagen	119
Figura 83. Fragmentación de imagen	120
Figura 84. Diagrama de flujo del proceso de fragmentación	121
Figura 85. Función drawrectangle e imcrop	122
Figura 86. Diagrama de flujo del proceso de fragmentación de un recorte de sección específica	122

Figura 87. Definición de los límites para la modificación del histograma.	123
Figura 88. Modificación del histograma	124
Figura 89. Aplicación de la manipulación del histograma	124
Figura 90. Segmentación de control de la aplicación de filtros	125
Figura 91. Diagrama de flujo del proceso modificación del histograma	126
Figura 92. Radio del entorno para un píxel central	127
Figura 93. Aplicación del filtro de enmascaramiento sin enfoque	127
Figura 94. Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro de enmascaramiento sin enfoque	128
Figura 95. Aplicación de la ecualización por contrastes adaptativos (CLAHE)	129
Figura 96. Homogeneización del histograma producto del filtro (CLAHE)	129
Figura 97. Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro CLAHE	130
Figura 98. Mejora durante la aplicación de la segmentación después del filtro gaussiano	131
Figura 99. Aplicación del filtro gaussiano	132
Figura 100. Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro gaussiano	133
Figura 101. Matrices de convolución para los filtros mínimo, máximo, mediano y NSEO	134
Figura 102. Aplicación del filtro mediano	135
Figura 103. Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro mínimo, máximo o mediano	136
Figura 104. Aplicación del filtro mediano	137
Figura 105. Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro laplaciano	138
Figura 106. Segmentación de control para la fase principal antes y después del filtrado de imagen	139
Figura 107. Segmentación por el método de binarización	139
Figura 108. Diagrama de flujo del proceso de binarización	140
Figura 109. Aplicación del mejoramiento de la sensibilidad	141
Figura 110. Magnificación del resultado del mejoramiento de la sensibilidad	141
Figura 111. Diagrama de flujo del proceso de sensibilización a la binarización	142
Figura 112. Inversión del procesos de binarización	143
Figura 113. Diagrama de flujo del proceso de sensibilización a la binarización	143

Figura 114. Aplicación de dilatación y erosión morfológica en una imagen matricialmente invertida	144
Figura 115. Diagrama de flujo del proceso de aplicación de dilatación y erosión morfológica	145
Figura 116. Aplicación de eliminación de áreas o extracción de discontinuidades en una imagen binaria	146
Figura 117. Diagrama de flujo de la eliminación de áreas o extracción de discontinuidades.	146
Figura 118. Centroides y sistema coordinado de referencia	147
Figura 119. Diagrama de flujo del proceso de identificación y gráfica de centroides	148
Figura 120. Representación de identificación de bordes en una imagen segmentada	149
Figura 121. Aplicación de la detección de bordes	149
Figura 122. Diagrama de flujo del proceso de identificación y gráfica de bordes	150
Figura 123. Creación de segmentos blancos (definición de grano)	151
Figura 124. Creación de segmentos negros (definición de bordes de grano)	151
Figura 125. Diagrama de flujo del proceso dibujo refinamiento (dibujo de formas poligonales)	152
Figura 126. Unión de imágenes mediante la concatenación matricial	153
Figura 127. Diagrama de flujo de la fusión de fragmentos de imagen (Concatenación matricial)	153
Figura 128. Recorte de la escala mediante la función drawrectangle e imcrop	154
Figura 129. Diagrama de flujo del proceso de medición de la escala	155
Figura 130. Filtración de la imagen original por tamaño de área para 4 etiquetas	157
Figura 131. Asignación del primer valor de etiqueta para los segmentos blancos de la figura 129 (a)	157
Figura 132. Representación del área de grano en $\mu m^2$	158
Figura 133. Histograma de distribución de resultados (áreas)	159
Figura 134. Diagrama de flujo del proceso de medición de áreas	160
Figura 135. Representación del diámetro de grano en $\mu m$	162
Figura 136. Histograma de distribución de resultados (diámetros)	163
Figura 137. Diagrama de flujo del proceso de medición de diámetros	164
Figura 138. Fases presentes un acero de doble fase	165
Figura 139. Diagrama de flujo del proceso de cuantificación del volumen en fracción.	166

Figura 140. Histograma de distribución de resultados (espaciamiento entre fases)	167
Figura 141. Diagrama de flujo del proceso de medición de espaciamiento entre fase	168
Figura 142 Etapas de la implementación usando una interfaz de usuario	169
Figura 143. Ventana de bienvenida (Inicio rápido)	170
Figura 144. Ventana de filtración (ajuste de intensidad y eliminación de ruido)	171
Figura 145. Ventana de segmentación (binarización y operaciones morfológicas)	172
Figura 146. Ventana de refinamiento (herramienta de dibujo)	173
Figura 147. Ventana de medición (propiedades estereológicas – área)	174
Figura 148. Ventana de medición (propiedades estereológicas – diámetro)	175
Figura 149. Nomenclatura de fragmentos para la distribución de fases	176
Figura 150. Ventana de medición (propiedades estereológicas – volumen en fracción y distribución de fase)	176
Figura 151. Ventana de medición (propiedades estereológicas – Espaciamiento entre fase)	177
Figura 152. Ventana de fragmentación y fusión (fragmentación de imagen)	178
Figura 153. Ventana de fragmentación y fusión (fusión de imágenes)	178
Figura 154. Ventana de ayuda	179
Figura 155. Acero de doble fase de 16.9% de martensita	180
Figura 156 Resultado de la filtración de fases	181
Figura 157. Resultado de la segmentación de fases	182
Figura 158. Representación de fases y bordes de grano	184
Figura 159. Histograma de datos de distribución de fases	185
Figura 160. Histograma de espaciamiento entre fase	186
Figura 161. Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)	188
Figura 162. Representación de áreas en $\mu m^2$ de granos de ferrita	189
Figura 163. Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)	190
Figura 164. Representación de diámetros en $\mu m$ de granos de ferrita	191
Figura 165. Acero de doble fase de 16.9% de martensita	193
Figura 166. Resultado de la filtración de fases	194
Figura 167. Resultado de la segmentación de fases	195
Figura 168. Representación de fases y bordes de grano	196
Figura 169. Histograma de datos de distribución de fases	198

Figura 170. Histograma de espaciamento entre fase	199
Figura 171. Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)	200
Figura 172. Representación de áreas en $\mu m^2$ de granos de ferrita	201
Figura 173. Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)	202
Figura 174. Representación de diámetro en $\mu m$ de granos de ferrita	203
Figura 175. Acero de doble fase de 38.8% de martensita.	205
Figura 176. Resultado de la filtración de fases	206
Figura 177. Resultado de la segmentación de fases	207
Figura 178. Representación de fases y bordes de grano	208
Figura 179. Histograma de datos de distribución de fases	210
Figura 180. Histograma de espaciamento entre fase	211
Figura 181. Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)	212
Figura 182. Representación de áreas en $\mu m^2$ de granos de ferrita	213
Figura 183. Histogramas de distribución del tamaño de grano (Diámetro)	214
Figura 184. Representación del diámetro en $\mu m$ de granos de ferrita	215
Figura 185. Acero hipoeutectoide	217
Figura 186. Resultado de la filtración de fases	218
Figura 187. Resultado de la segmentación de fases	219
Figura 188. Representación de fases y bordes de grano	220
Figura 189. Detección de fases de un acero hipoeutectoide usando análisis de imágenes.	221
Figura 190. Histograma de datos de distribución de fases	223
Figura 191. Acero hipoeutectoide	225
Figura 192. Resultado de la filtración de fases	226
Figura 193. Resultado de la segmentación de fases	227
Figura 194. Representación de fases y bordes de grano	228
Figura 195. Detección de fases de un acero hipoeutectoide usando análisis de imágenes.	229
Figura 196. Fragmento de imagen y segmentación de fases	231
Figura 197. Representación de fases	231
Figura 198. malla de medición	232
Figura 199. Conteo de elementos sobre la malla de medición	232
Figura 200. Acero de doble fase en estado de entrega y segmentación.	234

Figura 201. Líneas de prueba usadas para la medición del tamaño de grano	235
Figura 202. Histogramas de distribución del tamaño de grano (Diámetro)	239
Figura 203. Representación del diámetro en $\mu m$ de granos de ferrita	240
Figura 204. Acero de doble fase en estado de entrega	241
Figura 205. Segmentación de la fase ferrita	242
Figura 206. Segmentación de la fase martensita	243
Figura 207. Representación de fases y bordes de grano	244
Figura 208. Histograma de distribución de fases y bordes de grano	246
Figura 209. Histograma de espaciamiento entre fase	247
Figura 210. Histogramas de distribución del tamaño de grano (área) de ferrita	248
Figura 211. Representación de áreas en $\mu m^2$ de granos de ferrita	249
Figura 212. Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)	250
Figura 213. Representación de diámetros en $\mu m$ de granos de ferrita	251
Figura 214. Resultados con diferentes valores de etiquetas.	252
Figura 215. Tiempo de ejecución	253
Figura 216. Acero de doble fase después de la aplicación de tratamientos térmicos.	255
Figura 217. Segmentación de la fases	256
Figura 218. Representación de fases y bordes de grano	257
Figura 219. Histograma de distribución de fases y bordes de grano	259
Figura 220. Histograma de espaciamiento entre fase	260
Figura 221. Histogramas de distribución del tamaño de grano (área) de ferrita	261
Figura 222. Representación de áreas en $\mu m^2$ de granos de ferrita	262
Figura 223. Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)	263
Figura 224. Representación de diámetros en $\mu m$ de granos de ferrita	264

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Relaciones de tamaño de grano ASTM según la norma ASTM E-112	58
Tabla 2. Tipos de imagen	70
Tabla 3. Conectividad por píxel para la detección de bordes por límites de segmentos	94
Tabla 4. Principales propiedades de regiones	108
Tabla 5. Sistema de ponderación para la evaluación de selección de software	112
Tabla 6. Matriz de evaluación para la selección de la alternativa más pertinente a usar en el desarrollo de programa computacional	113
Tabla 7. Datos de aplicación en la etapa de filtración	181
Tabla 8. Datos de aplicación en la etapa de segmentación	183
Tabla 9. Volumen en fracción y comparativa de resultados	184
Tabla 10. Distribución de fase por fragmentos	185
Tabla 11. Espaciamiento entre fases	186
Tabla 12. Tamaño de grano (área)	187
Tabla 13. Tamaño de grano (Diámetro)	189
Tabla 14. Tamaño de grano y comparativa del resultado	191
Tabla 15. Datos de aplicación en la etapa de filtración	194
Tabla 16. Datos de aplicación en la etapa de segmentación	196
Tabla 17. Volumen en fracción y comparativa entre resultados	197
Tabla 18. Distribución de fase por fragmentos	197
Tabla 19. Espaciamiento entre fase.	198
Tabla 20. Tamaño de grano (área)	200
Tabla 21. Tamaño de grano (Diámetro)	202
Tabla 22. Tamaño de grano y comparativa del resultado	203
Tabla 23. Datos de aplicación en la etapa de filtración	206
Tabla 24. Datos de aplicación en la etapa de segmentación	208
Tabla 25. Volumen en fracción y comparativa entre resultados	209
Tabla 26. Distribución de fase por fragmentos	209
Tabla 27. Espaciamiento entre fases	210
Tabla 28. Tamaño de grano (área)	212

Tabla 29. Tamaño de grano (Diámetro)	213
Tabla 30. Tamaño de grano y comparativa del resultado	215
Tabla 31. Datos de aplicación en la etapa de filtración	218
Tabla 32. Datos de aplicación en la etapa de segmentación	220
Tabla 33. Volumen en fracción y comparativa entre resultados	222
Tabla 34. Distribución de fase por fragmentos	223
Tabla 35. Datos de aplicación en la etapa de filtración	226
Tabla 36. Datos de aplicación en la etapa de segmentación	228
Tabla 37. Volumen en fracción y comparativa entre resultados	230
Tabla 38. Datos del volumen en fracción para la fase martensita	233
Tabla 39. Volumen en fracción y comparativa de resultados	233
Tabla 40. Resultados de composición	235
Tabla 41. Medición de granos interceptados en la muestra.	237
Tabla 42. Definición del tamaño de grano según la norma ASTM	238
Tabla 43. Tamaño de grano (Diámetro)	239
Tabla 44. Tamaño de grano y comparativa del resultado	240
Tabla 45. Resultados de composición	245
Tabla 46. Distribución de fase por fragmentos	245
Tabla 47. Espaciamiento entre fases	246
Tabla 48. Tamaño de grano (área) de ferrita	248
Tabla 49. Tamaño de grano (Diámetro) de ferrita	250
Tabla 50. Resultados de composición	258
Tabla 51. Distribución de fase por fragmentos	258
Tabla 52. Espaciamiento entre fases	259
Tabla 53. Tamaño de grano (área) de ferrita	261
Tabla 54. Tamaño de grano (Diámetro) de ferrita	263

## RESUMEN

En el presente proyecto se realizó la creación de un programa computacional mediante el uso del software MATLAB®[1] que permite la identificación automática de fases de la microestructura para microscopías de aceros de fase dual de bajo contenido de carbono, donde se analizaron micrografías para aceros en estados de entrega y después de la aplicación de un tratamiento térmico, este software permitió realizar la identificación adecuada de las fases presentes, su volumen en fracción, tamaño de grano, morfología, distribución, espaciamiento entre fases y límites de grano a partir del procesamiento digital de imágenes.

Para tal fin, se realizó una revisión bibliográfica con el objetivo de identificar las herramientas pertinentes del procesamiento digital de imágenes que permitieron seleccionar el software para desarrollar adecuadamente el programa o aplicativo que dé cumplimiento al objetivo del proyecto; posteriormente se realizó la implementación de las herramientas para filtrar la imagen original, segmentarla con el objetivo de identificar las propiedades de interés, medirlas y validar los resultados obtenidos frente a los datos bibliográficos.

Así mismo, se desarrolló una interfaz de usuario con herramientas de ayuda y guías de manipulación con el objetivo de brindar el soporte requerido para el adecuado uso del programa.

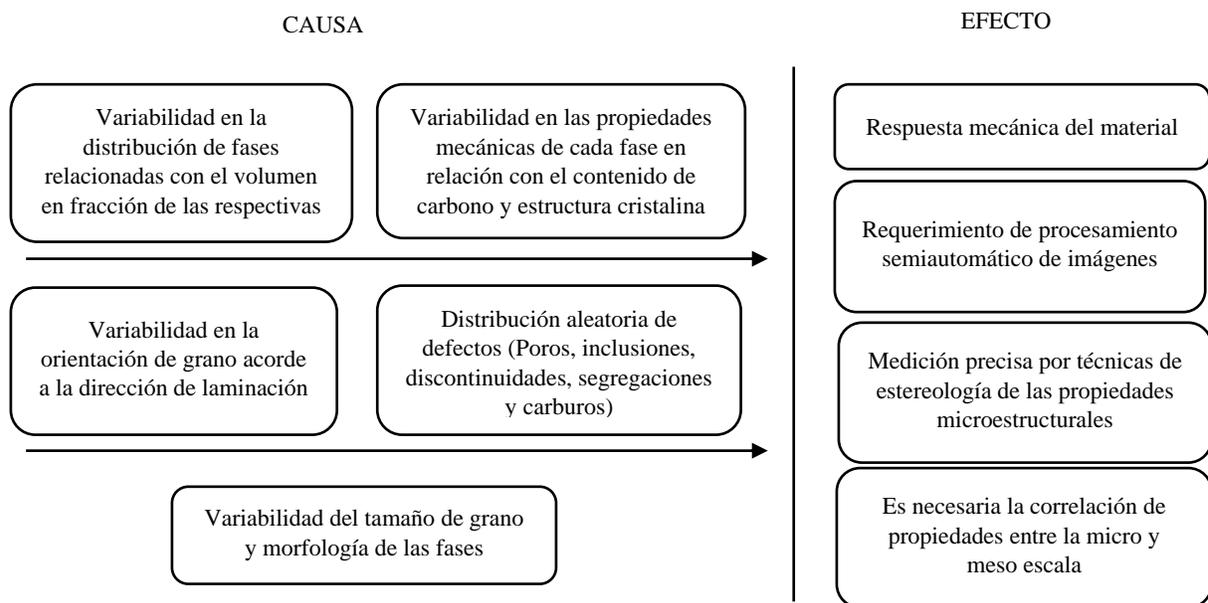
**PALABRAS CLAVE:** Procesamiento digital de imágenes, aceros de fase dual, interfaz de usuario, programa computacional, caracterización microestructural, estereología, filtrado de imágenes, segmentación de imágenes.

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad los análisis microestructurales presentan limitaciones a la hora de realizar la correcta identificación de fases, granos y límites de grano en aceros de fase dual, estas características se relacionan estrechamente con las propiedades mecánicas de estos aceros. Debido a las pocas herramientas que permiten realizar análisis a partir de microscopías ópticas, se presentan dificultades en el análisis de la morfología, la variabilidad en la distribución de fase, el tamaño de grano y las propiedades mecánicas según el volumen en fracción de las fases junto a su distribución que dificultan la caracterización; es así como la correcta identificación de la microestructura es un punto clave para correlacionar las propiedades macro y micromecánicas, se presenta a continuación un diagrama causa efecto para el problema planteado en la figura 1.

**Figura 1.**

*Diagrama causa efecto del problema*



**Nota.** El diagrama causa efecto del problema describe como la variabilidad de las propiedades microestructurales afecta los análisis en esta escala, por lo que se requiere el uso de herramientas computacionales para realizar la correcta identificación de fases y realizar mediciones precisas para correlacionar las propiedades en la micro y mesoescala.

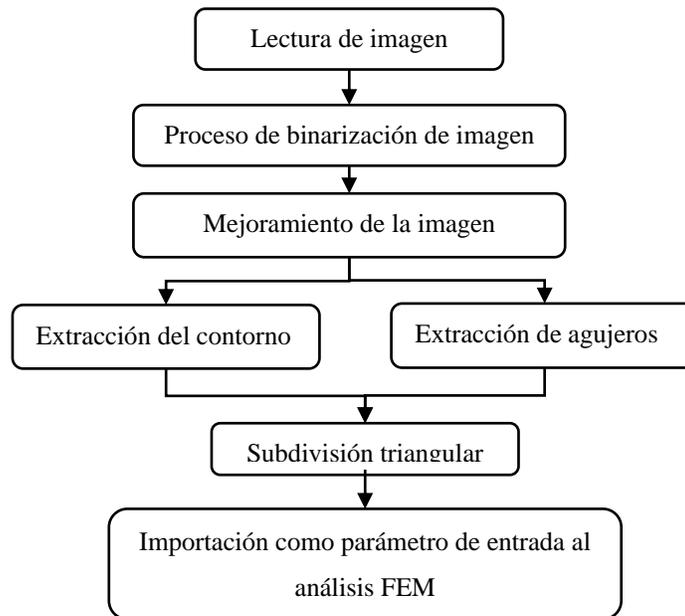
La finalidad de este proyecto es realizar la identificación automática de fases de la microestructura para microscopías de aceros de fase dual de bajo contenido de carbono en estados

de entrega y después de la aplicación de un tratamiento térmico a partir del procesamiento digital de imágenes. Esto permitirá hacer un avance importante en la evaluación de micrografías para caracterizar dichos aceros en la microescala gracias a la identificación de granos, límites de grano, tipos y tamaños de fases presentes en la microestructura de estos aceros; aspecto fundamental ya que gracias a los análisis microestructurales es posible entender el comportamiento mecánico de los materiales por lo tanto, permitirá avanzar en la obtención de la correlación entre la microestructura y las propiedades mecánicas del material. Para desarrollar este proyecto se emplearán las herramientas del procesamiento digital de imágenes mediante el uso del software MATLAB® en su versión de prueba.

El procesamiento digital de imágenes es realizado en las siguientes etapas: lectura de imágenes, proceso de binarización, refinamiento y medición de datos. Este proceso se expone en el esquema o diagrama de flujo a seguir a la hora de procesar imágenes de manera digital con el cual podemos concluir que se debe realizar un correcto refinamiento empleando diferentes herramientas para realizar la adecuada representación de la imagen original; este diagrama de flujo es mostrado en la figura 2.[2]

**Figura 2.**

*Modelamiento por FEM*



*Nota.* Diagrama de flujo del procesamiento digital de imágenes aplicado a espumas de aluminio donde se destaca el proceso de refinamiento o mejoramiento de las imágenes para eliminar discontinuidades. Tomado de: X. Zhu, *et al*, A novel modeling approach of aluminum foam based on MATLAB® image processing, pp 2.

Las herramientas del análisis de imágenes aplicadas a microscopías de diferentes materiales, permiten refinar la imagen original donde se pueden realizar las operaciones de: corrección de iluminación, manipulación de contraste, operaciones realizadas por píxeles, manipulación de intensidad de grises mediante histogramas, eliminación de ruido mediante filtros, binarización, procesos de umbralización, herramientas de selección de bordes, segmentación, erosión y dilatación de imágenes junto con herramientas de medición que permiten obtener datos de interés de las muestras procesadas; Frieid [3] soporta el proceso descrito por Zhu, *et al* donde en la etapa de refinamiento en el proceso digital de imágenes es importante seleccionar adecuadamente las herramientas de refinamiento.[2]

Por otro lado, Brands[4] caracteriza las propiedades mecánicas de los materiales en función del volumen de fracción del constituyente martensita en aceros de doble fase, donde se evidencia cómo la fracción de fase define la respuesta mecánica del material.

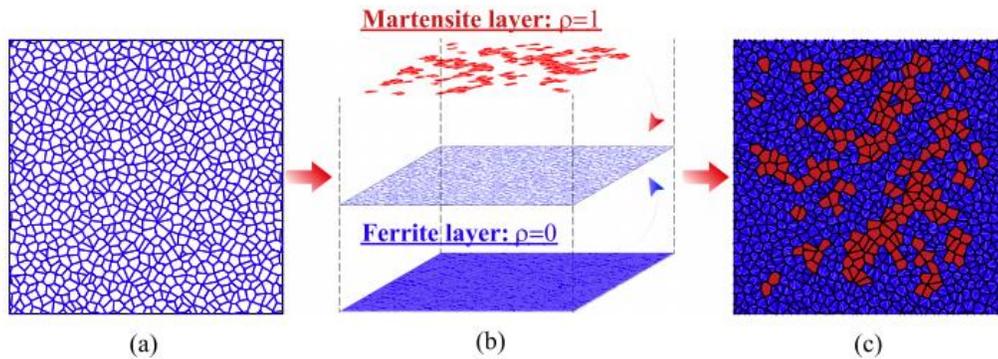
Así mismo, el estándar “ASTM E112-96: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size”[5] expone el procedimiento para realizar las mediciones de tamaño de grano a partir de microscopías digitales, un parámetro importante para cuantificar y caracterizar la tensión de fluencia del material considerando el tamaño de grano siendo importantes sus características como límites de grano y composición realizando una introducción a la estereología.

A su vez, Fonstein define las características de los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS), las características de los aceros de doble fase (DP), los mecanismos de obtención, las generalidades de los procesos de austenización, la transformación martensítica y las propiedades mecánicas del material, donde se identifica la importancia de la presencia de carbono, bajo contenido del mismo en la estructura y los mecanismos de enfriamiento rápido para los procesos de obtención de las características y propiedades mecánicas de estos aceros. [6]

Hou Yuliang, *et al.* [7] Realizan un análisis de aceros de doble fase por el método de los elementos finitos y teselaciones de Voronoi, donde se analiza el comportamiento de diferentes estados de carga y las características de la microestructura en la respuesta microscópica en el comportamiento plástico; en este estudio, se destaca la unión en un polígono de Voronoi a partir de dos capas donde se realiza la asignación de fases, como se evidencia en la figura 3.

### Figura 3.

Representación de acero de doble fase (DP) por teselación de Voronoi



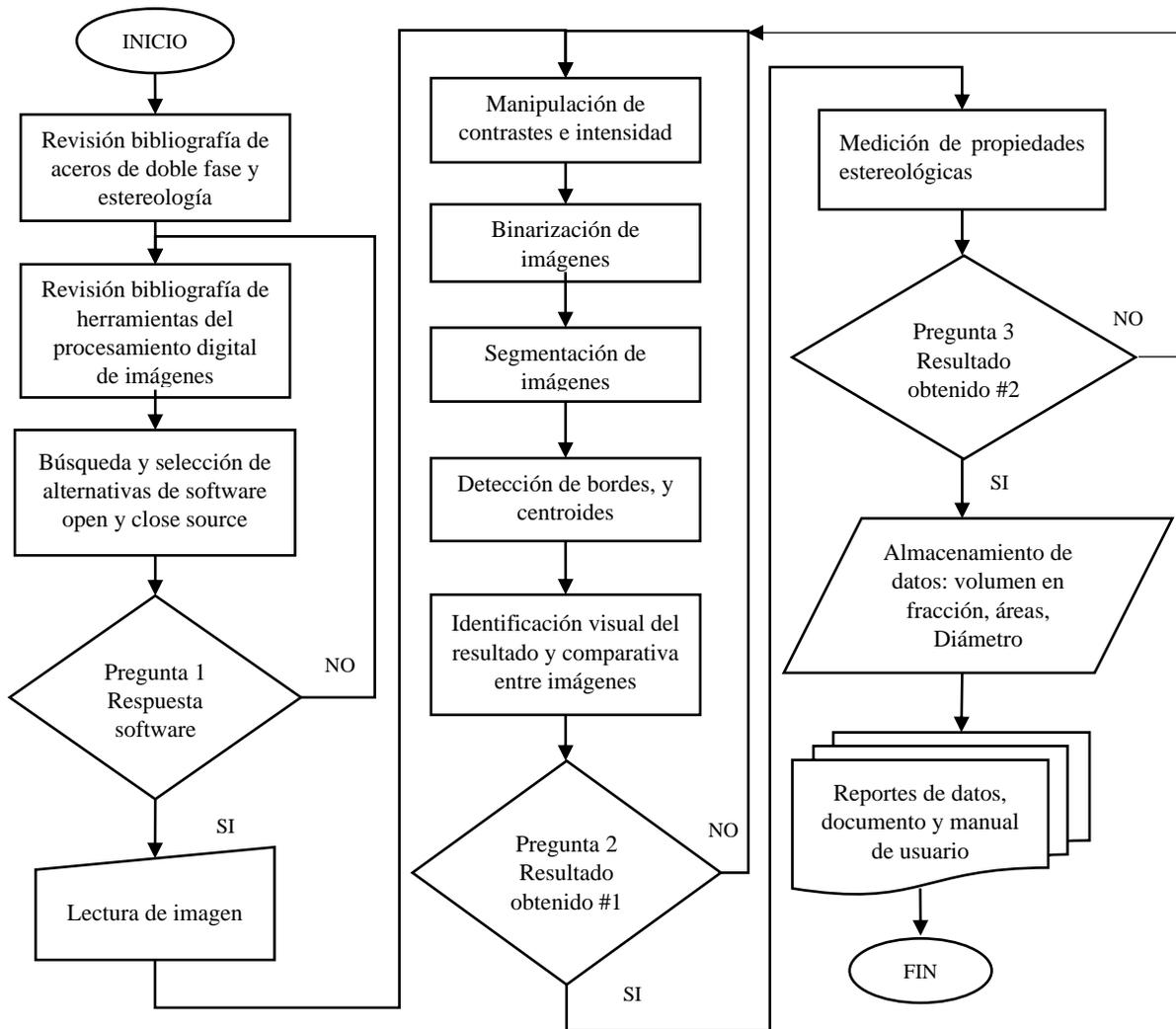
**Nota.** La figura representa: (a) Teselado de Voronoi modificado; (b) asignación de fase; (c) microestructura del acero DP final. Tomado de: Y. Hou, *et al.* Micromechanical modeling of the effect of phase distribution topology on the plastic behavior of dual-phase steels, Comput. pp. 3.

Según la figura anterior, se realiza la representación de los granos mediante un polígono o teselado de Voronoi, basado en la distancia euclidiana o distancia ordinaria entre dos puntos medida a partir de los centroides de cada grano para realizar la separación de fases en polígonos que almacenan la información de las dos fases de forma independiente y así ser ensamblados en una sola representación o imagen; mediante este proceso podemos concluir que usando la teselación de Voronoi es posible efectuar la separación de fases identificando las uniones correspondientes entre dos granos de un mismo constituyente, siendo un posible acercamiento para definir la microestructura de los aceros de doble fase.

La metodología desarrollada en la elaboración del presente proyecto se describe en el siguiente diagrama de flujo de la figura 4:

**Figura 4.**

*Metodología desarrollada*



**Nota.** las preguntas 1, 2 y 3 de los elementos de decisión corresponden a los siguientes interrogantes:  
Pregunta 1: ¿el software escogido posee las herramientas del procesamiento digital seleccionadas?  
Pregunta 2: ¿el resultado obtenido posee un alto grado de similitud frente a la imagen original identificando adecuadamente los bordes y centroides?  
Pregunta 3: ¿se obtiene un dato aproximado del volumen en fracción frente a la bibliografía consultada?

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Realizar la identificación automática de fases de la microestructura de aceros de fase dual a partir del procesamiento digital de imágenes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

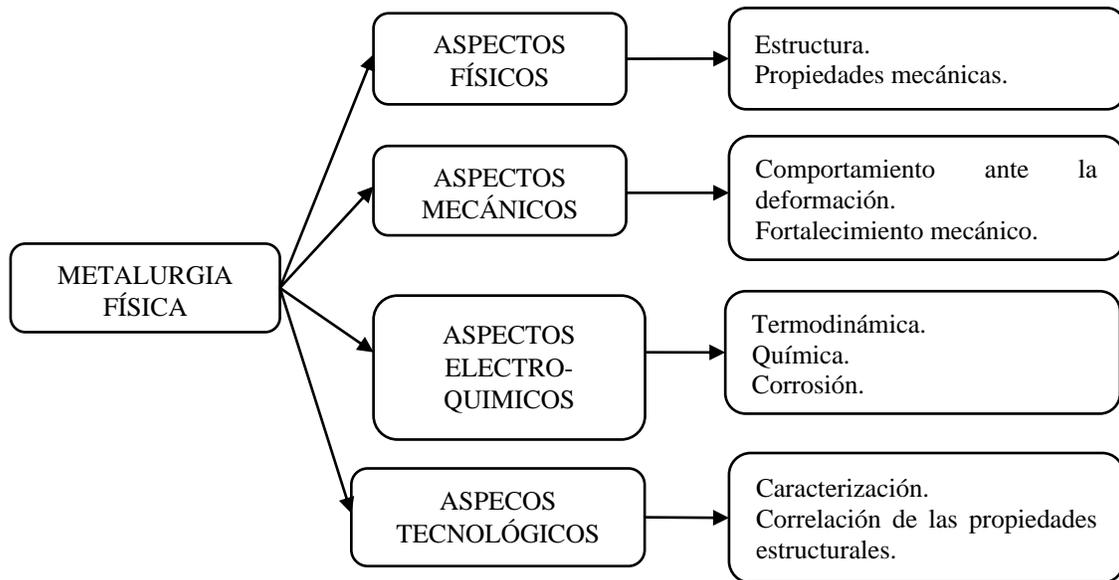
- Determinar las herramientas que se emplean en el procesamiento digital de imágenes.
- Implementar las herramientas definidas del procesamiento digital de imágenes en un software que permita el procesamiento de las microscopías.
- Validar los resultados del programa computacional con los resultados experimentales de la bibliografía consultada.
- Crear un manual de usuario del software, programa computacional y complementos empleados.

## 1. METALURGIA Y FÍSICA DEL ACERO

La metalurgia es considerada una forma antigua de tecnología, que con el avance de la ciencia ha permitido el desarrollo de nuevas y mejores aleaciones que respondan a diversas aplicaciones industriales. La figura 5 muestra una clasificación de la metalurgia física.

**Figura 5.**

*Clasificación de metalurgia física*



**Nota.** Clasificación general de la metalurgia física que abarca los aspectos físicos, mecánicos, electroquímicos y tecnológicos. Tomado de: A. Lavakumar, Concepts in Physical Metallurgy, pp 1.

Los aspectos físicos, mecánicos, electroquímicos y tecnológicos brindan el soporte para entender las características, propiedades fundamentales de los aceros, así como también describen los conceptos de estos y su importancia en la industria.

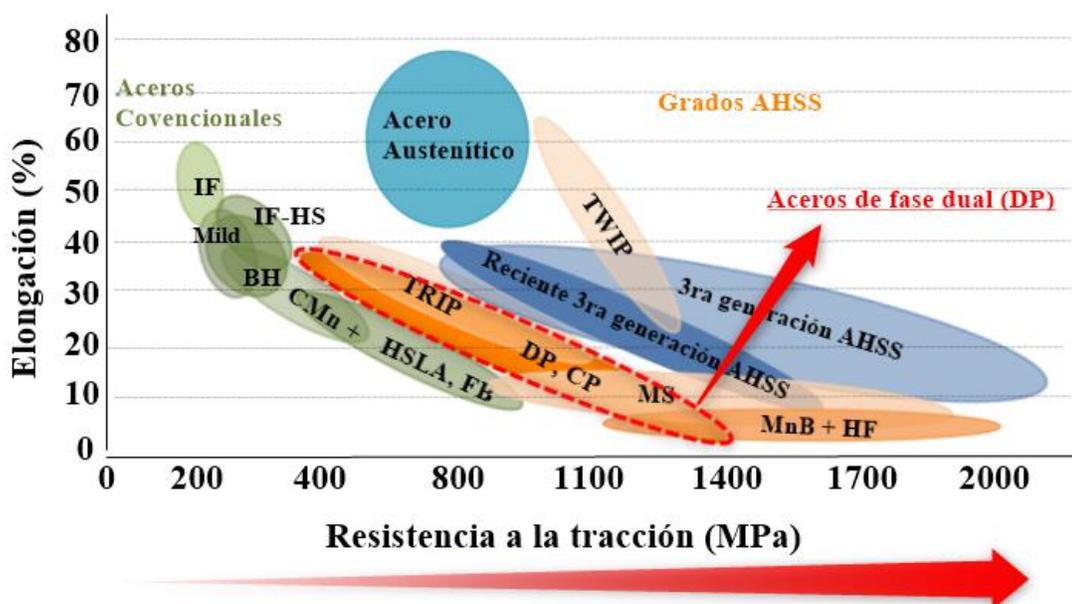
### 1.1 Aceros de doble fase

Dentro la clasificación de los aceros existe los aceros avanzados de alta resistencia (AHSS) los cuales son aceros tratados térmicamente para mejorar sus propiedades mecánicas, permitiéndoles responder ante requerimientos industriales. Por lo general, estos aceros presentan resistencia a la tracción por encima de 590 MPa y un límite elástico superior a 280 MPa. [6]

Como consecuencia del avance tecnológico y para dar respuesta a las necesidades de la industria, surgen los aceros de doble fase (DP) que presentan mejores propiedades mecánicas frente a los aceros convencionales; los aceros TRIP que pueden absorber cantidades extremadamente altas de energía en colisiones o también los llamados aceros de fase compleja (CP) que brindan una excelente respuesta ante la expansión de agujeros. A continuación, la figura 6 describe la relación entre el porcentaje de elongación y la resistencia a la tracción de los principales aceros AHSS. [6]

**Figura 6.**

*Clasificación de aceros avanzados de alta resistencia*



*Nota.* Elongación y resistencia a la tracción para diferentes tipos de aceros AHSS donde se muestra a los aceros de doble fase con porcentajes de elongación entre 10% y 40% y resistencias a la tracción superiores 490 MPa; propiedades superiores respecto a los aceros convencionales los cuales, a pesar de poseer elevados porcentajes de elongación, su resistencia a la tracción no supera los 300 MPa. Tomado de: N. Fonstein, Advanced High Strength Sheet Steels Physical Metallurgy, Design, Processing, and Properties, pp 15.

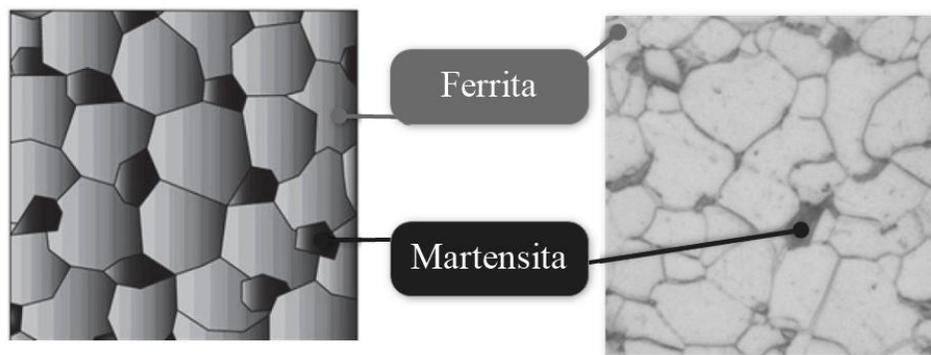
A lo largo de la historia, la demanda de esta reciente clasificación de aceros ha estado en constante crecimiento. Los requerimientos mecánicos son cada vez mayores como en la industria automovilística, donde la seguridad juega un papel de gran importancia.

Además de los constantes cambios que dicta la ley para regular las emisiones de gases y el consumo de combustible; en temas de seguridad los aceros AHSS responden satisfactoriamente en pruebas realizadas de impacto siendo una ventaja para la industria moderna.

Por otra parte, los aceros de doble fase son aceros compuestos por una fase de martensita en una matriz de ferrita dúctil, poseen bajo contenido de carbono y se obtienen a partir de la transformación martensítica, la cual es una transformación de fase que no involucra un cambio de composición química, producida por la deformación homogénea de la red cristalina. Es una transformación no difusiva, lo que permite mantener la composición, el orden atómico y los defectos cristalinos de la fase original. [8], [9]

**Figura 7.**

*Acero de doble fase visto en un microscopio y representación gráfica*

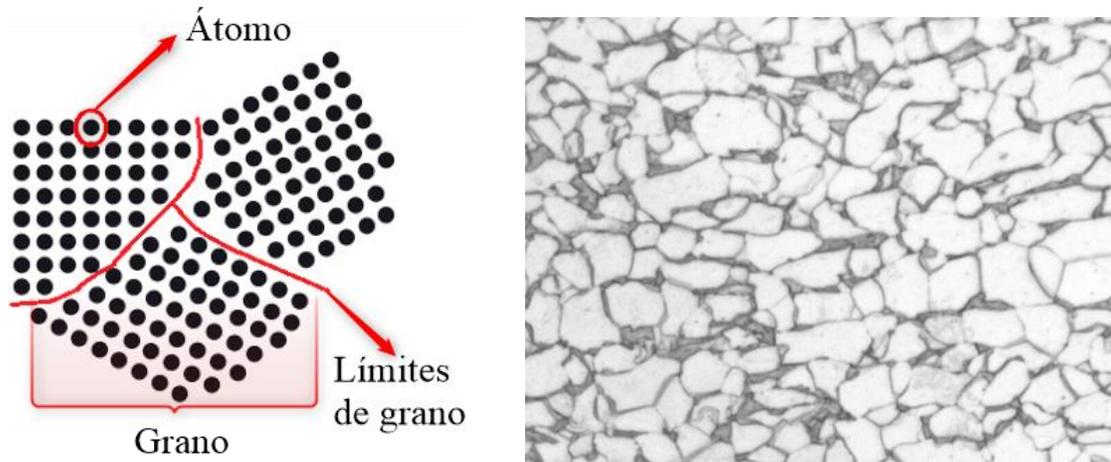


**Nota.** Representación y muestra de un acero de doble fase como una matriz férrea con incrustaciones de martensita. Tomado de: C. Tamarelli, AHSS 101: The Evolving Use of Advanced High-Strength Steels for Automotive Applications, pp. 21.

La microestructura es una escala estructural que se encuentra en órdenes de  $0.1 \mu m$  a  $100 \mu m$  siendo la superficie del material visualizada mediante microscopios ópticos en los cuales es posible distinguir las fases del material, los defectos como los granos y límites o bordes de grano, que se caracterizan por separar en regiones el material. Estos defectos se asocian a variaciones en la orientación y/o en la estructura cristalina que modifican sus propiedades mecánicas. En la figura 8 se muestra una microestructura óptica de un acero de doble fase y la representación de los defectos superficiales.

**Figura 8.**

*Microestructura de un acero de doble fase y representación atómica*

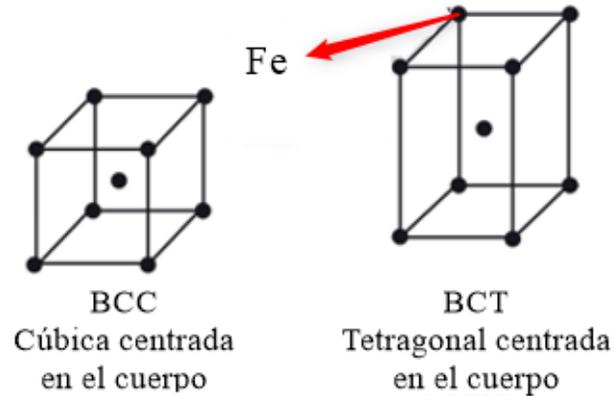


**Nota.** La figura muestra la microestructura de un acero de doble fase y su representación de los granos como arreglos atómicos y los límites o bordes de grano. La distribución de los átomos en los granos está asociada a la estructura cristalina. Tomado de: D. Askeland *et al.* Ciencia e ingeniería de los materiales, pp. 67.

Por otra parte, la estructura cristalina u ordenamiento atómico obedece a los patrones de puntos de red que son posiciones definidas matemáticamente que al ubicarse los átomos en estas posiciones, forman la estructura cristalina o cristales que para un acero de doble fase se presentan en dos configuraciones: cúbica centrada en el cuerpo y tetragonal centrada en el cuerpo, estas configuraciones son mostradas en la figura 9.[10]

**Figura 9.**

*Estructuras cristalinas de un acero de doble fase*



**Nota.** Estructuras cristalinas de un acero de doble fase donde la estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo (BCC) y tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) corresponden a las fases ferrita y martensita respectivamente; además, las esferas representan los átomos de hierro (Fe) que componen la estructura.

Una de las variables dentro de la microestructura que define la respuesta mecánica del material es el tamaño de grano. Mediante la ecuación de Hall-Petch se establece una relación entre el tamaño de grano y la resistencia mecánica del material. A continuación, en la ecuación se evidencia la relación de Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

Donde:

$\sigma_y$ : tensión de fluencia.

$\sigma_0$ : constante del material relacionada con la tensión necesaria para iniciar el movimiento de las dislocaciones.

$k_y$ : coeficiente de endurecimiento (constante para cada material).

$d$ : diámetro promedio de los granos.

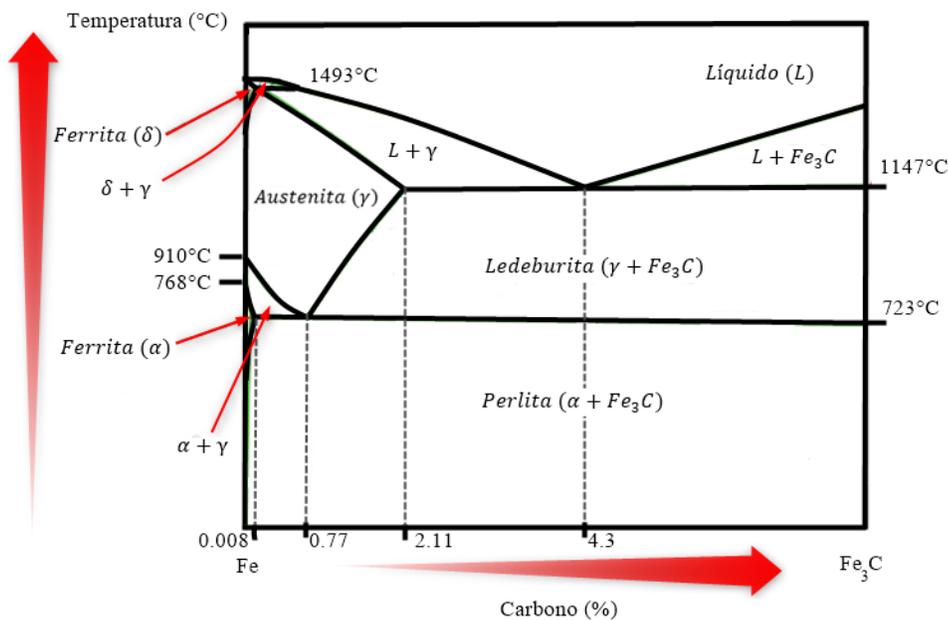
Es así como se define el concepto de endurecimiento por tamaño de grano a partir del cual, a mayor cantidad de bordes de grano, mayor será su resistencia mecánica; es decir, que el tamaño de grano es inversamente proporcional a la resistencia mecánica Busquets [11]

## 1.2 Obtención de un acero de doble fase

La aleación de acero al carbono es un acero compuesto por carbono, hierro y manganeso; constituyen la gran mayoría de aceros fabricados industrialmente. El carbono, es responsable de las propiedades mecánicas del acero, eleva su resistencia a la tracción, incrementa su fragilidad, disminuye su ductilidad y reduce su tenacidad, el diagrama de fases característico de esta aleación se presenta en la figura 10. [12]

**Figura 10.**

*Diagrama de fase hierro carbono*

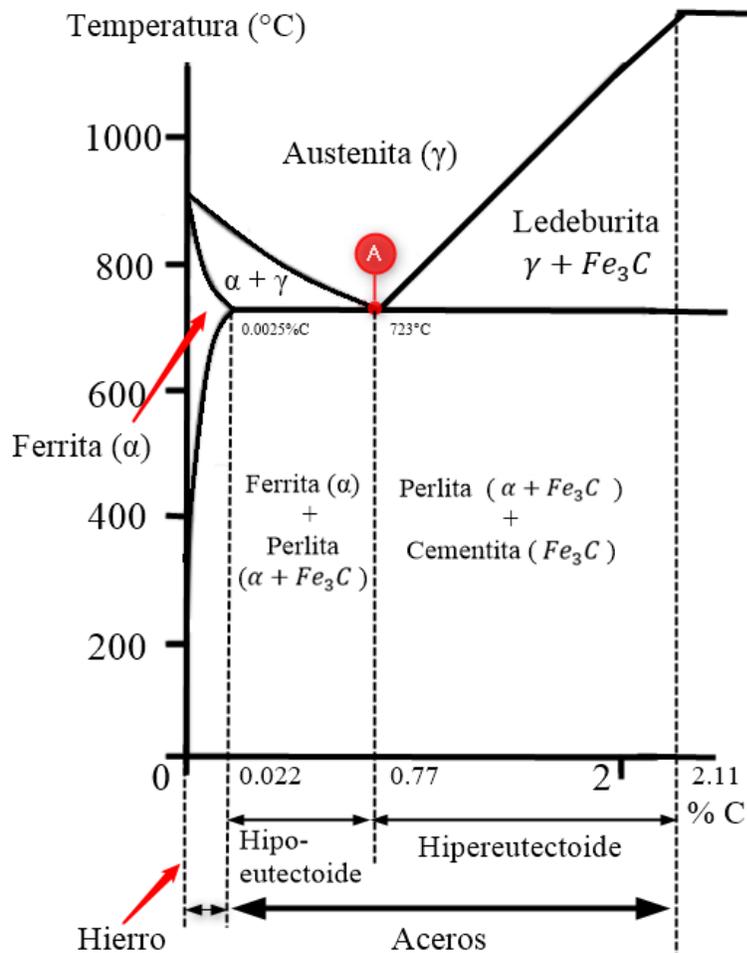


*Nota.* Diagrama de fase hierro carbono donde se identifica la fase ferrita presente en los aceros de doble fase. Tomado de: D. Askeland, P. Fulay, W. Wrigth. Ciencia e ingeniería de los materiales. pp. 466.

Las fases ferrita y martensita propias de los aceros de doble fase, corresponden a segmentos del material donde las propiedades físicas y químicas son uniformes. Los diagramas de fase permiten representar estas secciones homogéneas en donde al manipular la temperatura de un material se producen transformaciones de fase que dictan las propiedades mecánicas de los materiales. El diagrama de fase para los aceros se representa en la figura 11.[13]

**Figura 11.**

*Diagrama de fase hierro carbono para los aceros*



**Nota.** Diagrama de hierro carbono para aceros. El punto (A) representa el punto de reacción eutectoide donde un sólido al enfriarse da lugar a la aparición de dos nuevas fases sólidas. Tomado de: A. Lavakumar. Concepts in Physical Metallurgy. pp. 8-4.

De acuerdo con la figura 11, un acero hipoeutectoide es aquel que su concentración es menor a la reacción eutectoide (0.77% de carbono), compuesto por ferrita y perlita:

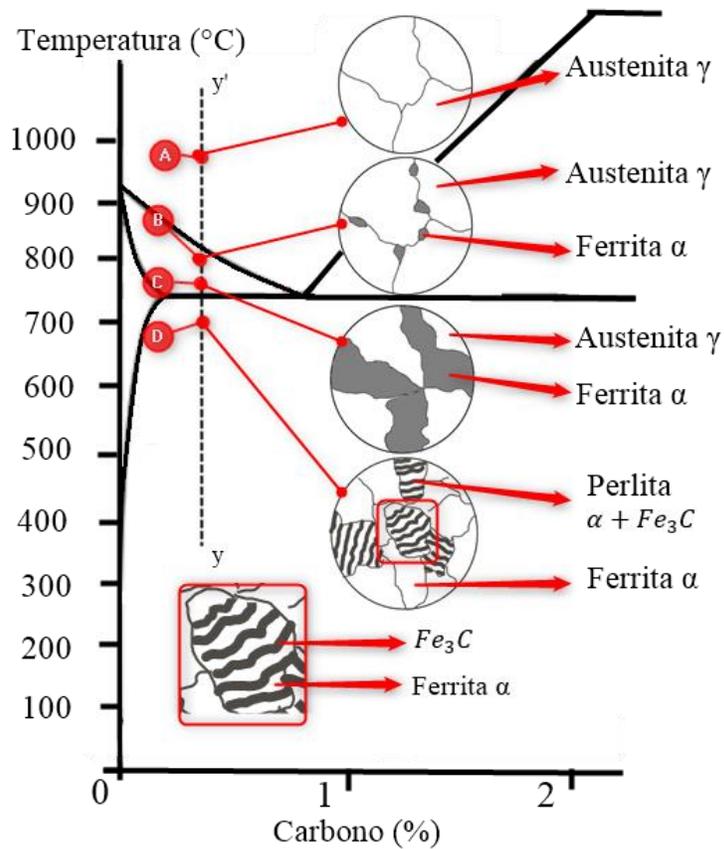
- La ferrita ( $\alpha$ ) es una solución sólida con poca cantidad de carbono disuelta con una solubilidad máxima de 0.025% C, la cual disuelve un 0.008% C a temperatura ambiente; su estructura cristalina corresponde a una configuración cúbica centrada en el cuerpo y posee una resistencia a la tracción de 275 MPa.

- La perlita ( $\alpha + Fe_3C$ ) es una mezcla eutectoide de ferrita y cementita en forma de placa fina formada a  $723^\circ\text{C}$  y un enfriamiento sumamente lento; su resistencia a la tracción es de 825 MPa y posee una elevada tenacidad.
  - Por su parte la cementita ( $Fe_3C$ ) o también conocida como carburo de hierro, contiene 6.67% de carbono en peso; es un compuesto duro y frágil de baja resistencia a la tracción, inferior a 34.5 MPa, pero con una elevada resistencia a la compresión. La cementita es una fase metaestable con estructura ortorrómbica y la más dura del diagrama de fases hierro carbono.
- [13]

En la figura 12 se muestran las transformaciones de fase sobre una línea y-y' desde un régimen austenítico hasta aceros hipoeutectoides de bajo contenido de carbono.

**Figura 12.**

*Diagrama de fase hierro carbono para los aceros*



**Nota.** Diagrama de hierro carbono. Punto A: corresponde a la presencia de la fase policristalina de austenita ( $\gamma$ ) en torno a los  $950^{\circ}\text{C}$ ; punto B: aproximadamente sobre los  $770^{\circ}\text{C}$  coexisten las fases austenita ( $\gamma$ ) y ferrita ( $\alpha$ ) donde la segunda fase crece a lo largo de los bordes de grano de la primera fase, producto de un cambio alotrópico en la austenita ( $\gamma$ ); punto C: se encuentra justo por encima de la línea de transformación eutectoide, en la región donde coexisten las fases austenita ( $\gamma$ ) y perlita ( $\alpha$ ), en este punto los granos de la fase Ferrita ( $\alpha$ ), son más grandes incrementando su fracción; Punto D: al disminuir la temperatura por debajo de la línea eutectoide el microconstituyente austenita ( $\gamma$ ) se transforma en perlita ( $\alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ) a modo de láminas alternadas de ferrita ( $\alpha$ ) y cementita ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ) donde según Maldonado “La ferrita libre es ferrita que no es parte de la perlita. En aceros al carbón, esto puede existir solamente en aceros hipoeutectoides” [14] Tomado de: A. Lavakumar. Concepts in Physical Metallurgy. pp. 8-10.

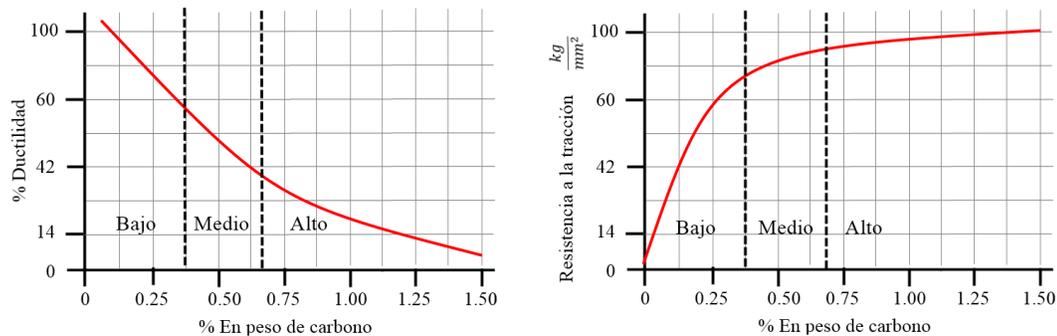
Por otra parte, una clasificación de los aceros se basa en su contenido de carbono, siendo [15]:

- Bajo contenido de carbono: cuando poseen menos de 0.3% en peso de carbono en su composición.
- Medio contenido de carbono: cuando poseen entre de 0.3% y 0.6% en peso de carbono en su composición.
- Alto contenido de carbono: cuando poseen entre de 0.6% y 1.5% en peso de carbono en su composición.

Como se evidencia en la figura 13. a medida que se incrementa el porcentaje de carbono entre 0.3% y 1.5% en peso de carbono la resistencia a la tracción se incrementa; sin embargo, la ductilidad se reduce.

**Figura 13.**

*Ductilidad y resistencia a la tracción en función del carbono*



**Nota.** Gráficas de ductilidad y resistencia a la tracción respecto al porcentaje en peso de carbono. Se evidencia que los aceros de bajo contenido de carbono presentan elevados niveles de ductilidad y baja resistencia a la tracción. Tomado de: <https://www.mipsa.com.mx/sabias-que/clasificacion-del-acero/>

Por otra parte las propiedades mecánicas dictan el comportamiento de los materiales, podemos distinguir las siguientes propiedades mecánicas [16], [17]:

- Elasticidad: propiedad de los materiales para retener la forma y tamaño original después de eliminar la aplicación de una carga.
- Plasticidad: propiedad de los materiales para producir una deformación permanente sin fractura al ser sometido a cargas externas.

- Ductilidad: propiedad de los materiales para elongarse al ser sometido a una carga externa sin producir una fractura.
- Fragilidad: propiedad de los materiales en los cuales se produce una fractura sin una deformación notable.
- Dureza: propiedad de los materiales para resistir la abrasión de cuerpos más duros.
- Tenacidad: propiedad de los materiales para absorber la máxima energía antes de fracturarse.
- Termofluencia: propiedad de los materiales para deformarse plásticamente a temperaturas elevadas bajo esfuerzos menores a los esfuerzos de fluencia
- Fatiga: propiedad de los materiales para producir falla ante cargas variables a lo largo del tiempo.
- Rigidez: propiedad de los materiales para resistir la deformación elástica.
- Resiliencia: propiedad de los materiales para absorber energía elástica antes de entrar en fluencia.
- Tenacidad a la fractura: propiedad de los materiales para resistir el crecimiento de una grieta.

Las propiedades mecánicas de los materiales pueden ser modificadas mediante la aplicación de tratamientos térmicos [18]; según la definición de la física metalúrgica Lavakumar: “El tratamiento térmico es una operación o combinación de operaciones que implican el calentamiento a una velocidad específica, sostenimiento a una temperatura durante un período y enfriamiento a una velocidad específica. El objetivo es obtener una microestructura deseada para lograr ciertas propiedades predeterminadas” [19].

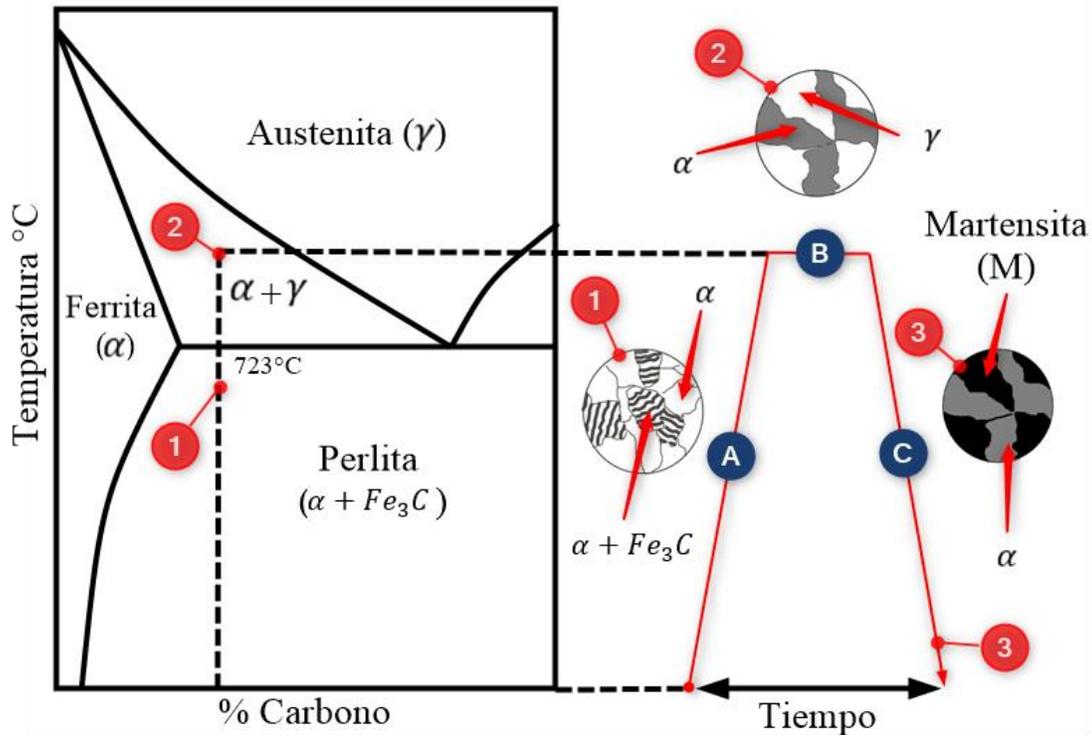
Dentro de los diferentes tratamientos térmicos podemos distinguir tres etapas en la aplicación para un acero de doble fase la primera etapa corresponde al calentamiento que consiste en elevar la temperatura hasta las zonas intercríticas entre 717 y 912°C para austenizar la perlita donde la austenita ( $\gamma$ ) es una solución sólida con poca cantidad de carbono disuelta, con una solubilidad máxima de 2.1% C a 1147°C y que posee una estructura cristalográfica de configuración cúbica centrada en las caras y una resistencia a la tracción de 1035 MPa. [13]

Después de la etapa de calentamiento, se realiza una etapa de un sostenimiento de la temperatura y finalmente una etapa de enfriamiento rápido para realizar la transformación a martensita mediante

un proceso denominado temple; en la figura 14 se muestran las etapas para la obtención de un acero de doble fase.[20]

**Figura 14.**

*Etapas de transformación de un acero hipoeutectoide a doble fase*



**Nota.** La etapa A representa el calentamiento de un acero hipoeutectoide hasta una temperatura superior a la línea eutéctica, la etapa B representa el sostenimiento de la temperatura bajo las condiciones finales del calentamiento; y la etapa C que representa la transformación de fase ferrita-austenita a ferrita-martensita mediante el temple que es un tratamiento térmico que tiene como objetivo incrementar la dureza de un material y la resistencia mecánica. Tomado de: G. Pérez. Estudio de la soldabilidad de aceros avanzados de alta resistencia (ahss): doble fase (dp) y de plasticidad inducida por transformación (trip). pp. 15

La etapa A y B involucran una austenización de la perlita que es un proceso que depende de la concentración de carbono para obtener grandes cantidades de austenita, el calentamiento debe estar bajo condiciones extremadamente rápidas para redistribuir el carbono mediante difusión; siendo este calentamiento el factor clave para controlar la fracción de volumen de austenita y su contenido medio de carbono; este crecimiento de la fase austenita se expresa en la siguiente ecuación: [21]

$$v = D \frac{dC}{dx} \left( \frac{1}{\Delta C^{\gamma \leftrightarrow \alpha}} + \frac{1}{\Delta C^{c \leftrightarrow \alpha}} \right)$$

Donde:

$v$ : tasa de crecimiento de fase o velocidad límite de la austenita

$D$ : difusividad del carbono en la austenita

$\frac{dC}{dx}$ : gradiente de concentración dentro del grano de austenita

$\Delta C^{\gamma \leftrightarrow \alpha}$ : concentración de carbono en la fase austenita - ferrita

$\Delta C^{c \leftrightarrow \alpha}$ : concentración de carbono en las fases cementita - austenita

Al realizar un calentamiento a velocidades altas, la tasa de difusión del carbono aumenta y el gradiente de concentraciones disminuye, siendo la tasa de crecimiento de la austenita hacia la ferrita más alta que la presentada en la austenita hacia la cementita.

El crecimiento del volumen de fracción de austenita con respecto al tiempo se expresa mediante la ecuación de Avrami:

$$V = 1 - \text{Exp}(-Kt^n)$$

Donde:

$V$ : crecimiento de fracción de la austenita

$K$ : tasa de formación austenita

$t$ : tiempo

$n$ : exponente de Avrami

Mediante esta ecuación se define que la tasa de crecimiento de la austenita es proporcional al aumento de la temperatura. [22]

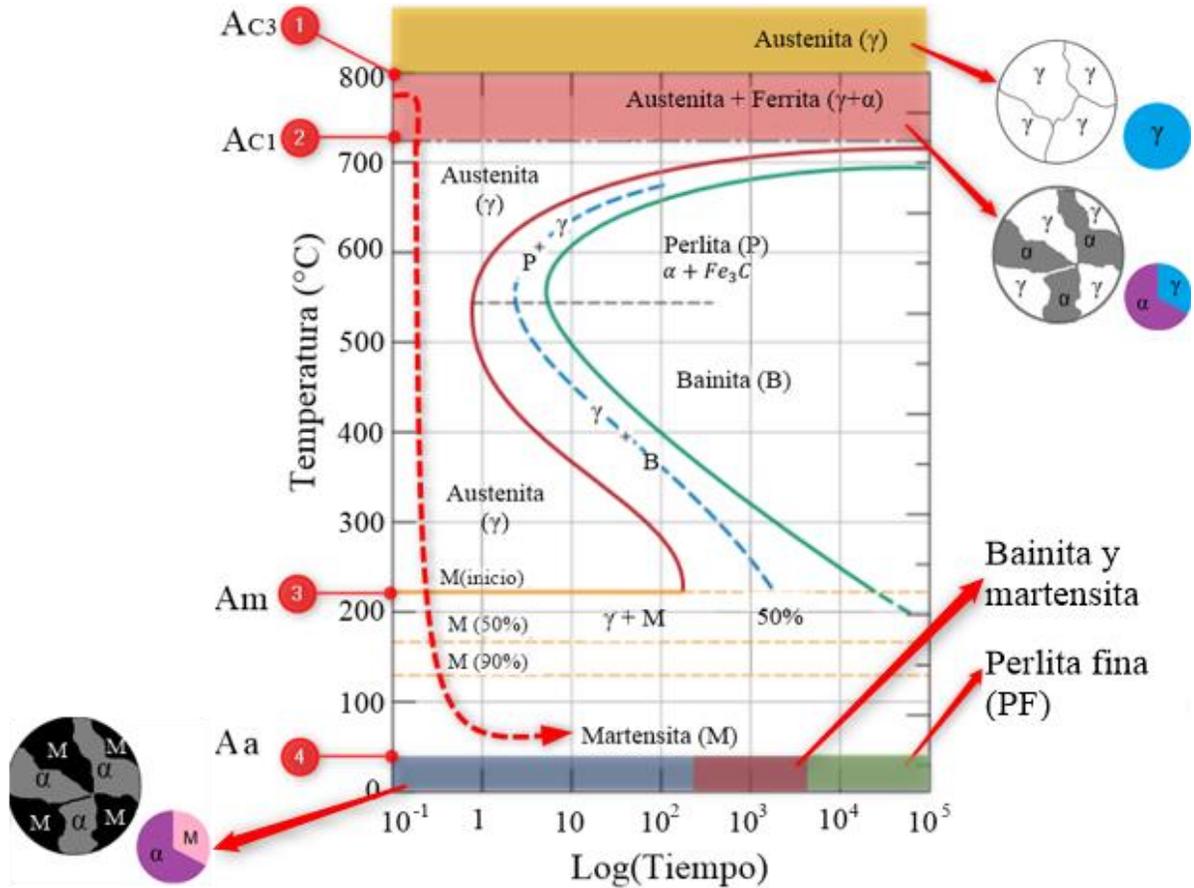
Posteriormente en la etapa C (ver figura 14), durante el enfriamiento rápido se produce la transformación martensítica debido a la inserción de átomos de carbono en la estructura [23] donde la transformación cristalográfica de austenita en martensita obedece a una transformación de una estructura cristalográfica austenítica con estructura cúbica centrada en las caras (FCC) a martensítica que posee una estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). [24] Este cambio en

la estructura cristalina genera un incremento del cristalito, lo que permite albergar más átomos de carbono mediante un proceso de temple.

Para este proceso de transformación se emplea la curva TTT que representan el porcentaje de transformación en función de la temperatura vs el tiempo requerido, se realiza en aceros eutectoides y permite determinar el tiempo bajo una tasa de enfriamiento para obtener una fase específica. La figura 15 representa la transformación de un acero de doble fase en la gráfica TTT.

**Figura 15.**

Curva TTT para un acero de doble fase



**Nota.** Gráfica TTT y transformación para un acero de doble fase, donde  $A_{C3}$  es la temperatura donde termina la transformación de ferrita a austenita (800°C).  $A_{C1}$  es la temperatura de la reacción eutectoide; la temperatura mínima donde coexisten las fases Ferrita-Austenita (723°C).  $A_m$  es la temperatura donde inicia la transformación de austenita en martensita (215°C).  $A_a$  es la temperatura ambiente donde se presenta las fases ferrita y martensita del acero de doble fase (25°C). Tomado de: <http://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/>

En la figura 15 se muestra la transformación de un acero eutectoide (flecha roja punteada) con una temperatura de partida entre 800 °C y 723°C ( $A_{C3}$  y  $A_{C1}$  respectivamente) donde se realiza un enfriamiento rápido con el objetivo de obtener una transformación directa de la fase austenita en martensita que inicia su transformación sobre los 215°C ( $A_m$ ); se debe realizar esta transformación con velocidades de enfriamiento extremadamente rápidas para evitar el inicio de la transformación de austenita en bainita o perlita que se obtiene realizando un enfriamiento lento o

mediante el sostenimiento de la temperatura sobre los 600°C y 500°C respectivamente y evitar la formación de otros constituyentes a temperatura ambiente como la perlita fina o la presencia de bainita dentro de la martensita. [8]

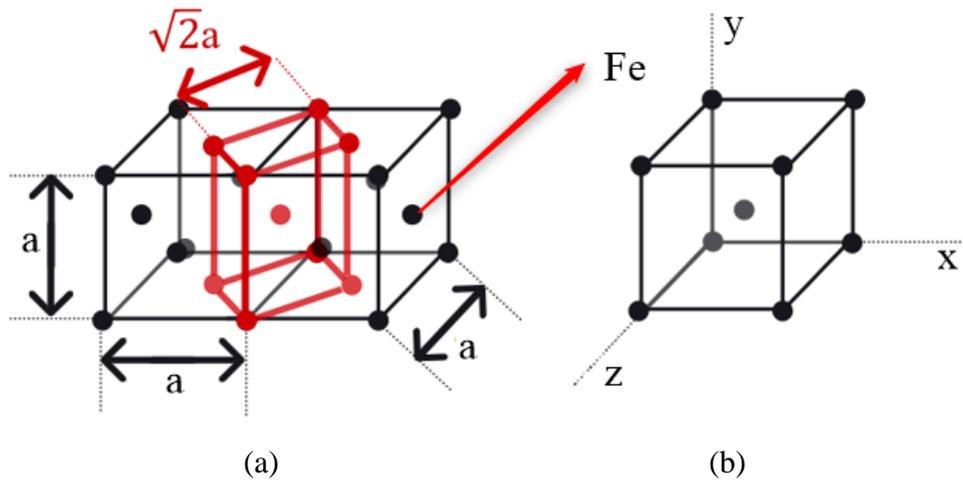
El cristal cúbico centrado en las caras (FCC) de la austenita se modifica como consecuencia del proceso de enfriamiento rápido a partir de las temperaturas de las zonas intercríticas por lo cual, la estructura se deforma en una configuración tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) con niveles de tetragonalidad pequeño. [25], [26]. Estos niveles se relacionan con el mecanismo de enfriamiento y con el porcentaje de carbono produciendo cambios a nivel microestructural. [27]

El carbono a bajas concentraciones entre 0.06% y 0.15% en peso actúa como estabilizador de la austenita evitando la transformación en ferrita debido a que se requieren porcentajes pequeños de carbono para mantener la estructura metaestable; definiendo también la distribución de fases del material.

Cuando no existe carbono en la estructura, el cristal cúbico centrado en las caras (FCC), se deforma en una configuración cúbica centrada en el cuerpo (BCC), este cambio en la estructura viene acompañado de modificaciones o contracciones en los ejes de referencia (~20% eje “y” y ~12% ejes “x” y “z”) para mantener un estado isocórico de la celda unitaria y de esta manera realizar la transformación en ferrita, representada en la figura 16.[13]

**Figura 16.**

*Modificación cristalográfica FCC a BCT*

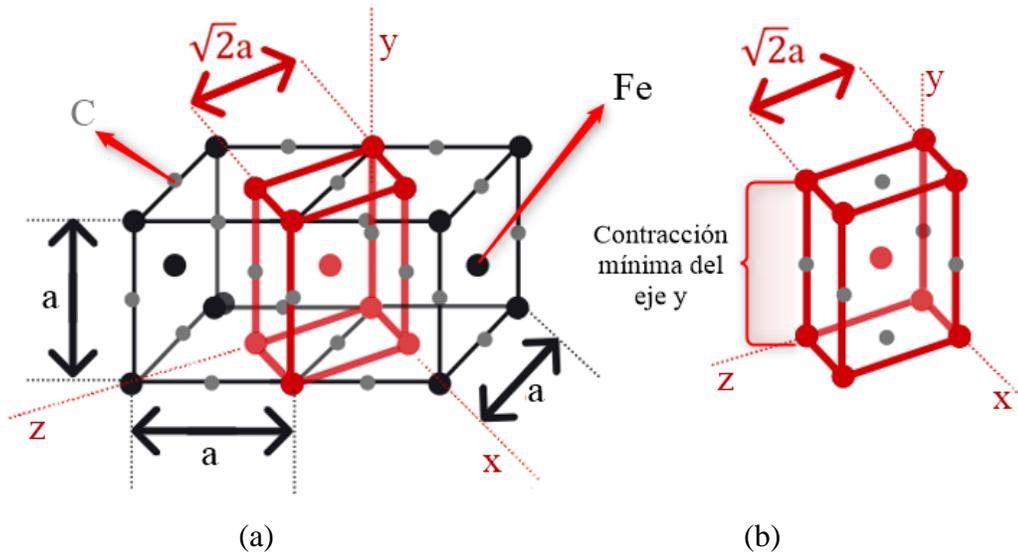


**Nota.** Transformación cristalográfica de FCC a BCC en ausencia de carbono; (a) Representación de la celda unitaria tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) dentro de la celda cúbica centrada en las caras (FCC); (b) representación de la transformación cristalográfica de la celda cúbica centrada en las caras (FCC) a estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC) por la ausencia de carbono en la estructura. Tomado de: A. Lavakumar. Concepts in Physical Metallurgy. pp. 8-15.

Al incluir los átomos de carbono en la estructura se impide la contracción a lo largo del eje “y” y los ejes “x” y “z” pueden expandirse libremente aumentando el volumen de  $\sim 4.3\%$ , lo cual depende del porcentaje de carbono. Esto se conoce como la distorsión de Bain ilustrado en la figura 17.

**Figura 17.**

*Distorsión de Bain*



**Nota.** Distorsión de Bain y transformación cristalográfica de la celda cúbica centrada en las caras (FCC) a tetragonal centrada en el cuerpo BCT en presencia de carbono donde (a) Representación de la celda unitaria tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) dentro de la celda cúbica centrada en las caras (FCC) con presencia de carbono (Distorsión de Bain); (b) representa la retención del carbono en la estructura en eje “y” y formación de la celda unitaria tetragonal centrada en el cuerpo (BCT) por libertad de contracción en los ejes “z” y “x”. Tomado de: A. Lavakumar. Concepts in Physical Metallurgy. pp. 8-15.

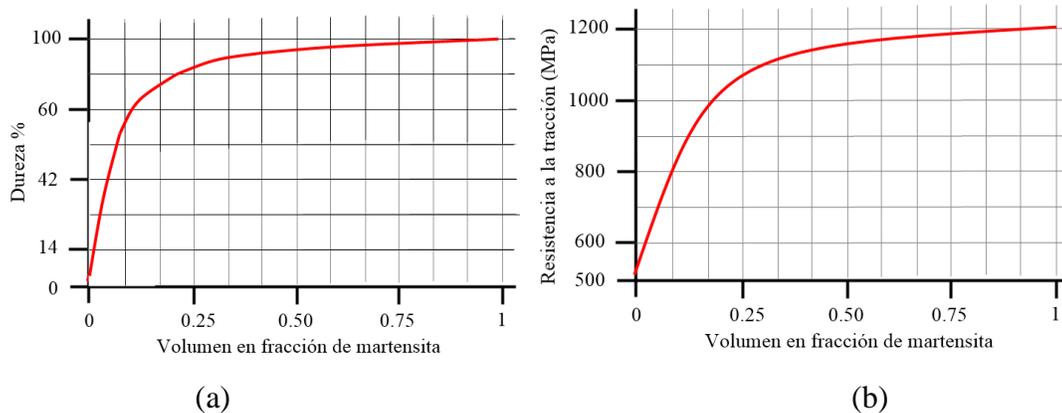
### 1.3 Propiedades mecánicas

La dureza de la martensita y la tetragonalidad depende del porcentaje de carbono, los procesos de transformación y la velocidad de enfriamiento, permiten obtener martensita a partir de bajos porcentajes de carbono[17], [20]. Sin embargo, esta martensita no enriquecida producto de los bajos contenidos de carbono y que al no poder moverse por mecanismos de difusión impiden la transformación a una estructura cúbica centrada en el cuerpo (BCC), produciendo una martensita revenida la cual es blanda en comparación con una martensita enriquecida que posee menor nivel de endurecimiento. [24]

La dureza de la martensita es directamente proporcional al contenido de carbono donde para aceros de doble fase, el volumen en fracción de la martensita define su resistencia a la tracción y dureza como se ilustra en la figura 18.[20]

**Figura 18.**

*Dureza y resistencia a la tracción en función del volumen en fracción de martensita*

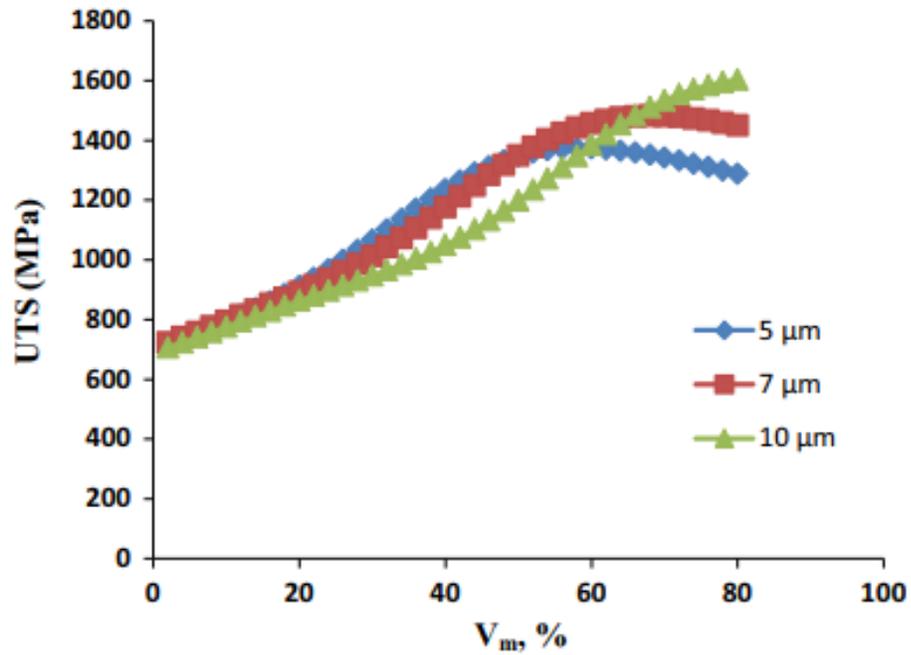


**Nota.** (a) Gráfica de dureza en función del volumen en fracción de martensita; (b) Gráfica de resistencia a la tracción en función del volumen en fracción de martensita. En estas graficas se evidencia que al incrementar el volumen en fracción de la martensita tanto la dureza como la resistencia a la tracción incrementa describiendo un crecimiento logístico. Tomado de: A. Lavakumar. Concepts in Physical Metallurgy. pp. 8-16.

De acuerdo con lo anterior se relaciona la resistencia a la tracción y la deformación en función del volumen de martensita para tres tamaños de grano de la matriz de ferrita mostrados en las figuras 19 y 20 donde adicionalmente se observa el aumento de la resistencia a la tracción y la disminución de la deformación unitaria última al incrementar el volumen de martensita [28]

**Figura 19.**

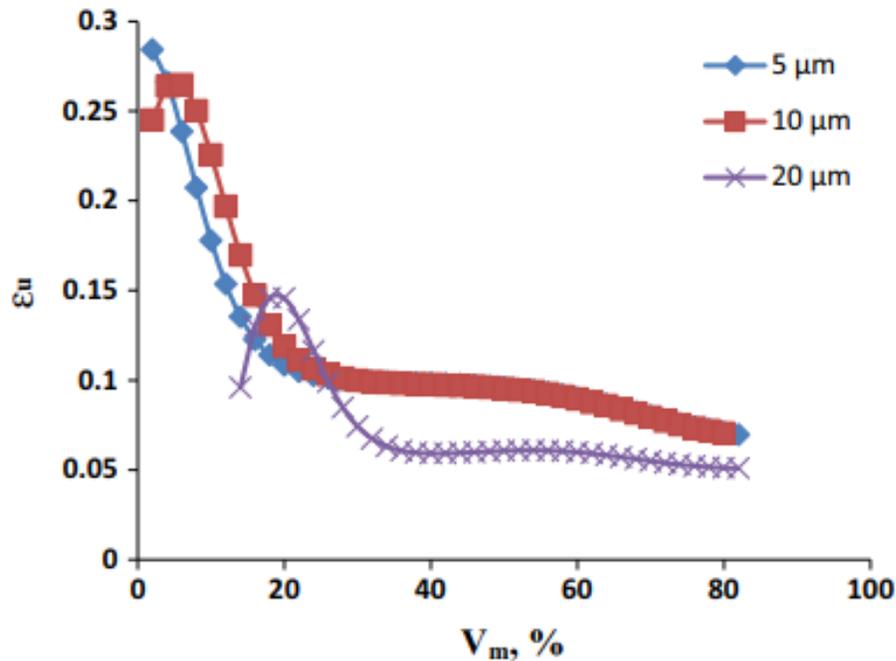
*Máxima resistencia a la tracción en función del volumen de martensita*



*Nota.* Máxima resistencia a la tracción en función del volumen de martensita para tres tamaños de grano de ferrita donde se evidencia el aumento de la resistencia a la tracción al incrementar el volumen en fracción de forma exponencial hasta 45% en volumen en fracción; a partir del punto de inflexión sobre los 1300 MPa, el incremento de la máxima resistencia a la tracción no es tan pronunciado. Tomado de: S. A. Etesami *et al.* The Influence of Volume Fraction of Martensite and Ferrite Grain Size on Ultimate Tensile Strength and Maximum Uniform True Strain of Dual Phase Steel, pp. 1605–1612.

**Figura 20.**

*Deformación unitaria en función del volumen de martensita*

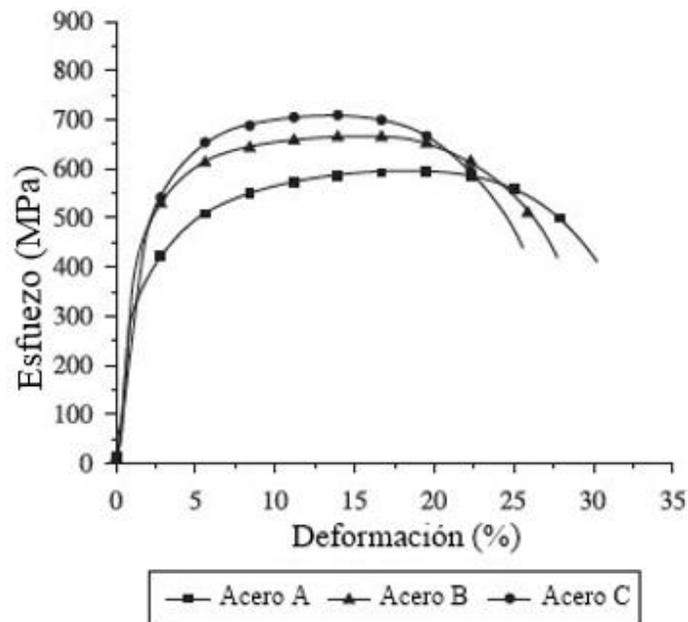


*Nota.* Deformación unitaria en función del volumen de martensita para tres diferentes tamaños de grano de ferrita donde se evidencia la reducción de la deformación unitaria exponencialmente hasta 20% en volumen en fracción donde describe un decrecimiento homogéneo a partir de este punto de inflexión. Tomado de: S. A. Etesami *et al.* The Influence of Volume Fraction of Martensite and Ferrite Grain Size on Ultimate Tensile Strength and Maximum Uniform True Strain of Dual Phase Steel, pp. 1605–1612.

Tanto el tamaño de grano y el volumen en fracción de martensita juegan un papel muy importante en la definición de la curva esfuerzo-deformación para los aceros de doble fase donde el volumen el fracción de martensita y el tamaño de grano de la fase ferrita modifican las propiedades mecánicas del acero de doble fase como muestra la figura 21.[29]

**Figura 21.**

*Gráfica esfuerzo-deformación para aceros de doble fase*



Specimen	Volumen en fracción de martensita (%)	Tamaño de grano de ferrita ( $\mu\text{m}$ )
Acero A	16.1	8.6
Acero B	18.6	5.5
Acero C	20.5	4.5

**Nota.** Gráfica esfuerzo-deformación para tres muestras de aceros de doble fase a diferente fracción de volumen de martensita y tamaño de grano de la fase ferrita, donde se evidencia la mejora en respuesta mecánica del material. El acero A de 16.1% de volumen en fracción con un tamaño de grano de ferrita de 8.6  $\mu\text{m}$  ofrece un esfuerzo último cercano a 600 MPa y el acero C de 20.5% de volumen en fracción con un tamaño de grano de ferrita de 4.5  $\mu\text{m}$  ofrece un esfuerzo último cercano a 710 MPa donde el esfuerzo mejora al incrementar el volumen en fracción de martensita y reducir el tamaño de grano de ferrita. Tomado de: Y. Hu, Z. Xiurong, R. Li y Z. Zhang, Effect of initial microstructures on the properties of Ferrite-Martensite Dual-Phase pipeline steels with Strain-Based design. pp. 5.

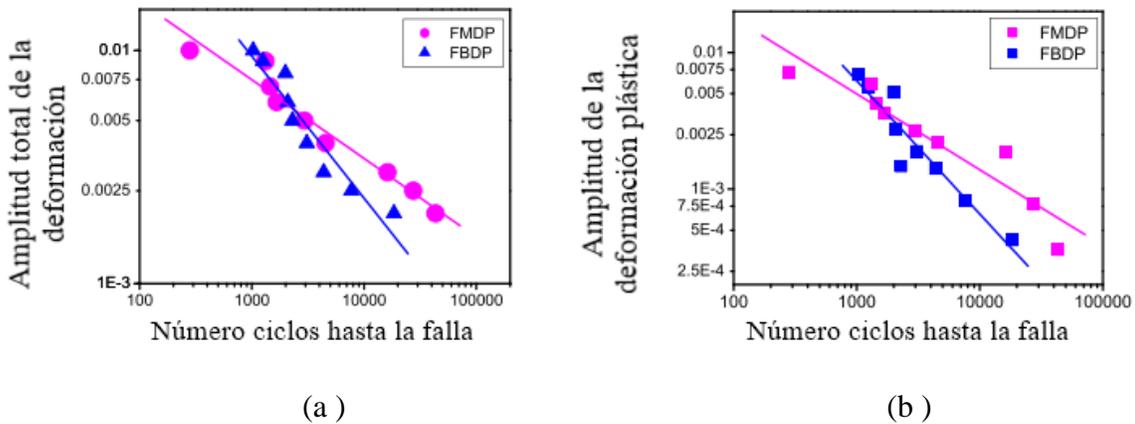
Aumentar el volumen de martensita en torno al 10% en volumen en fracción, permite aumentar la capacidad de disipar energía de impacto en un 11.4% en la microestructura de morfología granular fina, debido al bajo contenido de carbono y las propiedades mecánicas de la martensita

donde a mayor cantidad de carbono en la estructura, los valores de energía de impacto disminuyen, con lo anterior se establece que el tamaño de grano juega un papel importante en la disipación de energía de impacto.[30]

Los aceros de doble fase compuestos por ferrita y martensita muestran excelente respuesta en comparación a los aceros de doble fase compuestos por ferrita y bainita ante la aplicación de ciclos de carga, donde la amplitud total de la deformación y deformación plástica frente al número de ciclos hasta la falla es superior en relaciones de amplitud mayores a 0.005, ilustrado en la figura 22 siendo la amplitud la relación entre las deformaciones máximas y mínimas. [31]

**Figura 22.**

*Amplitud total de la deformación frente al número de ciclos*



**Nota.** El acero de doble fase compuesto por ferrita y martensita (FMDP) presenta mejores propiedades ante fatiga frente a un acero doble fase compuesto por ferrita y bainita (FB DP) a partir de una amplitud de deformación total  $\left(\frac{\Delta\epsilon_t}{2}\right) \geq 0.005$  y amplitud de deformación plástica  $\left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right) \geq 0.005$ . Tomado de: S. Majumdar, S. Roy y K. Ray. Fatigue performance of dual-phase steels for automotive wheel application. pp. 13.

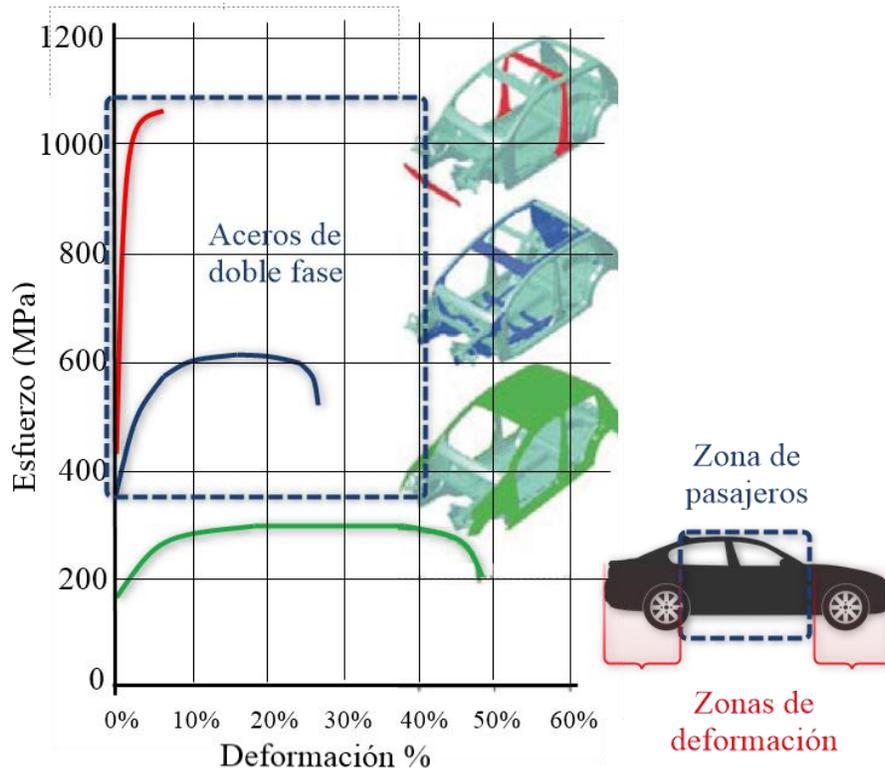
#### 1.4 Aplicaciones industriales

Siendo uno de los aceros más usados en la industria automovilística por su alta resistencia a la tracción, su favorable respuesta al impacto y su alta ductilidad en comparación con aceros convencionales, los aceros de doble fase son usados en los componentes de las jaulas de seguridad de los vehículos que requieren alta dureza y ductilidad para resistir el impacto ante choques, donde

el material pueda absorber grandes cantidades de energía. [32]. En la figura 23 se muestra la aplicación de aceros según su curva de esfuerzo-deformación en los componentes estructurales de los vehículos.

**Figura 23.**

*Gráfica esfuerzo-deformación para diferentes partes en la estructura de un vehículo*



**Nota.** Los aceros de doble fase se ubican entre los rangos de 400 MPa - 1100 MPa y porcentajes de elongación superiores a 10%, siendo usados en los componentes estructurales de los vehículos. Tomado de: C. Tamarelli. ahss 101 the evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications. pp. 16.

Los aceros de doble fase por sus características mecánicas son un material de interés para la industria de la construcción al ser incluido como refuerzo estructural de concreto, lo que brinda a la estructura sismo resistencia.[33]

En conclusión, se puede decir que los aceros de doble fase son aceros compuestos de ferrita y martensita, obtenidos a partir de aceros hipoeutectoides (ferrita y perlita) [8], tratados térmicamente mediante una transformación de fase, calentados hasta zonas intercríticas, realizando un sostenimiento de la temperatura y posteriormente un enfriamiento rápido para obtener una martensita blanda a partir de la austenita ( $\gamma$ ) [24]; son superiores en cuanto a su respuesta mecánica, poseen un alta dureza en comparación a aceros convencionales, una resistencia a la tracción entre 400 MPa y 1400 MPa, porcentajes de elongación entre 10% y 40% , lo que depende del porcentaje de carbón y la cantidad de martensita presentes en la microestructura. [32],[9]

Adicionalmente, son aceros que presentan excelente respuesta ante ciclos de cargas variables o fatiga frente a otros aceros [31] y evidencian elevados niveles de absorción de energía en colisiones o impacto a menor cantidad de carbono en la estructura. [30]

Estas características hacen que los aceros de doble fase sean de gran interés con una importante demanda en la industria.[6] En el sector automovilístico responden adecuadamente ante los requerimientos y altos estándares de seguridad, y en la industria de construcción son de interés para estructuras sismo resistentes. [32], [33]

## 1.5 Estereología

Como lo menciona Pérez en su investigación, “La estereología es el resultado de razonamientos matemáticos complejos, concretados en fórmulas aplicables para la obtención de parámetros tales como: densidad de volumen, densidad de superficie, densidad numérica y densidad de longitud, a partir de imágenes bidimensionales”. [34]

Por otro lado la estereología también se define como el campo de estudio de las mediciones realizadas en un plano bidimensional que describen las relaciones entre dicho plano bidimensional y las características tridimensionales de la muestra microestructural.[35]

ASTM International brinda herramientas mediante designaciones para realizar estas mediciones. Cabe destacar que realizar este proceso es complejo debido a las características morfológicas y a la facilidad de cometer errores en los procesos de medición manual. Algunos parámetros que pueden ser medidos mediante estudios estereológicos son:

- Fracción de volumen: cantidad de fases presentes de los constituyentes del material.
- Número de unidades por área: cantidad de elementos o granos presentes en el área de muestreo.

- Área promedio: Área promedio de grano.
- Grado de orientación de las superficies: parámetro dado por deformaciones del material comúnmente en deformaciones en frío.
- Tamaño de grano: Tamaño de grano.
- Espaciamiento entre las partículas de dos fases: Afecta la tenacidad del material, la resistencia y la fractura dúctil.

### 1.5.1 Fracción de volumen

La cantidad de fases presentes en los materiales se relaciona estrechamente con las propiedades mecánicas, siendo en los aceros de doble fase la dureza una propiedad directamente proporcional al volumen de martensita presente en el material.

Mediante métodos de microscopía se puede determinar esta fracción de volumen de la fase de interés mediante tres técnicas [36]:

1.5.1.a Fracción de área por cuadros ocupados. sobre una micrografía se ubica una malla plástica con 500 celdas en la cual el operador debe contar los cuadros ocupados, 3/4 ocupados, 1/2 ocupado y 1/4 ocupado por el constituyente de interés. Se emplea la siguiente ecuación para medir la fracción de volumen.

$$A_A = \frac{\sum A_\alpha}{A_T}$$

Donde:

$A_A$  : fracción de área del constituyente de interés

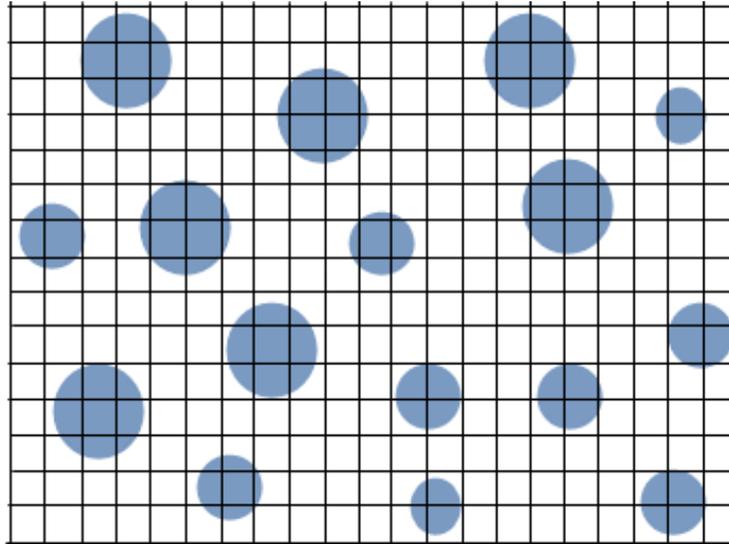
$\sum A_\alpha$ : sumatoria de las áreas o cuadrados ocupados que conforman la fase de interés ( $\alpha$ )

$A_T$ : área total de la imagen

Para ilustrar un ejemplo en la figura 24 se toma como referencia una malla de 21x15 elementos donde se cuentan los elementos ocupados para la fase de interés, considerando si el cuadrado está completamente ocupado o si se encuentra ocupado a  $\frac{3}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  y  $\frac{1}{4}$  de la totalidad.

**Figura 24.**

*Malla de 315 elementos con 16 formas circulares en su interior*



**Nota.** Malla de 315 elementos donde se encuentran 16 cuadrados ocupados completamente, 18 cuadrados ocupados a  $\frac{3}{4}$ , 24 cuadrados ocupados a  $\frac{1}{2}$  y 44 cuadrados ocupados a  $\frac{1}{4}$ . Para un total de 16.66% de elementos azules en la muestra.

1.5.1.b Fracción lineal. Se basa en la suma de las longitudes de los segmentos de línea dentro de la fase de interés dividida por la longitud total. Se emplea la ecuación mostrada a continuación para medir la fracción de volumen.

$$L_L = \frac{\sum L_\alpha}{L_T}$$

Donde:

$L_L$ : fracción lineal del constituyente de interés

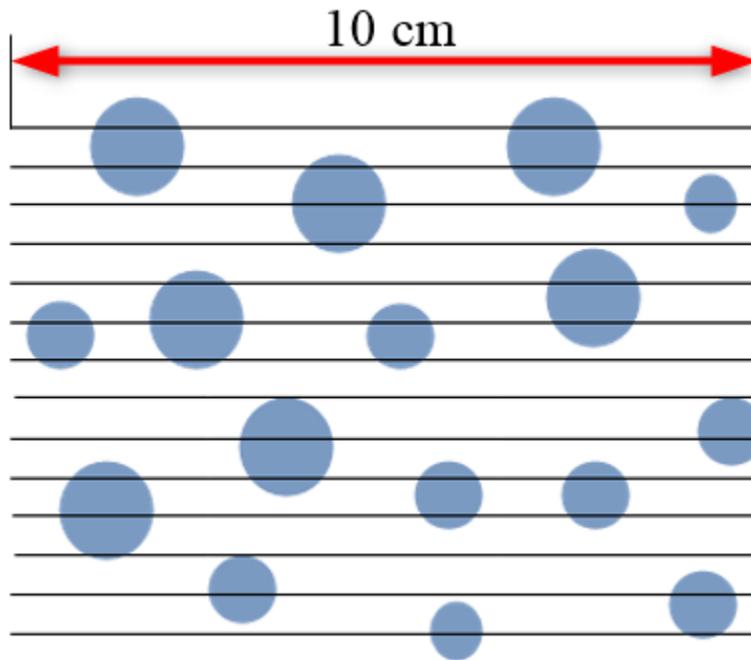
$\sum L_\alpha$ : sumatoria de la longitud de las líneas dentro de la fase de interés ( $\alpha$ )

$L_T$  : longitud total de las líneas de prueba

Para ilustrar un ejemplo en la figura 25 se toman como referencia líneas de 10 cm de longitud y se procede a medir las longitudes ocupadas por los elementos azules.

**Figura 25.**

*14 líneas de prueba sobre la muestra de 16 elementos*



**Nota.** 14 líneas de 10 cm sobre la imagen donde la suma de las longitudes de las 14 líneas de prueba corresponde a 140 cm y la longitud total ocupada por los elementos de color azul corresponde a 16.7 cm, dando un valor de fracción lineal de 11.92%

1.5.1.c Fracción puntual. Este método es descrito en la norma ASTM E562 [37], donde se ubica una malla plástica sobre la imagen visualizada en el microscopio y se cuentan los puntos presentes en el constituyente de interés para dividirlos por el total de puntos de la cuadrícula; si uno de los puntos es tangente a la fase se cuenta como la mitad, se emplea la siguiente ecuación para medir la fracción de volumen.

$$P_p = \frac{\sum P_\alpha}{P_T}$$

Donde:

$P_p$  : fracción puntual del constituyente de interés

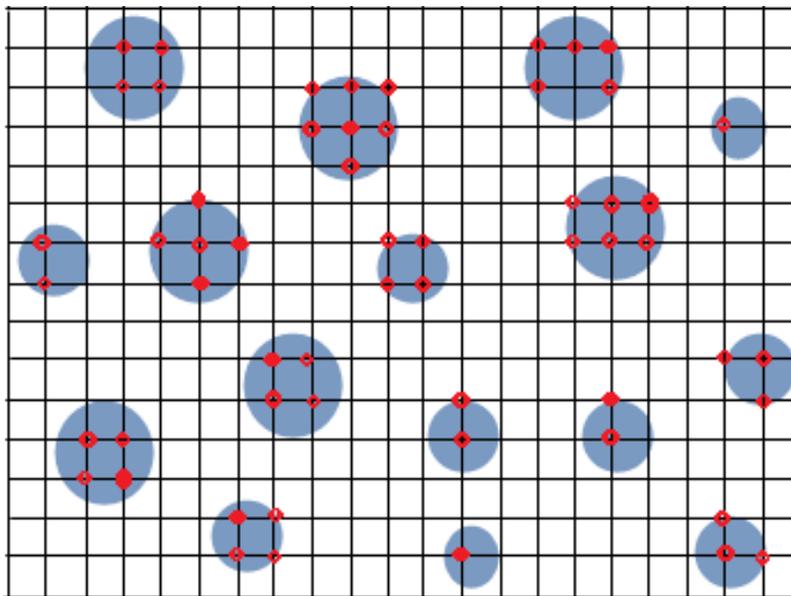
$\sum P_\alpha$ : sumatoria de puntos que se encuentran dentro del constituyente de interés ( $\alpha$ )

$P_T$ : cantidad total de puntos en la micrografía

Para ilustrar un ejemplo en la figura 26 se toma como referencia una malla de 21x15 elementos donde se cuentan los puntos presentes en la fase de interés.

**Figura 26.**

*Malla de 352 intersecciones con 16 formas circulares en su interior*



*Nota.* Malla de 352 intersecciones donde se encuentran 56.5 puntos presentes en los elementos de color azul para un total de 16.05% de elementos azules en la muestra.

Las metodologías anteriores, permiten cuantificar el volumen en fracción satisfaciendo la siguiente igualdad.

$$V_V = P_P = L_L = A_A$$

Donde:

$V_V$ : medición del volumen en fracción

$A_A$ : fracción de área

$L_L$ : fracción lineal

$P_p$  : fracción puntual

Las mediciones realizadas para el volumen en fracción mediante los métodos estereológicos permiten obtener valores aproximados para el porcentaje o cantidad de los constituyentes; sin embargo, estas mediciones son complejas por la facilidad de cometer errores en la medición. En muestras de gran tamaño se requiere experiencia y tiempo para obtener un resultado eficiente medido de manera manual, el método de fracción por área ofrece mejores resultados por la metodología de medición, siendo el más demandante en experiencia y tiempo, el método de medición por fracción puntual ofrece buenos resultados frente a la metodología de fracción lineal el cual es el método más rápido para obtener mediciones en volumen en fracción lo cual depende de la cantidad de líneas de prueba.

### **1.5.2 Tamaño de grano**

La norma ASTM en su designación E-112 [5] y las imágenes tomadas de la microestructura de forma experimental permiten determinar el tamaño de grano para microscopías de aceros de fase dual. [38] El tamaño de grano se determina a partir del volumen de fracción de las fases donde se considera la fracción del constituyente de interés empleando el método de los interceptos en el cual se debe trazar una línea para determinar la cantidad de granos interceptados y determinar la longitud promedio entre las intersecciones de los granos mediante la ecuación mostrada a continuación.[3]

$$l_{\alpha} = \frac{(V_V) * (L/M)}{N_{\alpha}}$$

Donde:

$l_{\alpha}$ : longitud promedio de grano o diámetro de grano

$L$  : longitud de la línea de prueba

$M$  : magnificación

$V_V$  : fracción de volumen de la fase de interés

$N_{\alpha}$  : es el número de granos por milímetro cuadrado a una aumento X1

Para calcular el tamaño de grano se emplea la siguiente ecuación y la tabla 1 de Relaciones de tamaño de grano [5]:

$$G = [-6.644 (\log l_{\alpha}) - 3.288]$$

Donde:

$l_{\alpha}$  es la longitud promedio de grano o diámetro de grano

$G$  es el tamaño de grano ASTM

**Tabla 1.**

*Relaciones de tamaño de grano ASTM según la norma ASTM E-112*

Grain Size No. G	$\bar{N}_A$ Grains/Unit Area		$\bar{A}$ Average Grain Area		$\bar{d}$ Average Diameter	
	No./in. <sup>2</sup> at 100X	No./mm <sup>2</sup> at 1X	mm <sup>2</sup>	μm <sup>2</sup>	mm	μm
00	0.25	3.88	0.2581	258064	0.5080	508.0
0	0.50	7.75	0.1290	129032	0.3592	359.2
0.5	0.71	10.96	0.0912	91239	0.3021	302.1
1.0	1.00	15.50	0.0645	64516	0.2540	254.0
1.5	1.41	21.92	0.0456	45620	0.2136	213.6
2.0	2.00	31.00	0.0323	32258	0.1796	179.6
2.5	2.83	43.84	0.0228	22810	0.1510	151.0
3.0	4.00	62.00	0.0161	16129	0.1270	127.0
3.5	5.66	87.68	0.0114	11405	0.1068	106.8
4.0	8.00	124.00	0.00806	8065	0.0898	89.8
4.5	11.31	175.36	0.00570	5703	0.0755	75.5
5.0	16.00	248.00	0.00403	4032	0.0635	63.5
5.5	22.63	350.73	0.00285	2851	0.0534	53.4
6.0	32.00	496.00	0.00202	2016	0.0449	44.9
6.5	45.25	701.45	0.00143	1426	0.0378	37.8
7.0	64.00	992.00	0.00101	1008	0.0318	31.8
7.5	90.51	1402.9	0.00071	713	0.0267	26.7
8.0	128.00	1984.0	0.00050	504	0.0225	22.5
8.5	181.02	2805.8	0.00036	356	0.0189	18.9
9.0	256.00	3968.0	0.00025	252	0.0159	15.9
9.5	362.04	5611.6	0.00018	178	0.0133	13.3
10.0	512.00	7936.0	0.00013	126	0.0112	11.2
10.5	724.08	11223.2	0.000089	89.1	0.0094	9.4
11.0	1024.00	15872.0	0.000063	63.0	0.0079	7.9
11.5	1448.15	22446.4	0.000045	44.6	0.0067	6.7
12.0	2048.00	31744.1	0.000032	31.5	0.0056	5.6
12.5	2896.31	44892.9	0.000022	22.3	0.0047	4.7
13.0	4096.00	63488.1	0.000016	15.8	0.0040	4.0
13.5	5792.62	89785.8	0.000011	11.1	0.0033	3.3
14.0	8192.00	126976.3	0.000008	7.9	0.0028	2.8

**Nota.** La medición del tamaño de grano según la norma ASTM E-112 define un valor entre 00 y 14 con sus respectivos valores de área y diámetro promedio de toda la muestra; para aceros de doble fase se debe considerar el volumen en fracción del constituyente de interés. Tomado de: ASTM International, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 1996, p. 2.

El método de los interceptos para la medición del tamaño de grano en según la norma ASTM E-112 [5] es similar a la medición del volumen en fracción por fracción lineal; a mayor cantidad

de líneas de prueba el resultado será más eficiente, este método considera el volumen en fracción del constituyente de la fase de interés por lo que el error de la medición puede incrementar al no definir correctamente el volumen en fracción de la muestra, estos procesos hacen compleja la medición del tamaño de grano por la dependencia del volumen en fracción sumándole la alta demanda de experiencia y tiempo al igual que al realizar la medición del volumen en fracción.

### ***1.5.3 Espaciamento entre fases***

La norma ASTM en su designación E-1245, [39] permite medir el espaciamento entre fases entre dos constituyentes, donde se trazan líneas de prueba sobre la microscopía con longitudes definidas para cuantificar el número de inclusiones del constituyente de interés empleando la siguiente ecuación:

$$N_L = \frac{\sum N_\alpha}{L_T}$$

Donde:

$N_L$ : número de inclusiones interceptadas o partículas por unidad de longitud

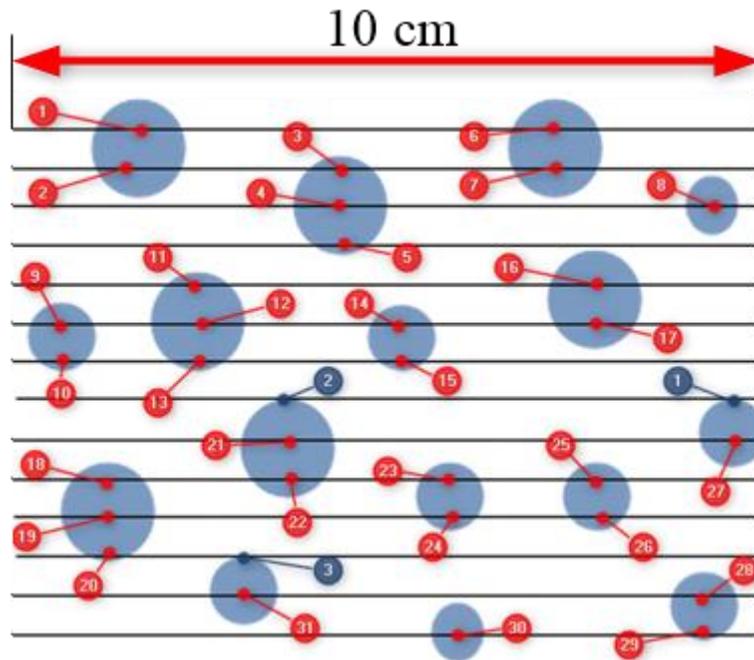
$N_\alpha$ : número de inclusiones interceptadas para la línea de prueba

$L_T$  : longitud real de la línea de prueba

El conteo de inclusiones o fases interceptadas  $N_\alpha$  considera que, si la línea de prueba corta una inclusión, esta se cuenta como uno y si la línea de prueba es tangente a la fase se cuenta como 0.5, este proceso se ejemplifica en la figura 27.[39]

**Figura 27.**

*14 líneas de prueba y conteo de intersecciones sobre la muestra de 16 elementos*



**Nota.** 14 líneas de prueba de 10 cm sobre la imagen donde el número de intersecciones de fase completa equivale a 31 y fases tangentes a la línea de prueba equivale a 3 siendo el número de fases interceptadas o partículas por unidad de longitud equivalente a  $0.3014 \frac{\text{particulas}}{\text{cm}}$ .

Para la medición del espaciamiento entre fases se emplea la ecuación mostrada a continuación:

$$\lambda = \frac{1 - A_A}{N_L}$$

Donde:

$\lambda$  : espaciamiento entre fases o bordes

$A_A$  : volumen en fracción medido por fracción de área

$N_L$  : número de inclusiones interceptadas o partículas por unidad de longitud

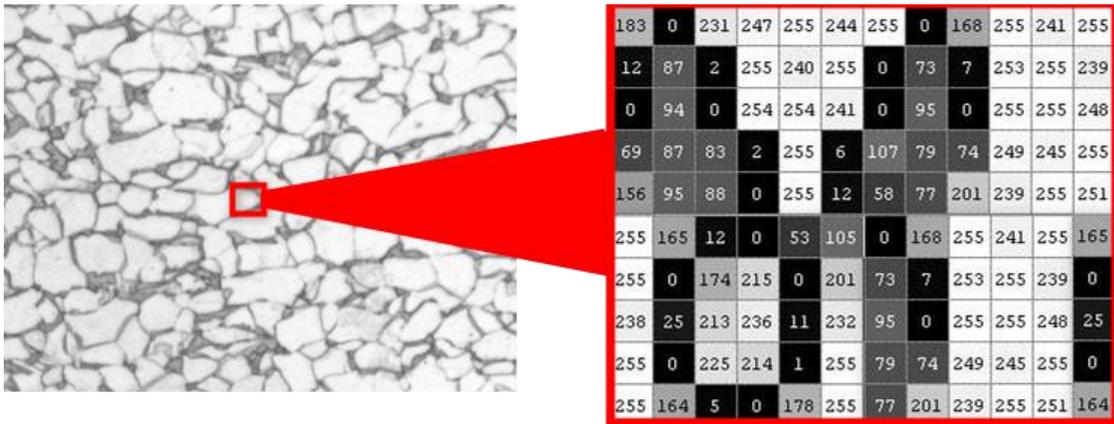
Esta metodología presenta las mismas limitaciones que el volumen en fracción y el tamaño de grano a la hora de definir una correcta medición ya que se requiere experiencia y tiempo para obtener datos y mediciones precisas.

## 2. ANÁLISIS DIGITAL DE IMÁGENES

Las imágenes digitales son matrices que representan las diferentes coordenadas espaciales, intensidades y datos de los objetos visualizados en un elemento denominado píxel; esta representación matricial permite manipular la imagen para realzar formas y realizar mediciones en esta. La figura 28 representa los píxeles de una imagen digital. [40], [41].

**Figura 28.**

*Representación de píxeles de una imagen*

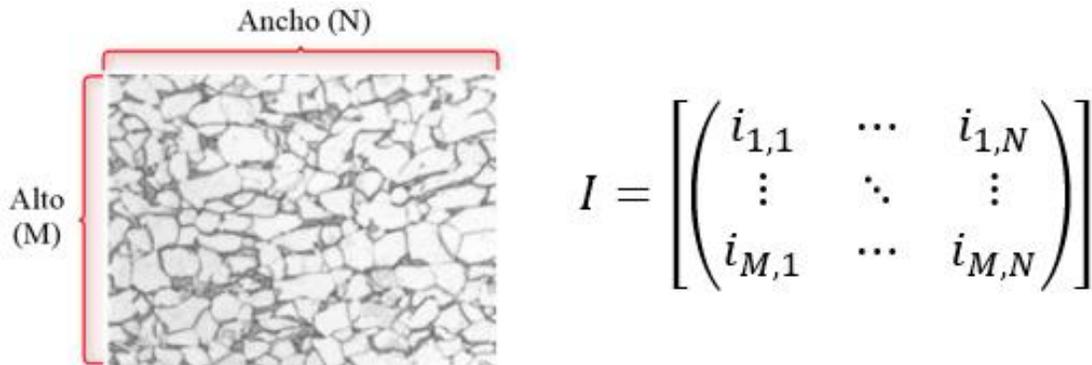


**Nota.** Representación de píxeles de una imagen con sus respectivos valores de intensidad donde para el ejemplo se usa una imagen en escala de grises.

El tamaño de imagen se representa mediante las dimensiones de la matriz equivalente de píxeles siendo alto y ancho, donde el alto representa el número de filas de la matriz y el ancho representa el número de columnas, estableciendo un tamaño de imagen NxM (Ancho x Alto) en la figura 29 se ejemplifica esta nomenclatura.

**Figura 29.**

*Tamaño de imagen NxM (Ancho X Alto) y representación matricial*

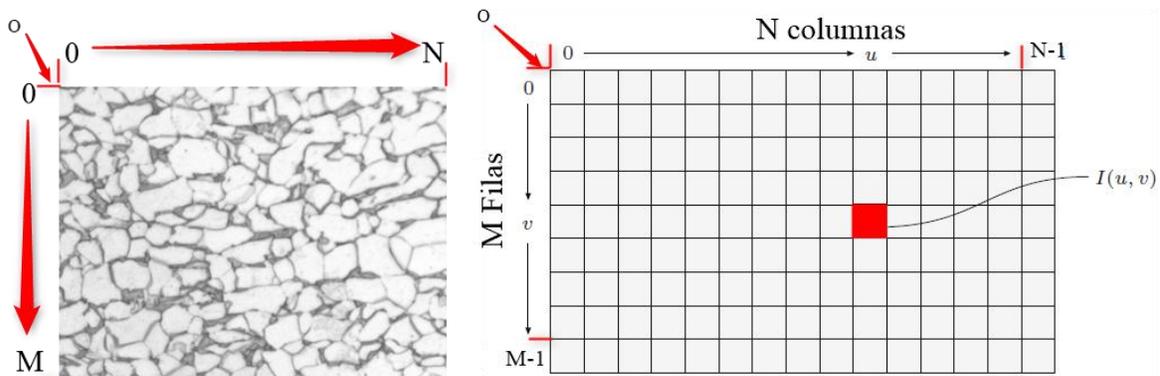


**Nota.** Representación de las dimensiones de una imagen en forma matricial, donde el número de filas corresponde al alto de la imagen (M) y las columnas al ancho (N).

El sistema coordenado matricial para la imagen se muestra en la figura 30.

**Figura 30.**

*Sistema coordenado matricial de un imagen*



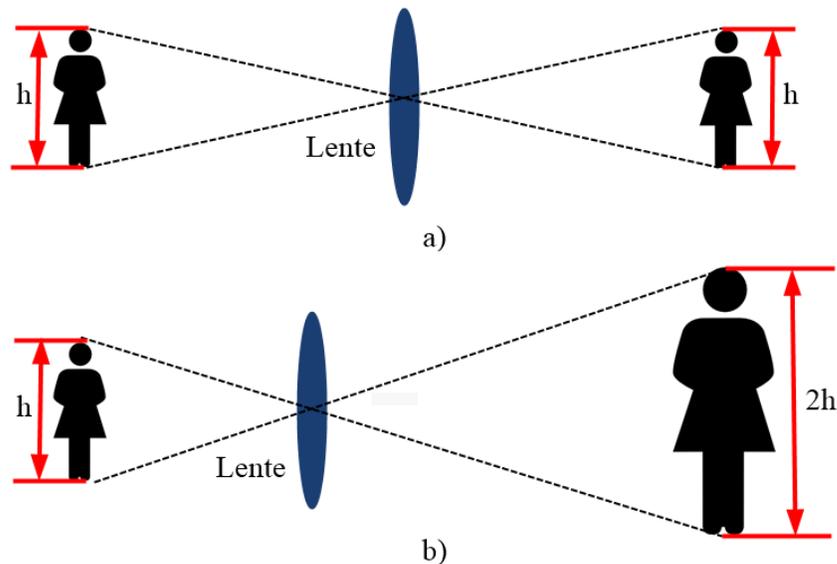
**Nota.** Sistema coordenado donde "O" es el origen del sistema coordenado (0,0), "N" y "M" son el tamaño de imagen,  $I(u, v)$  las coordenadas de la matriz de representación de imagen. Tomado de: M. J. Burge y W. Burger, Digital Image Processing. pp. 10.

## 2.1 Componentes de una imagen digital

El aumento de una reproducción (imagen digital) es la relación entre las dimensiones del objeto en dicha imagen y el tamaño real del objeto representado; esta característica se expresa como magnificación de imagen que se ilustra en la figura 25.

**Figura 31.**

*Magnificación de imagen digital*



**Nota.** Magnificación de imagen. (a) representación de una relación de magnificación 1:1 donde la imagen reflejada posee la misma dimensión de la imagen real, esta magnificación es escrita convencionalmente como magnificación X1; (b) representación de una relación de magnificación 2:1 donde la imagen reflejada posee el doble de la dimensión de la imagen real, esta magnificación es escrita convencionalmente como magnificación X2.

Tomado de: <https://www.fisicalab.com/apartado/microscopio>

Para determinar la magnificación se emplea la ecuación.

$$M = \frac{h_i}{h_o}$$

Donde:

$M$ : magnificación

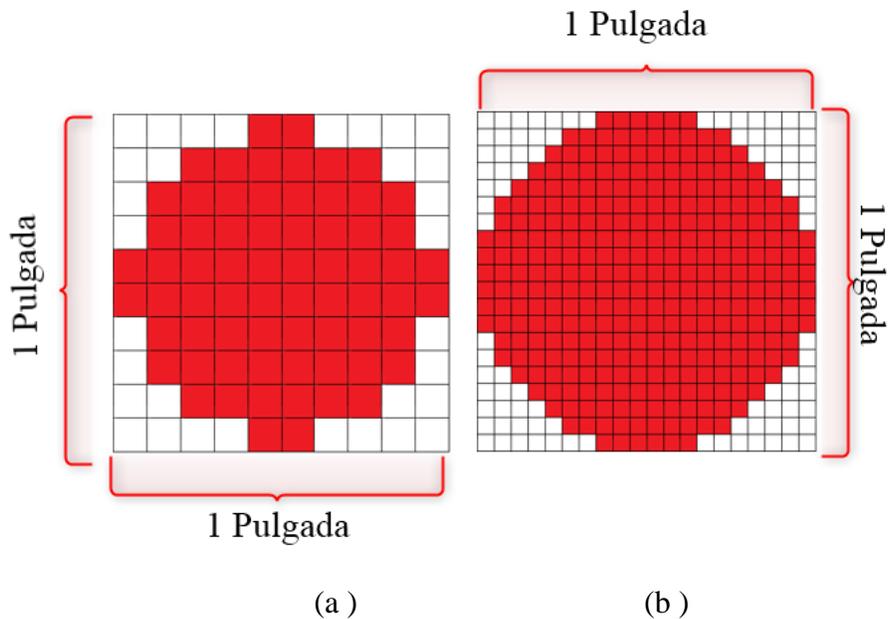
$h_i$ : imagen reflejada

$h_o$ : imagen del objeto real

La resolución de una ilustración dicta el nivel de detalle que se puede observar en dicha imagen indicado como el número de elementos de imagen por unidad de medida, siendo de mayor resolución aquellas ilustraciones que albergan mayor cantidad de píxeles en el total de la imagen relacionándose de manera directamente proporcional al tamaño, esto se ilustra en la figura 32; es así como la cantidad de píxeles en la imagen dictan los niveles de detalle, una variable muy importante para distinguir la mayor cantidad de formas, o bordes de grano en el caso de las micrografías de aceros de fase dual.

**Figura 32.**

*Resolución de imagen*



**Nota.** (a) Representación de un círculo en una matriz de 10x10 elementos de una pulgada cuadrada de área; (b) Representación de un círculo en una matriz de 20x20 elementos de una pulgada cuadrada de área. La figura muestra cómo al aumentar el número de píxeles por pulgada cuadrada, la resolución del círculo mejora distinguiendo mejor la curvatura del círculo.

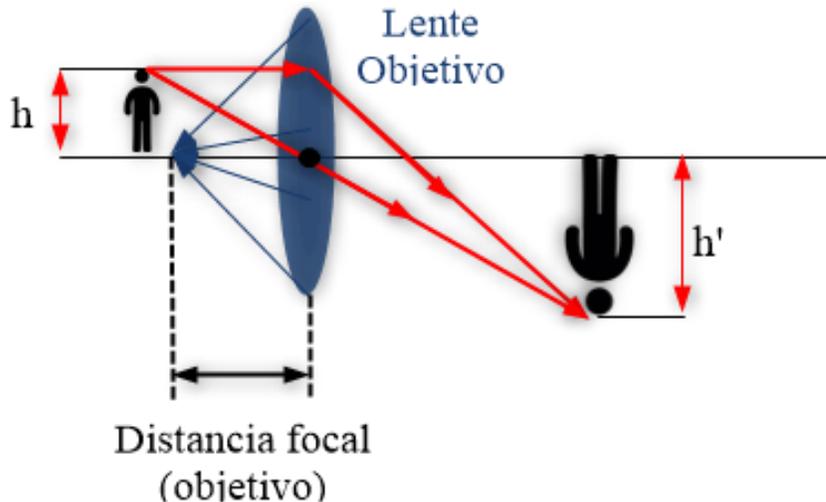
## 2.2 Digitalización de imagen

Para obtener las muestras microscópicas de los aceros de doble fase se emplean microscopios ópticos que permiten observar objetos muy pequeños imposibles de distinguir a simple vista; son instrumentos compuestos por dos lentes convergentes que permiten generar aumentos en el objeto real visualizado.[42]

Como se mencionó anteriormente, el microscopio se compone de dos lentes convergentes, denominados objetivo y ocular; los cuales poseen distintas distancias focales (distancia entre el lente y el punto de convergencia o unión de los rayos refractados) siendo la distancia focal del lente ocular mayor que la distancia del lente objetivo. El objeto para visualizar se ubica por delante de la distancia focal del lente objetivo, permitiendo generar una imagen refractada por el lente que será una imagen invertida con un primer aumento como muestra la figura 33.

**Figura 33.**

*Aumento del lente objetivo*



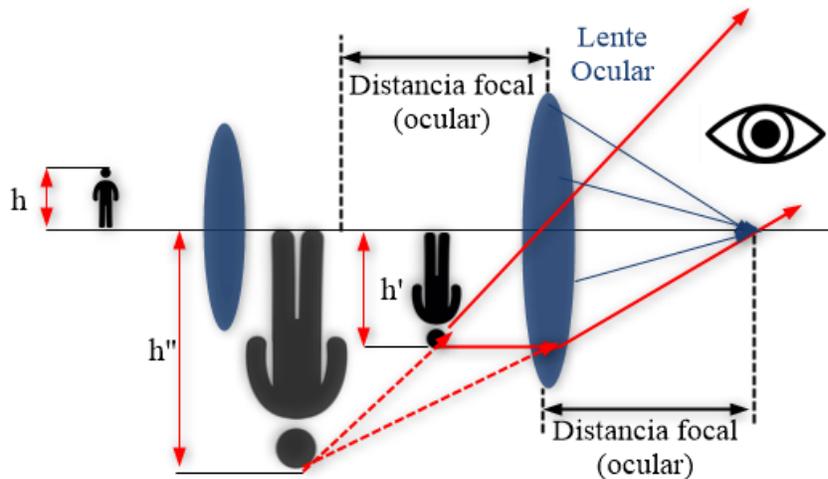
*Nota.* El objeto visualizado de altura  $h$  se magnifica producto de la refracción de la luz a través del lente objetivo. El objeto para magnificar se ubica por delante de la distancia focal del lente, obteniendo una imagen invertida de altura  $h'$  donde para el ejemplo  $h' > h$ . Tomado de: <https://www.fisicalab.com/apartado/microscopio>

Se emplea el segundo lente (ocular) para crear una segunda ampliación usando la imagen magnificada del lente objetivo donde la refracción de la imagen original se ubica en la distancia

focal del lente ocular para crear una magnificación de la refracción del lente objetivo como muestra la figura 34.[42]

**Figura 34.**

*Aumento del lente ocular*



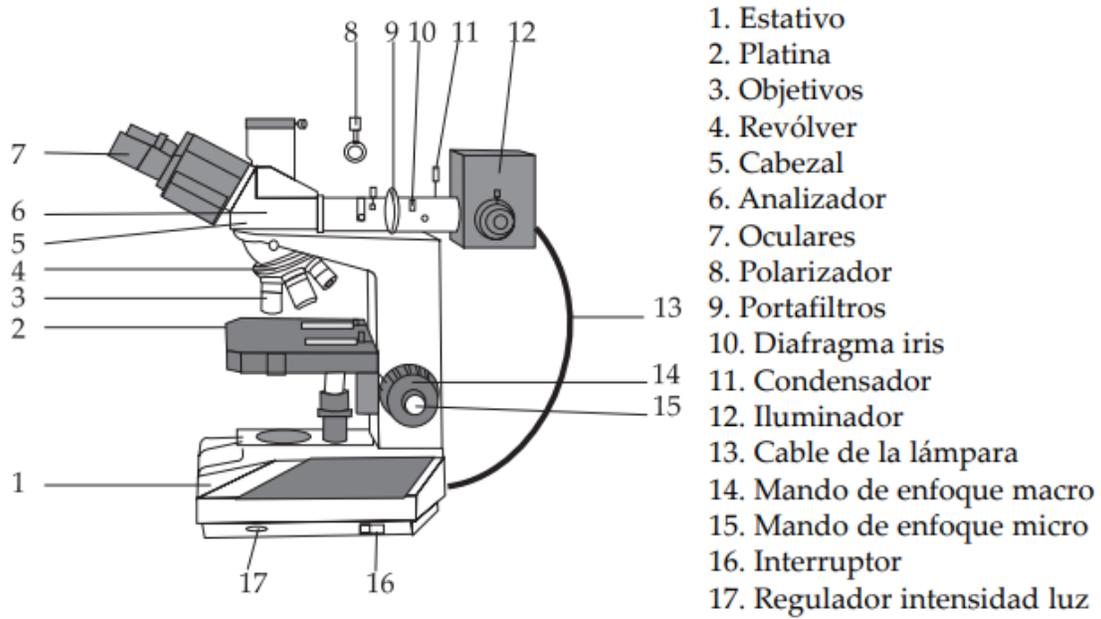
**Nota.** La ampliación del objeto visualizado  $h'$  se magnifica producto de la refracción de la luz a través del lente ocular donde se ubica la muestra a magnificar entre de la distancia focal del lente obteniendo una imagen magnificada  $h''$  donde para el ejemplo  $h'' > h' > h$ . Tomado de:

<https://www.fisicalab.com/apartado/microscopio>.

En la figura 35 se muestra un microscopio óptico metalográfico.

**Figura 35.**

*Microscopio óptico metalográfico*



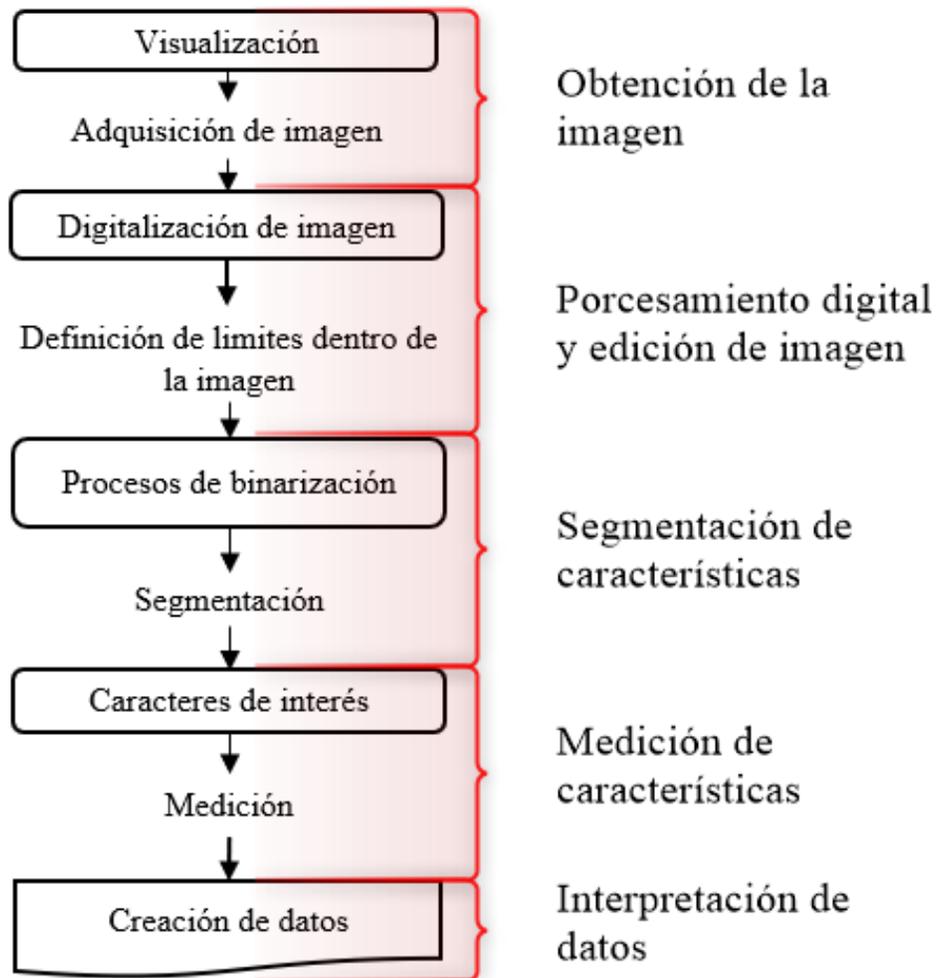
**Nota.** Microscopio metalográfico Zuzi, modelo 173/2. Tomado de:  
<https://manualzz.com/download/20619029>

## 2.3 Procesamiento digital en el dominio espacial

Para realizar el proceso de análisis de imágenes de forma digital se emplea una serie de pasos mostrados en el diagrama de flujo de la figura 36. [40]

**Figura 36.**

*Diagrama de flujo del procesamiento digital de imágenes*

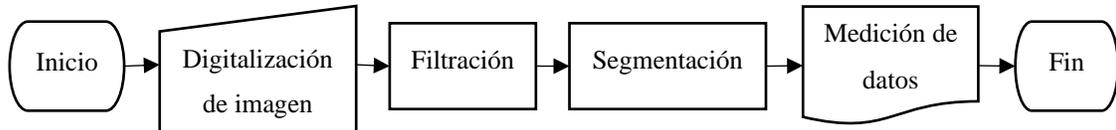


*Nota.* Procesamiento digital de imágenes donde se destacan las etapas de obtención de imagen, segmentación de características, medición e interpretación de datos; cada etapa se realiza de forma secuencial y debe estar adecuadamente ejecutada para obtener los resultados esperados. Tomado de: J. Zhang. Image Engineering, Volume II: Image Analysis.

A partir de la figura 36 se definen cuatro etapas principales para realizar el procesamiento digital de microscopías de aceros de fase dual mostradas en la figura 37.

**Figura 37.**

*Diagrama flujo general de proceso para el procesamiento digital de microscopías de aceros de doble fase*



**Nota.** Diagrama de flujo general de proceso dividido en cuatro etapas: digitalización de imagen, filtración, segmentación y medición de datos.

La digitalización de imagen corresponde a la toma de la imagen digital mediante microscopía óptica y la extracción de una matriz de representación; la filtración corresponde al mejoramiento de las formas aplicando filtros de realce de características; la segmentación es la etapa donde en la imagen se distinguen las fases de forma independiente y la medición de datos corresponde a toma de mediciones de propiedades estereológicas de microscopías de aceros de doble fase.

El proceso de digitalización de imagen extrae la matriz de representación de datos de una ilustración en 2D tomado con microscopios metalográficos donde dependiendo del tipo de imagen los valores de píxeles tendrán un rango de datos numéricos; los diferentes tipos de datos se muestran en la tabla 2. [43]

Los valores contenidos son la información de los caracteres de interés dentro de la imagen siendo para la escala de gris un dato del valor de intensidad de píxel de negro a blanco distribuido de 0 a 255; para el color (RGB) un vector que contiene la información de color [*Red, Green, Blue*] y para el tipo binario el color blanco representado con 1 y el color negro representado con 0.

**Tabla 2.**

*Tipos de imagen*

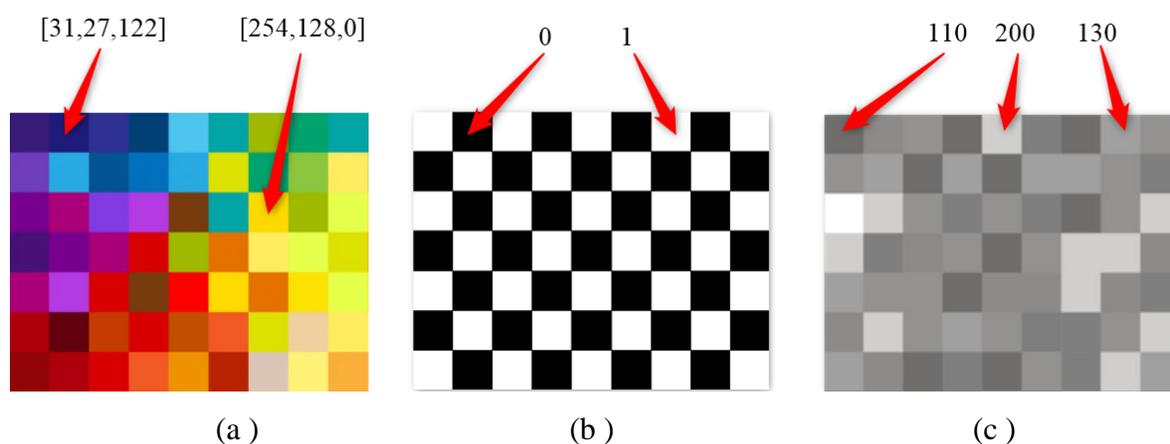
Tipo	Valores Contenidos en el píxel	Rango	Aplicación
Escala de gris	1	[0,255]	Fotos, escaneos, impresiones
Color (RGB)	3	[0,255] <sup>3</sup>	Fotos, escaneos, impresiones
Binario	1	[0,1]	Documento, ilustración, fax

**Nota.** El rango [0,255]<sup>3</sup> representa un vector que contiene la información de color [*Red, Green, Blue*] para imágenes de color (RGB) Tomado de: M. Burger. Digital image processing. pp. 10.

Las representaciones de los píxeles para el tipo de imagen se muestran en la figura 38.

**Figura 38.**

*Representación de píxeles para cada tipo de imagen*



**Nota.** (a) Representación de píxeles de color donde el vector representa la intensidad de color rojo, verde y azul respectivamente; (b) Representación de píxeles con valor binario donde el color blanco representa 1 y el color negro 0; (c) Representación de píxeles en escala de gris donde el valor 255 representa el color blanco y el valor 0 el color negro, siendo los datos del 0 al 255 la gama de matices de gris.

Dependiendo del tipo de imagen, se almacena la matriz de representación de píxeles ilustrada en la figura 29, donde podrá ser manipulada en el paso siguiente del diagrama de la figura 37. La reproducción al ser digitalizada presenta alteraciones en su visualización asociadas a su resolución, tamaño y características de la imagen que requiere un tratamiento mediante filtraciones para acentuar la morfología de interés.

## 2.4 Filtración

La filtración de imagen consiste en realizar diferentes operaciones aplicadas a los píxeles para modificar sus valores calculando nuevos datos para la matriz de representación de la imagen. Estas operaciones se basan en estadísticas para mejorar las características de la imagen. [44]–[46] Algunas de estas características son:

- **Intensidad:** corresponde al grado de apropiamiento de un color o valor de una región o píxel dentro de una imagen digital.
- **Iluminación:** es la cantidad de luz presente en la imagen, la cual se relaciona con el concepto de brillo o nivel de aclarado de imagen, que es un atributo de la luz que crea tonos claros u oscuros dentro de esta.
- **Contraste:** es la relación de intensidad entre elementos de la reproducción que permite definir la nitidez o grado de claridad con la cual se distinguen los objetos.
- **Ruido:** son las distorsiones en la homogeneidad de la imagen siendo alteraciones en el brillo y la intensidad de algunos elementos contenidos en la reproducción.

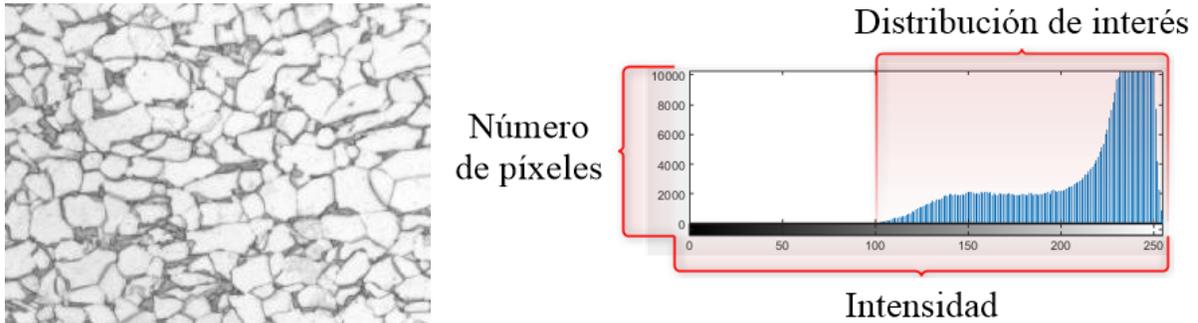
Estas características aplicadas al procesamiento digital de microscopías de aceros de doble fase se emplean con el objetivo de resaltar bordes de grano y crear uniformidad en estos mejorando el contraste, la iluminación y eliminando el ruido presente en la imagen. A partir de allí, se realizan operaciones estadísticas conocidas como métodos de dominio espacial por la manipulación directa de los píxeles de la imagen [47], los elementos que permiten generar filtraciones en las imágenes son:

### 2.4.1 Manipulación de histogramas

Un histograma es la representación gráfica de la cantidad de píxeles que poseen la misma intensidad dentro de una imagen donde se ubica el número de píxeles en el eje vertical y en el eje horizontal la intensidad o escala de gris que posee; el histograma se representa en la figura 39. [46]

**Figura 39.**

*Histograma de píxeles para una imagen*

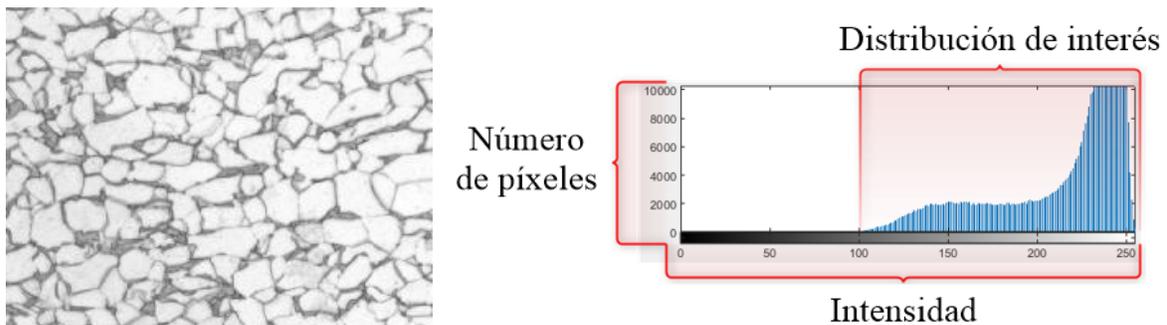


*Nota.* La figura muestra una imagen junto a su histograma que representa el número de píxeles agrupados con una intensidad de 0 (color negro) a 255 (color blanco), en la cual se identifica una tendencia de la imagen hacia el color blanco y una distribución de datos de 100 a 255 siendo prácticamente nulos los píxeles que poseen intensidades de 0 a 99.

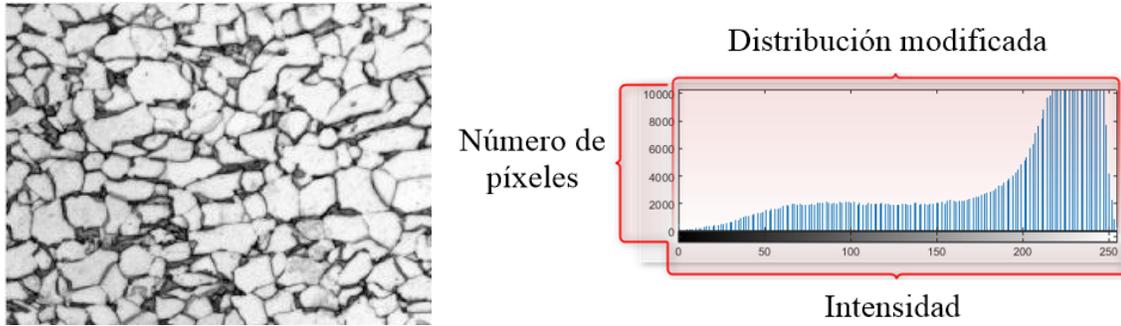
La distribución de píxeles puede ser manipulada con el objetivo de modificar la intensidad de luz y opacidad, permitiendo resaltar valores o formas, aumentando el contraste de la imagen donde se selecciona la distribución dentro del histograma de interés para generar un desplazamiento y modificar los valores máximos y mínimos de acuerdo con la sección definida, la modificación del histograma se muestra en la figura 40.

**Figura 40.**

*Histograma original y modificado de una microscopía de acero de fase dual*



(a)



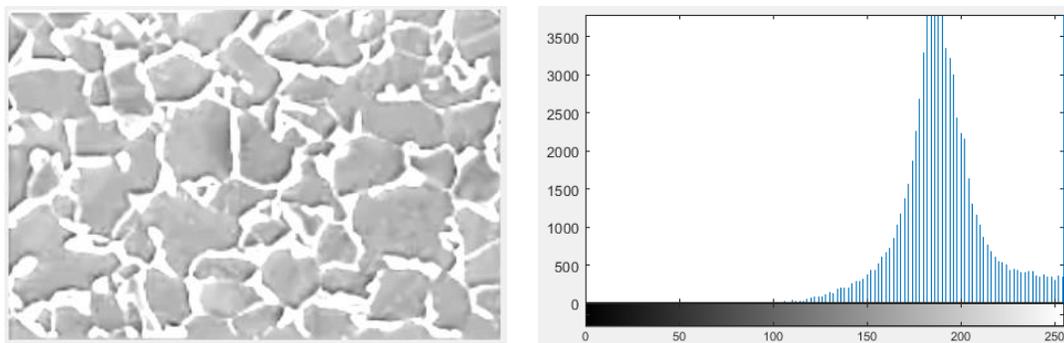
(b)

*Nota.* La figura corresponde a la modificación del histograma original: (a) representa la distribución original 0-255 con una distribución de interés de 100 a 255; (b) representa la modificación del histograma de interés definiendo el límite inferior de 100 como 0 realizando un realce de la segunda fase.

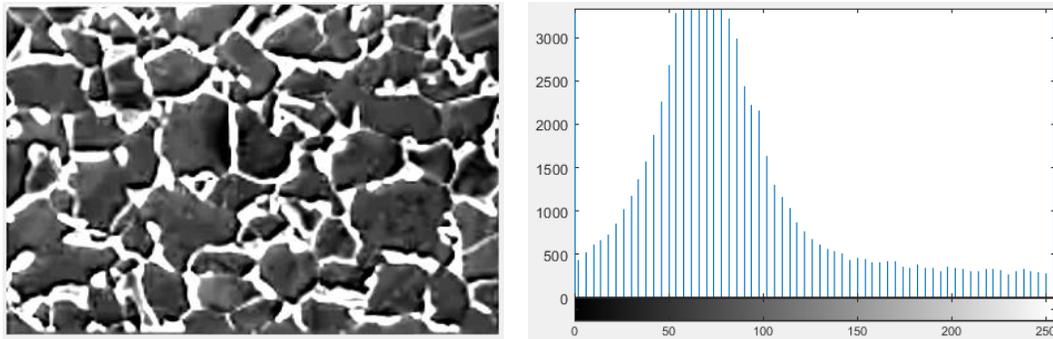
Dependiendo de la distribución de píxeles se pueden realizar operaciones de modificación o redistribución, algunos ejemplos se muestran en la figura 41 que evidencia los desplazamientos de histograma hacia la derecha e izquierda respectivamente, en estas modificaciones se destaca el realce y el cambio de luminosidad.

**Figura 41.**

*Desplazamiento del histograma y modificación de luminosidad*



(a)



(b)

*Nota.* (a) desplazamiento del histograma hacia la derecha (255) que permite modificar la distribución del histograma, generando un aclarado de la imagen por la tendencia de los píxeles a un rango de intensidad entre 125 y 255; (b) desplazamiento del histograma hacia la izquierda (0) que permite modificar la distribución del histograma, generando un oscurecimiento de la imagen por la tendencia de los píxeles a un rango de intensidad de 0 a 100.

#### 2.4.2 Enmascaramiento sin enfoque

El enmascaramiento sin enfoque permite crear un desenfoque, generando un realce de los bordes y eliminando nitidez del resto de la imagen. Se basa en la eliminación de bajas frecuencias identificando los píxeles vecinos del central cuyo valor es diferente al definido por el valor promedio de la vecindad de la imagen, que puede ser modificado incrementando el área de análisis, la ecuación mostrada a continuación muestra el método de cuantificación del valor promedio de la vecindad. [48]

$$\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^9 x}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$ : promedio que adquiere píxel central

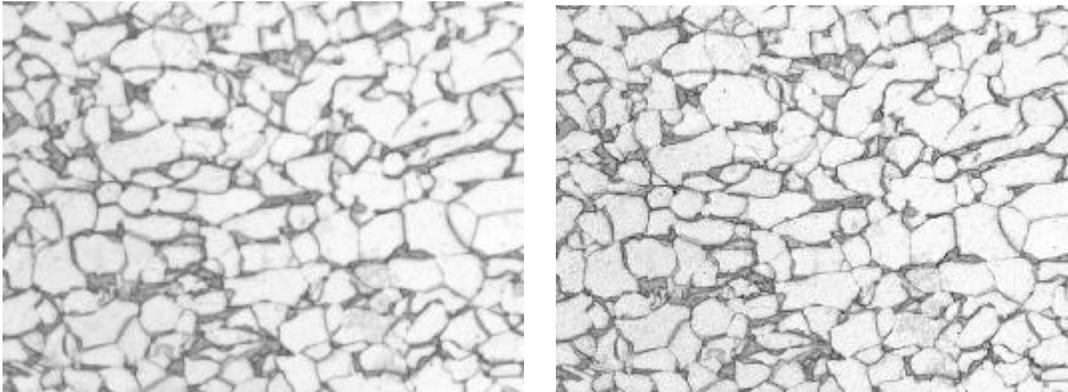
$\sum_{n=1}^9 x$ : sumatoria de los valores contenido en la vecindad del píxel central

$n$ : cantidad total de píxeles siendo un valor de 9

En la figura 42 se muestra un ejemplo de la aplicación del enmascaramiento sin enfoque:

## Figura 42.

### *Enmascaramiento sin enfoque*



(a)

(b)

*Nota.* (a) imagen original. (b) imagen filtrada por enmascaramiento sin enfoque donde se muestra el realce de bordes permitiendo definir la morfología de grano.

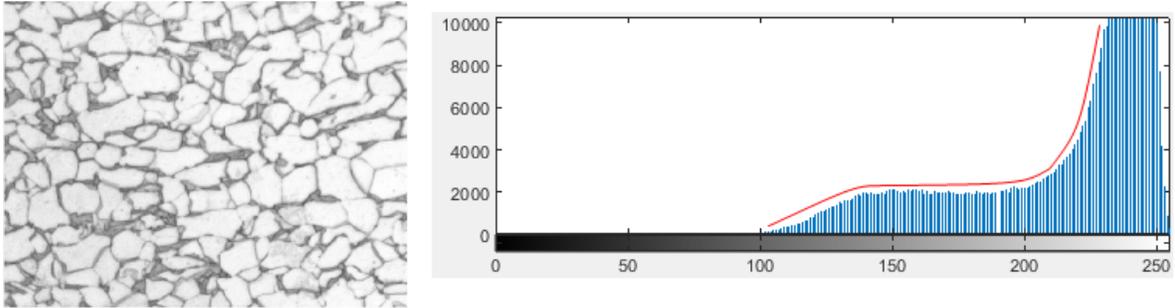
### ***2.4.3 Ecuación de histogramas adaptativos por contrastes (CLAHE)***

Es una técnica que manipula el contraste global para imágenes con píxeles confinados en rangos determinados del histograma, permitiendo obtener una distribución uniforme de este; la técnica es aplicable a distribuciones no uniformes con confinamiento hacia la izquierda o derecha para destacar las formas.

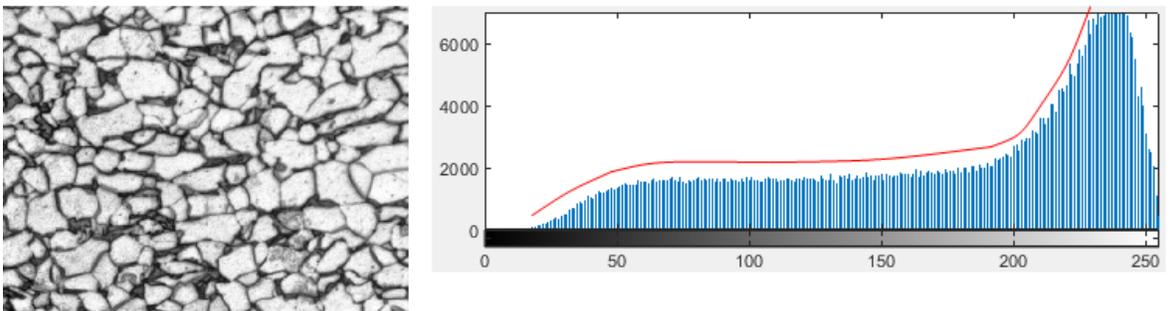
El método CLAHE se basa en la transformación de los valores del histograma en una función; siendo la derivada de la función del histograma proporcional al valor de la vecindad del píxel; con esta cuantificación del histograma, se realiza la modificación de la sección, considerando la derivada para homogeneizar la función del histograma global, la aplicación del filtro se muestra en la figura 43.

**Figura 43.**

*Ecualización de histogramas adaptativos por contrastes (CLAHE)*



(a)



(b)

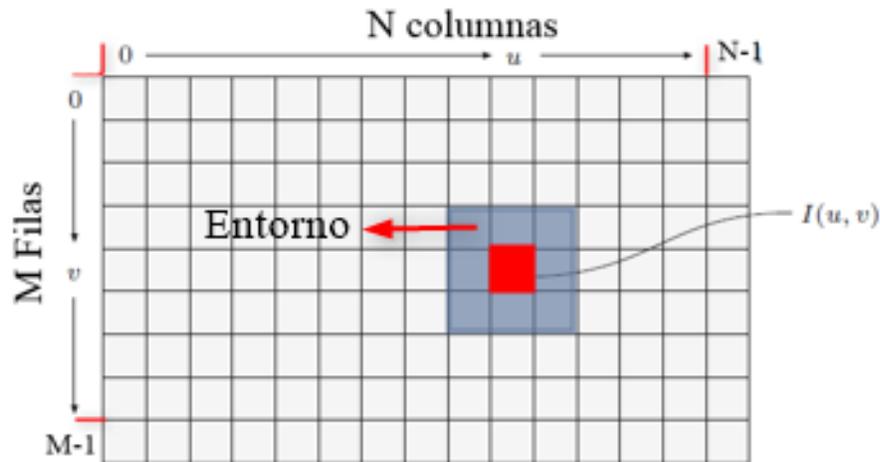
*Nota.* (a) imagen original, (b) aplicación del filtrado de ecualización de histogramas adaptativos por contrastes (CLAHE) donde la intensidad de píxeles de 100 a 200 se homogeniza mostrando nuevos valores en la escala de gris, permitiendo destacar la segunda fase y los bordes de grano; la homogeneización se evidencia en la curva que describe el histograma representada en color rojo.

#### **2.4.4 Filtros de eliminación de ruido lineales**

Son operaciones que se aplican a las matrices de representación de la imagen donde se usa la vecindad o el entorno de un píxel central para modificar este valor; en la figura 44 se muestra la definición del entorno para un píxel.

**Figura 44.**

*Entorno del píxel central*



*Nota.* “N” y “M” son el tamaño de imagen e  $I(u, v)$  las coordenadas de un píxel de la imagen siendo el entorno de ese píxel los píxeles conectados alrededor de  $I(u, v)$ . Tomado de: M. J. Burge y W. Burger, Digital Image Processing. pp. 10.

Los principales filtros de eliminación de ruido lineales son:

2.4.4.a Filtro de la media (Cajas 2D). Este tipo de filtrado permite reemplazar el valor de los diferentes píxeles de la imagen conteniendo el valor de la media de los valores de los píxeles del entorno de una matriz por lo general de 3x3. La ecuación mostrada a continuación muestra el método de cuantificación del valor promedio de la vecindad.

$$\bar{X} = \frac{\sum_{n=1}^8 x}{n}$$

Donde:

$\bar{X}$ : promedio que adquiere el píxel central

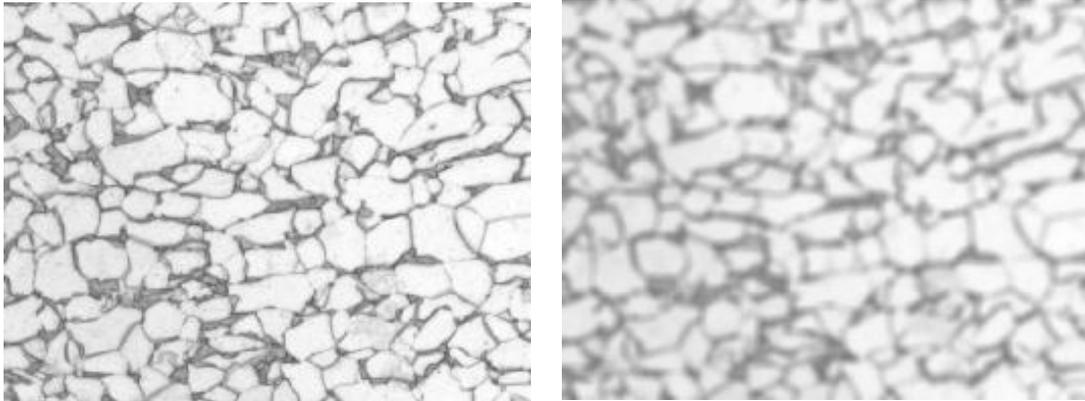
$\sum_{n=1}^8 x$ : sumatoria de los valores contenidos en la vecindad del píxel central

$n$ : cantidad total de píxeles siendo un valor de 8

En la figura 45 se muestra un ejemplo de la aplicación del filtro de la media:

## Figura 45.

### *Filtro de la media*



(a )

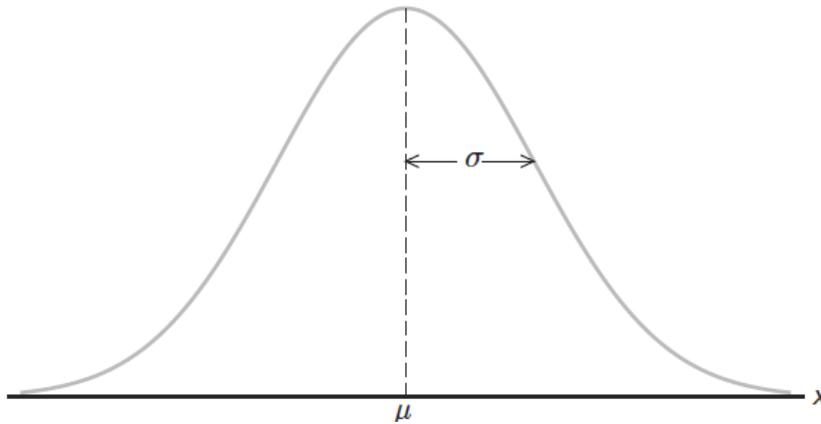
(b )

**Nota.** Aplicación del filtro de la media, donde el resultado de la filtración es un promedio de los valores de la vecindad, produciendo un desenfoco en la imagen por la homogeneización de datos donde el dato del píxel central no pertenece a algún valor dentro de la matriz por ser un promedio.

2.4.4.b Filtro Gaussiano. El filtro gaussiano muestra un valor máximo para el dato central de la matriz de aplicación, disminuyendo progresivamente hacia los extremos. A medida que aumenta el valor de desviación entre los datos, mayor será esta disminución adoptando un valor entre 0 y 1, el cual es transformado a dato entero; [49] en la figura 46 se muestra la campana de Gauss o gráfica de distribución normal

**Figura 46.**

*Distribución normal o Campana de Gauss*



**Nota.** La distribución de campana de Gauss permite generar un desenfoque similar a la media por la homogeneización de datos. Tomado de: Walpole. Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia. pp. 173.

Walpole define: “la ecuación matemática para la distribución de probabilidad de la variable normal depende de los dos parámetros  $\mu$  y  $\sigma$ , su media y su desviación estándar, respectivamente.”[50] motivo por el cual se emplea la función gaussiana para determinar esta distribución mostrada en la siguiente expresión:

$$n(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2\sigma^2}*(x-\mu)^2}, \text{ para } -\infty < x < \infty$$

Donde:

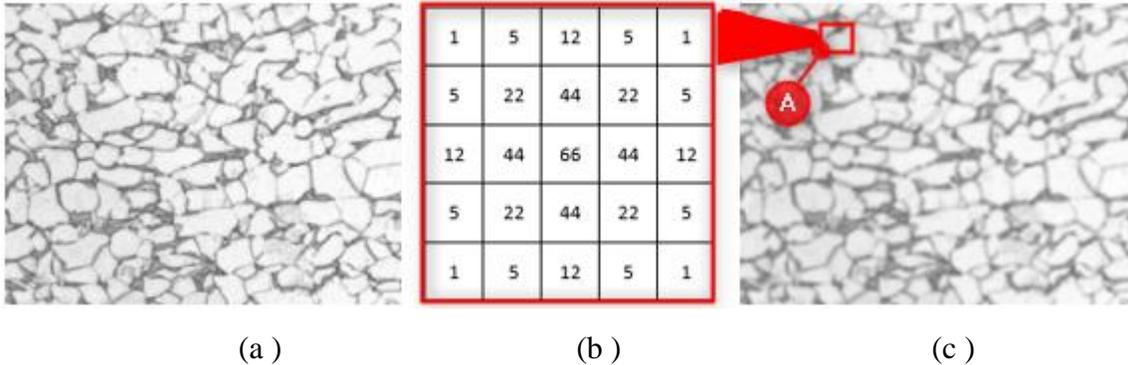
$\sigma$ : desviación estándar de la muestra

$\mu$ : media de la muestra

Al aplicar el filtro gaussiano se obtiene un desenfoque debido a la homogeneización de las texturas por la distribución normal donde la matriz de salida para el elemento se ejemplifica a continuación en la figura 47, se evidencia la distribución de datos normales sin importar la dirección de análisis y se muestra el resultado para la aplicación del filtro:

### Figura 47.

Aplicación del filtro gaussiano y matriz de distribución gaussiana



**Nota.** (a) imagen original; (b) ampliación del segmento (A); (c) imagen filtrada por medio del filtro gaussiano. La ampliación del segmento muestra que sin importar la dirección de análisis se mantiene la distribución normal de datos.

2.4.4.c Filtro de desviación estándar. El valor de cada píxel de salida del entorno definido como matriz  $n \times n$  es el valor de desviación estándar de los datos de la matriz representativa  $N \times M$ .

La desviación estándar es una de las medidas de dispersión más usada, la cual indica la dispersión de los datos con respecto a la media y se representa mediante la siguiente ecuación. [51]

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$S$ : desviación estándar de una muestra

$x_i$ : valor para analizar

$\bar{x}$ : valor de la media de los datos

$n$ : número de elementos a analizar

$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$ : sumatoria de los resultados desde  $i = 1$  hasta  $i = n$

2.4.4.d Filtro de la mediana. El valor de cada píxel de salida de la matriz nxn es el valor de la mediana en el entorno definido por el usuario, repetido tantas veces como se especifique.

El propósito de la mediana es mostrar la tendencia central de datos que no son afectados por los valores máximos y mínimos. [51] Se determina organizando los datos en forma ascendente y determinando el valor central de estos en el caso de ser datos impares; cuando los datos son pares se suman los dos valores centrales y se dividen entre dos.

2.4.4.e Filtro del rango local. El valor de cada píxel de salida de la matriz nxn es el valor del rango; el rango es la diferencia entre los valores máximos y mínimos de la muestra de datos, esto se muestra en la siguiente ecuación.

$$R = X_{m\acute{a}x} - X_{min}$$

Donde:

$R$ : rango

$X_{m\acute{a}x}$ : valor máximo de la distribución o muestra de datos

$X_{min}$ : valor mínimo de la distribución o muestra de datos

### **2.4.5 Filtros de eliminación de ruido no lineales**

Son operaciones que se aplican a las matrices de representación de la imagen donde se usa la vecindad o el entorno de un píxel central nxn para modificar este valor mediante combinaciones no lineales, reorganizando los elementos de la matriz o seleccionando elementos de representación NxM, los filtros lineales son:

2.4.5.a Filtro máximo. Este tipo de filtrado permite reemplazar el valor de los diferentes píxeles de la imagen; selecciona el mayor valor de la matriz representativa en la escala de gris para ser usado en el píxel central. [52]

Debido a que se emplea un valor máximo, el dato para cada píxel no es un dato estadístico calculado y es un valor real dentro de la matriz original. La representación de la selección del píxel según el filtro dentro de la matriz representativa se ejemplifica en la figura 48 y su resultado al aplicar el valor del filtro se ilustra en figura 49:

**Figura 48.**

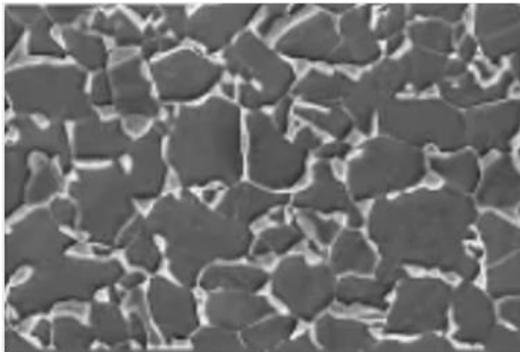
*Selección del dato máximo en una matriz 5x5*

1	3	5	87	4
5	22	12	45	5
12	44	66	44	12
5	88	44	90	5
35	5	32	5	87

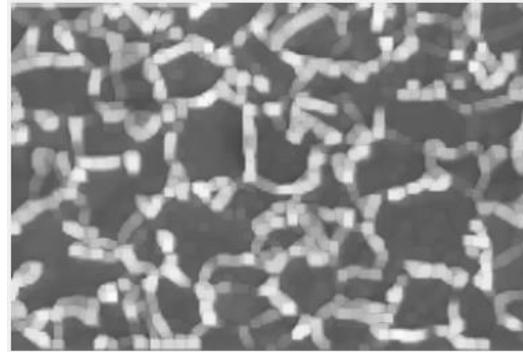
**Nota.** Selección del dato máximo en una matriz (5x5) con valor de 90, ubicado en la posición [4,4]. Este dato se reemplaza por el píxel central de valor 66 con posición [3,3], para la aplicación de la filtración.

**Figura 49.**

*Aplicación del filtro máximo*



(a)



(b)

**Nota.** (a ) Imagen original; (b ) Imagen filtrada por selección del dato máximo donde la tendencia de los datos es hacia el valor 255 (color blanco); esta tendencia permite resaltar la gama de intensidades cercanas al 255.

2.4.5.b Filtro mínimo. Este tipo de filtrado permite reemplazar el valor de los diferentes píxeles de la imagen; selecciona el menor valor de la matriz representativa en la escala de gris para ser usado en el píxel central.[52]

Debido a que se emplea un valor mínimo el dato para cada píxel no es un dato estadístico calculado y es un valor real dentro de la matriz original, La representación de la selección del píxel

según el filtro dentro de la matriz representativa se ejemplifica en la figura 50 y su resultado al aplicar el valor del filtro se ilustra en figura 51:

**Figura 50.**

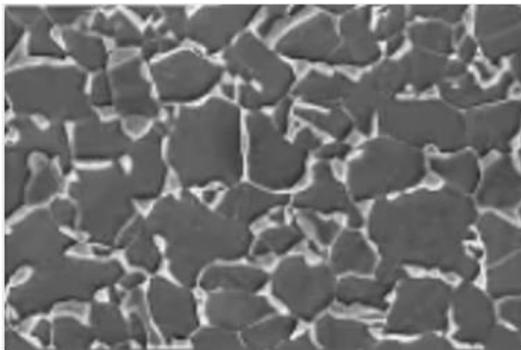
*Selección del dato mínimo en una matriz 5x5*

1	3	5	87	4
5	22	12	45	5
12	44	66	44	12
5	88	44	90	5
35	5	32	5	87

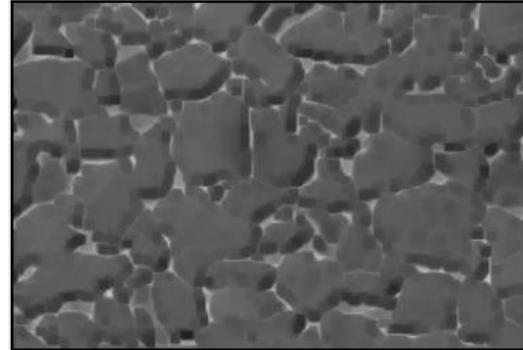
**Nota.** Selección del dato mínimo en una matriz (5x5) con valor de 1 ubicado en la posición [1,1]. Este dato se reemplaza por el píxel central de valor 66 con posición [3,3], para la aplicación de la filtración.

**Figura 51.**

Aplicación del filtro mínimo



(a)



(b)

**Nota.** (a ) Imagen original; (b ) Imagen filtrada por selección del dato mínimo donde la tendencia de los datos es hacia el valor 0 (color negro); esta tendencia permite resaltar la gama de intensidades cercanas a 0.

2.4.5.c Filtro mediano. Este tipo de filtrado permite reemplazar el valor de los diferentes píxeles de la imagen. Selecciona el valor mediano de la matriz representativa en la escala de gris para ser usado en el píxel central. [52]

Debido a que se emplea un valor mediano el dato para cada píxel no es un dato estadístico calculado y es un valor real dentro de la matriz original, La representación de la selección del píxel según el filtro dentro de la matriz representativa se ejemplifica en la figura 52 y su resultado al aplicar el valor del filtro se ilustra en figura 53:

**Figura 52.**

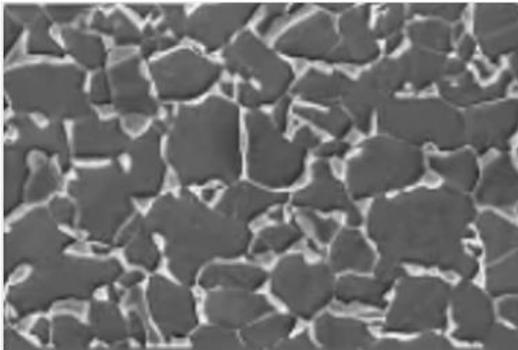
*Selección del dato mediano en una matriz 5x5*

1	3	5	87	4
5	22	12	45	5
12	44	66	44	12
5	88	44	90	5
35	5	32	5	87

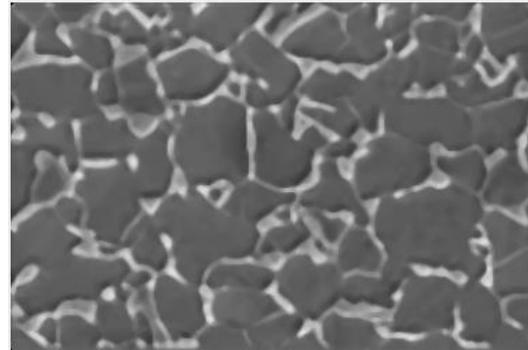
*Nota.* Selección del dato mediano en una matriz (5x5) con valor de 12 ubicado en la posición [2,3]. Este dato se reemplaza por el píxel central de valor 66 con posición [3,3], para la aplicación de la filtración.

**Figura 53.**

*Aplicación del filtro mínimo.*



(a)



(b)

*Nota.* (a) imagen original; (b) imagen filtrada por selección del dato mediano donde la tendencia de los datos es hacia el valor central de la distribución.

En conclusión, este conjunto de herramientas de filtración permite modificar la imagen permitiendo realzar, mejorar y detallar la morfología de grano; en aceros de doble fase, este mejoramiento de la imagen homogeniza las texturas, destaca los bordes de grano y la definición de las dos fases o constituyentes que al ser mejorada, se procede a segmentar con el objetivo de separar las fases a analizar, refinar los resultados y obtener las propiedades de interés para ser medidas o cuantificadas.

## **2.5 Segmentación**

La segmentación de imágenes digitales es un método para separar en diferentes regiones las reproducciones; este proceso de segmentación genera tres imágenes que dependen del sistema empleado; una de ellas es una visualización en blanco y negro, una imagen en plano de bits, y la respectiva representación del límite de características.[53],[43]. La segmentación brinda las herramientas para analizar microestructuralmente los materiales como en los procesos de deformación plástica [54] y las mediciones de propiedades estereológicas con las herramientas del análisis digital realizando representaciones mediante las mediciones especificadas en la norma ASTM-E112. [5], [55], [56].

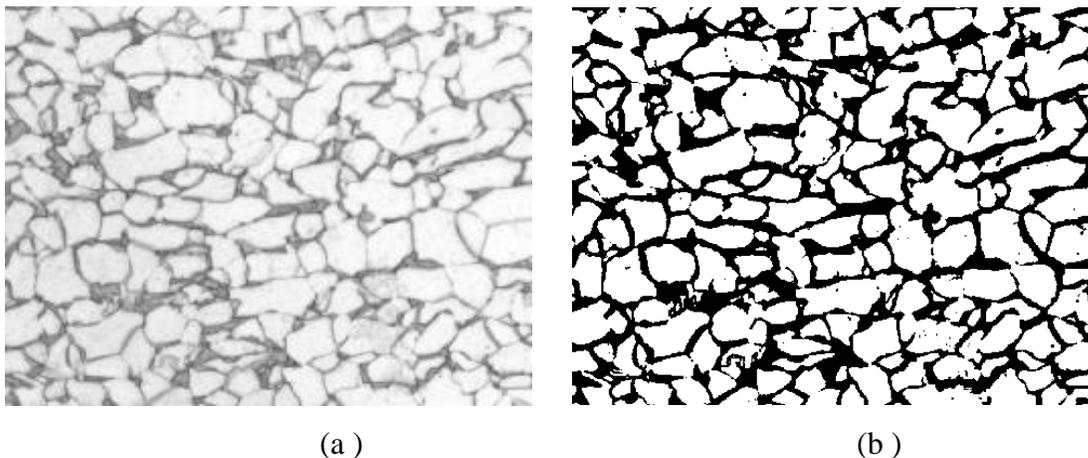
### **2.5.1 Binarización**

La binarización de reproducciones es la transformación de una imagen en escala de gris que posee un valor de intensidad definido de 0 a 255, para cada píxel en un valor lógico siendo 0 y 1 (blanco y negro respectivamente); este proceso elimina la gama de matices de gris siendo la umbralización y la sensibilidad de la aplicación del proceso lo que determina el valor que tomará cada valor de intensidad desde 0 a 255 para adquirir un valor de 0 o 1. [43]

En la figura 54 se muestra la aplicación de la binarización para un acero de doble fase.

## Figura 54.

### *Binarización de imágenes*



*Nota.* (a) imagen original; (b) imagen segmentada por el método de binarización, la tendencia de valores a 0 (valores oscuros) toman un valor lógico de 0 y la tendencia de valores a 255 (valores claros) toma un valor lógico de 1.

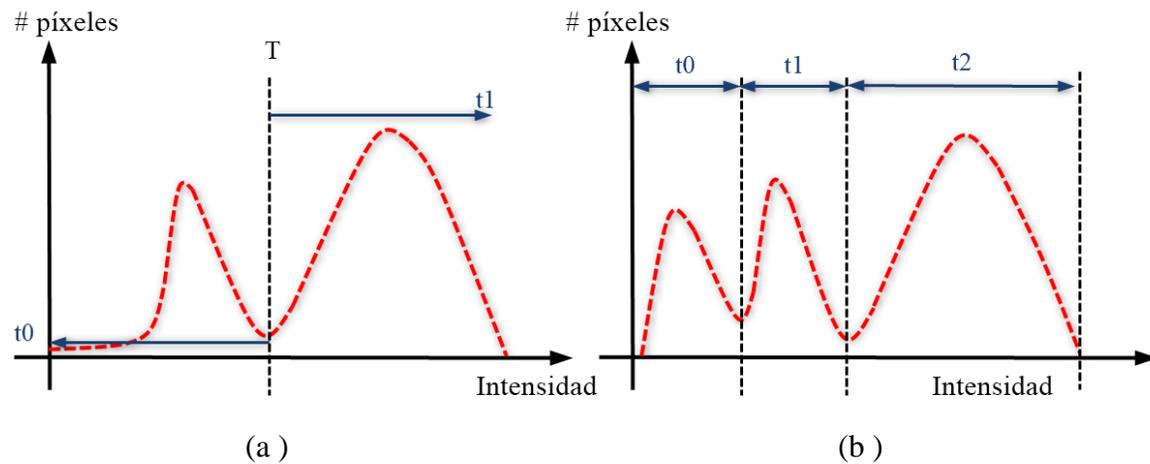
2.5.1.a Umbralización. Este método emplea el umbral de intensidad para determinar a qué valor se asociará un píxel en escala de gris; esta asociación definirá si el píxel adquiere un valor de 0 o 1, blanco o negro respectivamente. [46] Se distinguen diferentes métodos para determinar el umbral de binarización:

- Umbral global. Se aplica a toda la imagen útil para distribuciones homogéneas en intensidad e iluminación con histogramas bimodales o unimodales independientes al desplazamiento.
- Umbral local adaptativo. Aplicable a imágenes con histogramas no bimodales en los cuales los cambios de iluminación afectan la distribución del histograma; para generar el umbral se generan divisiones de la imagen que determinan el umbral por subconjuntos.

Los tipos de distribución de histogramas bimodales y no bimodales se ejemplifican en la figura 55.

**Figura 55.**

*Tipos de distribución de histogramas*



**Nota.** (a) Distribución bimodal; (b) Distribución no bimodal. De manera independiente a la tendencia de datos si es hacia 0 o 255, en un histograma bimodal se define el umbral considerando los valores  $t_0$  y  $t_1$  como extremos, donde la línea “T” divide la distribución de 0 y 1. En histogramas no bimodales la distribución se realiza por subconjuntos  $t_0$ ,  $t_1$  y  $t_2$ . Tomado de: N. Triana, A. Jaramillo, R. Gutiérrez, y C. Rodríguez. Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEMFoids. pp. 3.

Los métodos para calcular el umbral son:

- Promedio del valor máximo y mínimo.

$$U = \frac{X_{m\acute{a}x} + X_{m\acute{i}n}}{2}$$

Donde:

$U$  : umbral

$X_{m\acute{i}n}$ : valor mınimo del histograma

$X_{m\acute{a}x}$ : valor mımimo del histograma

- Diferencia entre valores mımimos y mımimos.

$$U = X_{m\acute{a}x} - X_{m\acute{i}n}$$

Donde:

$U$ : umbral

$X_{min}$ : valor mínimo del histograma

$X_{máx}$ : valor máximo del histograma

- Método de OTSU. El método de OTSU es empleado para histogramas bimodales realizando iteraciones para cada valor del histograma, seleccionando un umbral global, recorriendo los valores del histograma y escogiendo el valor que genera una menor varianza entre datos. [57] La varianza es una medida de dispersión que representa la variabilidad de un conjunto de datos o muestra de datos respecto a su media[51]; se representa mediante la siguiente expresión.

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

$S$ : desviación estándar de una muestra

$x_i$ : valor para analizar

$\bar{x}$ : valor de la media de los datos

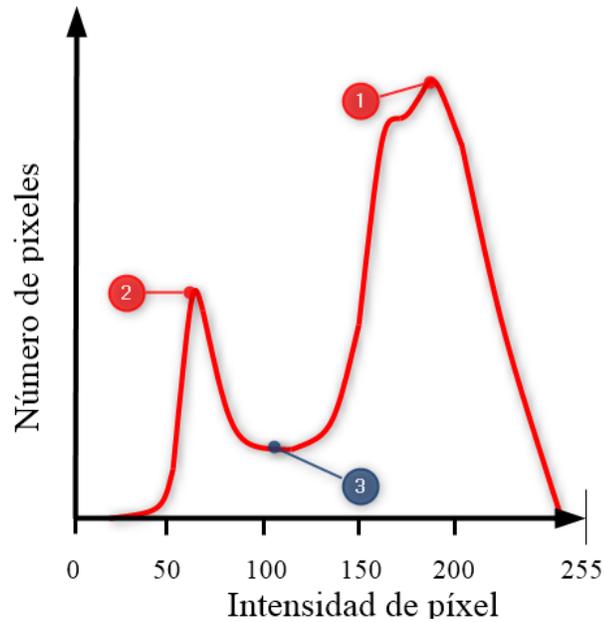
$n$ : número de elementos a analizar

$\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n - 1}$ : sumatoria de los resultados desde  $i = 1$  hasta  $i = n$

- Método de mínimo local: Se emplean funciones de suavizado para transformar la distribución no bimodal en bimodal para emplear el valor mínimo local entre los valores picos del histograma. El valor mínimo local se ejemplifica en la figura 56.

**Figura 56.**

*Histograma bimodal*

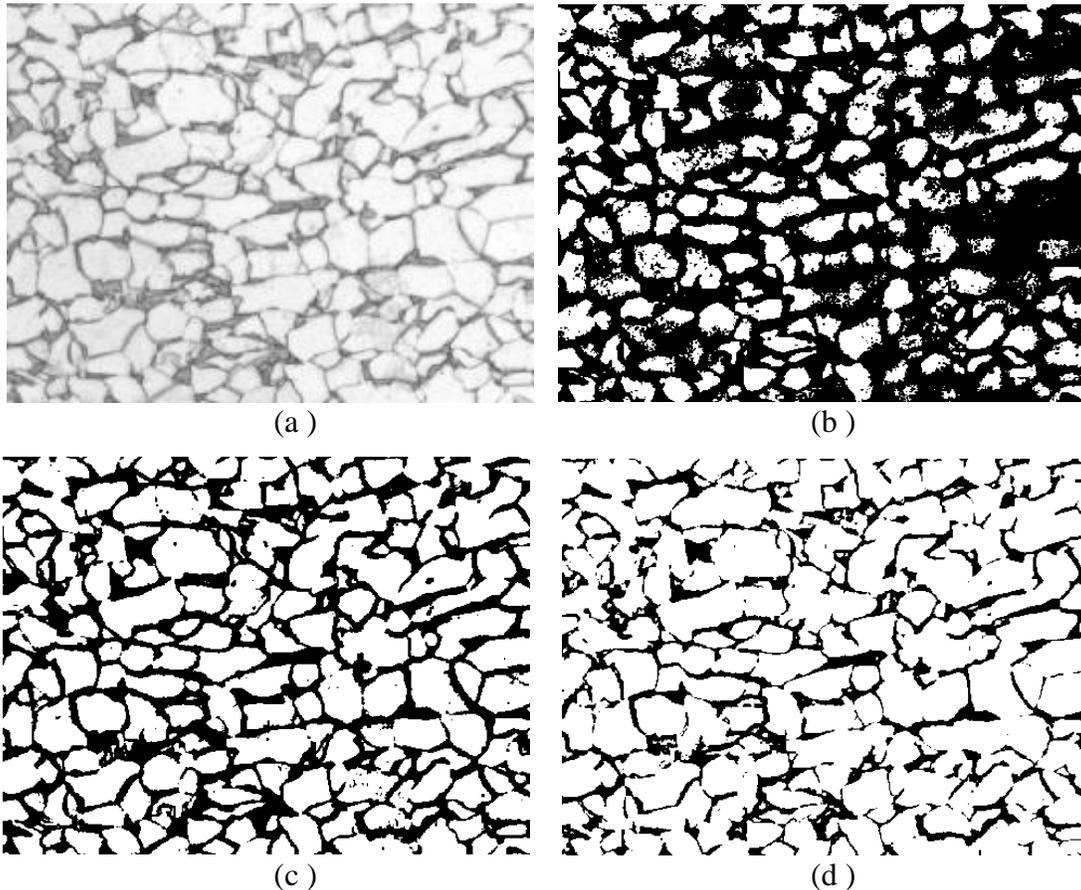


**Nota.** Histograma bimodal donde los puntos 1 y 2 corresponden a máximos locales y el punto 3 a un mínimo local, siendo este punto el valor de referencia para la binarización, donde el valor de intensidad 102 corresponde al valor del umbral. Tomado de: N. Triana, A. Jaramillo, R. Gutiérrez, y C. Rodríguez. Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEM-Foils. pp. 4.

Sensibilidad. La sensibilidad permite modular el nivel de binarización modificando el umbral, donde se aplica la segmentación en una escala del 0 a 1 o 0% a 100% empleando el método de OTSU, disminuye la varianza entre los píxeles blancos y negros, la manipulación de porcentaje de sensibilidad se muestra en la figura 57.

**Figura 57.**

*Aplicación de sensibilidad de la binarización*



*Nota.* (a) imagen original; (b) binarización al 50%; (c) binarización al 60% (d) binarización al 70%. La manipulación de la sensibilidad permite acentuar formas destacando los bordes de grano.

### **2.5.2 Clustering K-means**

Según la definición de Lorca: “es un método particional que intenta encontrar un número específico de grupos, los cuales están representados por sus centroides, aplicable a un grupo de objetos en un espacio continuo n-dimensional. Es uno de los algoritmos de Clustering más antiguos y ampliamente usados.”[58] Este método representa mediante iteraciones, regiones de interés segmentando la imagen por agrupaciones basadas en distancias entre centroides.

El método K-means consiste de dos partes; en la primera se realiza la identificación de centroides y en la segunda parte se correlaciona la ubicación de estos puntos con la referencia

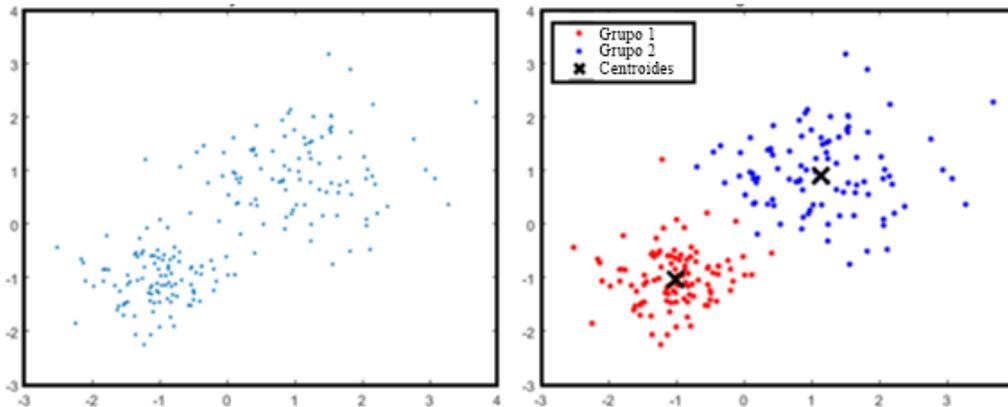
definida mediante la tendencia de los centroides a ocupar una región, la cual se marca con un punto de referencia; al definir los puntos de referencia se identifican los segmentos mediante la medición de la distancia euclidiana que define las regiones o agrupaciones que se asignan a los centroides detectados de la imagen;[59] esta agrupación se ejemplifica en la figura 58.

**Figura 58.**

*Agrupación K-means para una muestra aleatoria de puntos*

Distribución aleatoria de puntos

Asignación de grupos

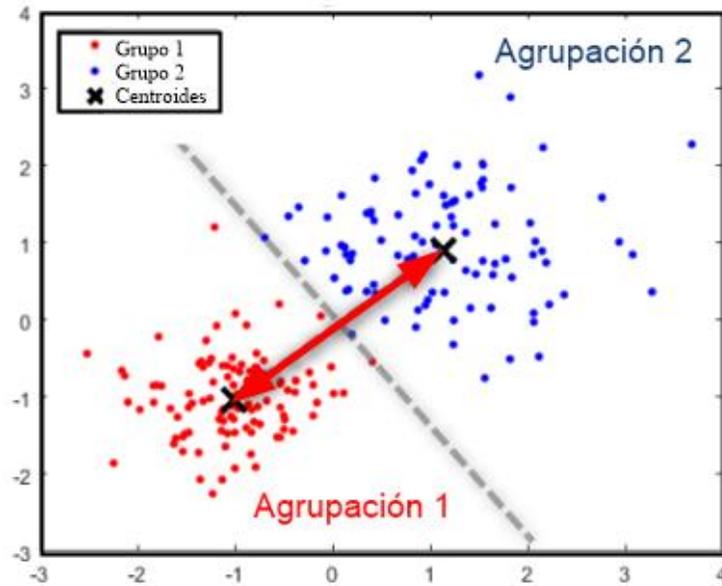


*Nota.* El método de agrupación K-means define los puntos aleatorios de una muestra identificando agrupaciones donde se define el centroide de las regiones o grupos siendo el grupo 1 (color rojo ) y grupo 2 (color azul) en la muestra de datos. Tomado de: <https://la.mathworks.com/help/stats/kmeans.html>

La distancia euclidiana que emplea el método K-means es la distancia ordinaria que existe entre dos puntos; mediante esta distancia se realiza la segmentación del espacio que contiene la muestra a analizar, para luego trazar una línea perpendicular en el centro de la línea que une los dos centroides de los grupos, esta segmentación se ejemplifica en la figura 59.

**Figura 59.**

*Agrupación K-means y distancia euclidiana*



*Nota.* La distancia euclidiana se mide a partir de los centroides, demarcada con una línea roja dentro de la figura. Tomado de:

<https://la.mathworks.com/help/stats/kmeans.html>

La ecuación que describe la medición de la distancia euclidiana aplicada a los centroides de la agrupación de datos de la figura 59, se muestra en la ecuación presentada a continuación [60]:

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(XP_2 - XP_1)^2 + (YP_2 - YP_1)^2}$$

Donde:

$d(P_1, P_2)$ : distancia entre un punto  $P_1$  y  $P_2$  (distancia euclidiana)

$XP_2$  : coordenada del eje x para el punto  $P_2$

$XP_1$ : coordenada del eje x para el punto  $P_1$

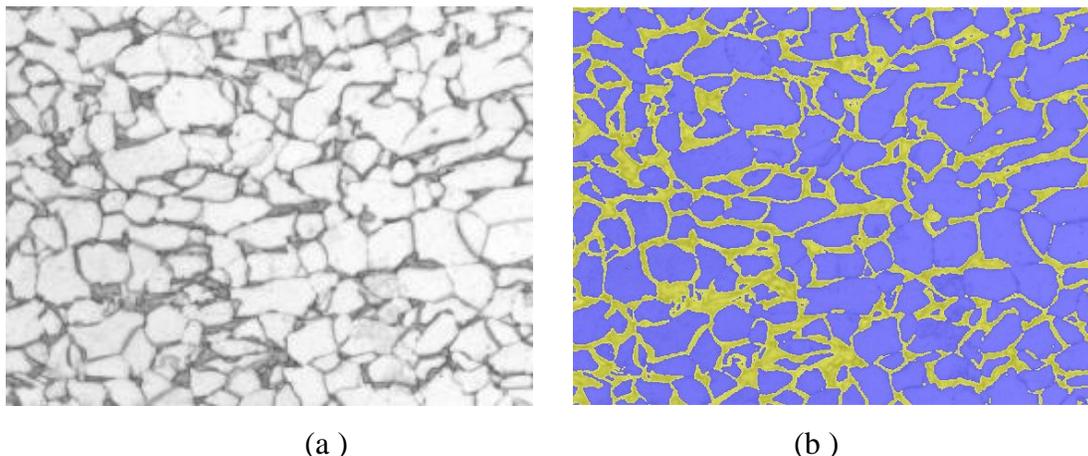
$YP_2$ : coordenada del eje y para el punto  $P_2$

$YP_1$ : coordenada del eje y para el punto  $P_1$

La aplicación del filtro se ejemplifica en la figura 60.

## Figura 60.

*Segmentación por el método clustering K-means*



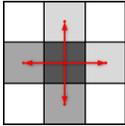
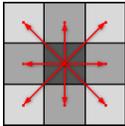
**Nota.** (a) imagen original. (b) Imagen segmentada por el método clustering K-means. El método clustering K-means permite crear una capa sobre la imagen original donde la sensibilidad del método permite identificar los bordes de grano y la segunda fase.

### 2.5.3 Segmentación por regiones

Permite segmentar la reproducción identificando los bordes de la imagen, de la misma forma crea una matriz de segmentación lógica que identifica los píxeles detectados dentro de un segmento; la determinación de segmentos se realiza mediante la conectividad de los píxeles donde la asignación considera los dos tipos de conectividad ilustrados en la tabla 3. [61]

**Tabla 3.**

*Conectividad por píxel para la detección de bordes por límites de segmentos*

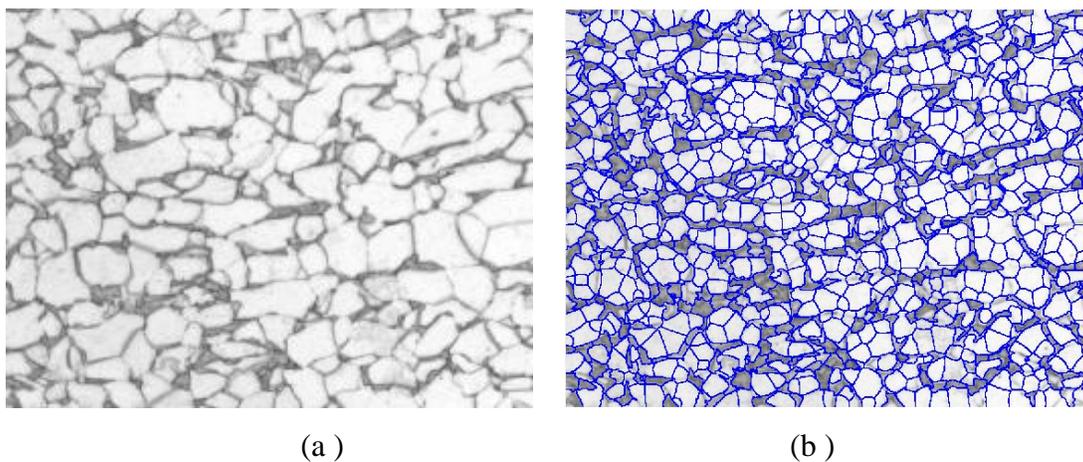
Tipo de conectividad	Descripción	Representación
4 píxeles conectados	Los píxeles se consideran parte de una sección al no estar conectadas sus esquinas considerando los píxeles adyacentes en las direcciones vertical y horizontal.	
8 píxeles conectados	Los píxeles se consideran parte de una sección al estar conectados sus bordes considerando los píxeles adyacentes en las direcciones vertical, diagonal y horizontal.	

**Nota.** La conectividad de 8 píxeles por ser un proceso iterativo que considera el doble de posiciones posee un costo computacional más alto frente a la conectividad de 4. Tomado de: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/boundarymask.html>

En la figura 61 se muestra el resultado después de la aplicación de la segmentación de regiones.

**Figura 61.**

*Segmentación por filtrado de segmentación por regiones*



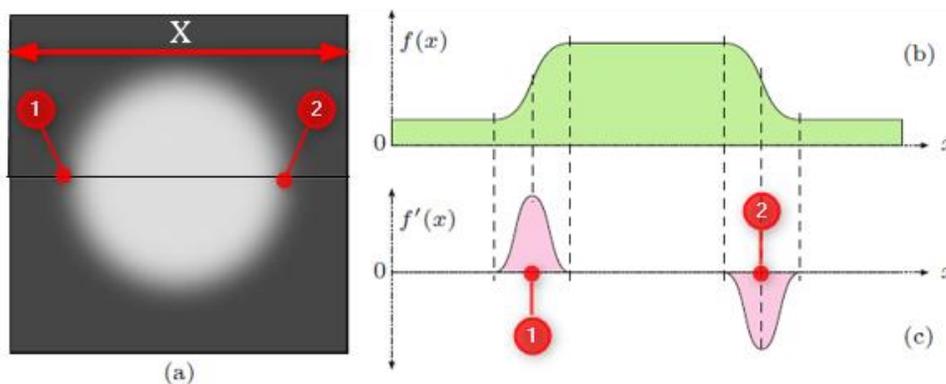
**Nota.** (a) imagen original. (b) Imagen segmentada mediante el filtro de segmentación por regiones. La segmentación por límite de regiones se ve afectada en gran medida por los píxeles de la vecindad donde la conectividad es un criterio muy sensible a cambios sutiles de intensidad entre elementos.

### 2.5.4 Filtros y operadores de detección de bordes

Los filtros de detección de bordes permiten detectar límites dentro de la reproducción a partir de una imagen en escala de gris; se emplean operadores para estimar aproximaciones discretas de la primera y segunda derivada de la imagen original. Para estimar los cambios de pendiente del histograma se usa el gradiente de las derivadas parciales de primer orden mostrado en la figura 62. [62]

**Figura 62.**

*Función y derivada de distribución del histograma*



**Nota.** (a) Imagen original; (b) histograma de la imagen,  $f(x)$  representa la intensidad de la escala de gris siendo 0 el color negro,  $x$  representa la distancia a lo largo de la línea “X”; (c) Derivada del histograma de la imagen,  $f'(x)$  representa el cambio de intensidad entre valores. Los puntos “1” Y “2” muestran el cambio entre el color gris y blanco siendo  $f'(x) \neq 0$ . Tomado de: W. Burger, M. Burger. Digital Image Processing. pp. 122.

El gradiente de la función de distribución del histograma se expresa en la ecuación mostrada a continuación.

$$\nabla I(u, v) = \begin{pmatrix} I_x(u, v) \\ I_y(u, v) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial I}{\partial x}(u, v) \\ \frac{\partial I}{\partial y}(u, v) \end{pmatrix}$$

Donde:

$\nabla I(u, v)$ : vector del gradiente de la función de histograma de la imagen

$\frac{\partial I}{\partial x}(u, v)$ : derivada parcial en el eje x de la función de histograma

$\frac{\partial I}{\partial y}(u, v)$ : derivada parcial en el eje y de la función de histograma

Los operadores para determinar el gradiente de la distribución del histograma más empleados son:

2.5.4.a Operador Prewitt. Emplea tres líneas y tres columnas que se extienden de forma adyacente sobre la imagen original, donde se emplea una matriz de representación denominada kernel o matriz de convolución (representación matricial de la imagen) que opera los elementos para generar una respuesta siendo las matrices de convolución mostradas a continuación las usadas por el operador Prewitt.[62]

$$H_x^P = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ; \quad H_y^P = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$H_x^P$ : matriz de convolución en dirección horizontal del segmento

$H_y^P$ : matriz de convolución en dirección vertical del segmento

Las matrices de convolución consideran los elementos alrededor de un píxel para estimar el gradiente local para la sección, usando aproximaciones del gradiente de distribución del histograma; el operador Prewitt usa la aproximación mostrada en la siguiente ecuación.

$$\nabla I(u, v) \approx \frac{1}{8} \cdot \begin{pmatrix} (I * H_x^P)(u, v) \\ (I * H_y^P)(u, v) \end{pmatrix}$$

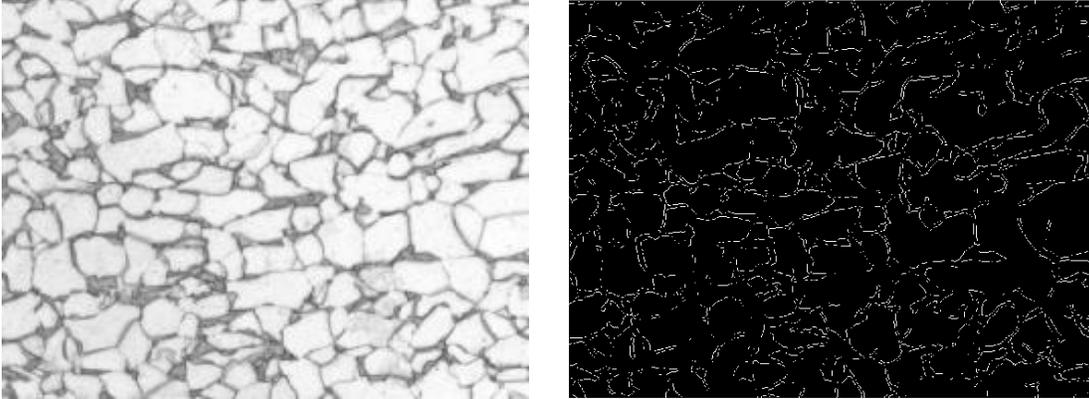
Donde:

$\nabla I(u, v)$ : vector del gradiente de la función de histograma del segmento

La figura 63 muestra la aplicación del operador Prewitt para la detección de bordes.

### Figura 63.

*Aplicación de la detección de bordes (operador Prewitt)*



(a)

(b)

**Nota.** (a) imagen original. (b) Detección de bordes usando el operador Prewitt. La representación de salida al usar el operador Prewitt es una imagen lógica donde los bordes son identificados con un valor 0 (color blanco).

2.5.4.b Operador Sobel. Emplea tres líneas y tres columnas que se extienden de forma adyacente sobre la imagen original, donde se emplea una matriz de representación denominada kernel o matriz de convolución (representación matricial de la imagen) que opera los elementos para generar una respuesta siendo las matrices de convolución mostradas a continuación las usadas por el operador Sobel. [62]

$$H_x^S = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ; \quad H_y^S = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$H_x^S$  : matriz de convolución en dirección horizontal del segmento

$H_y^S$  : matriz de convolución en dirección vertical del segmento

Las matrices de convolución consideran los elementos alrededor de un píxel para estimar el gradiente local para la sección, usando aproximaciones del gradiente de distribución del histograma; el operador Sobel usa la aproximación mostrada en la siguiente ecuación.

$$\nabla I(u, v) \approx \frac{1}{8} \cdot \begin{pmatrix} (I * H_x^S)(u, v) \\ (I * H_y^S)(u, v) \end{pmatrix}$$

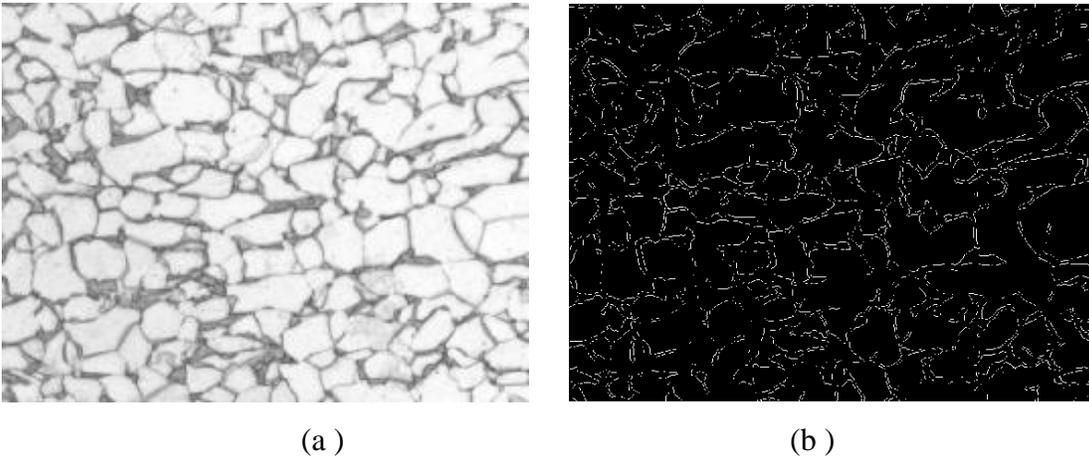
Donde:

$\nabla I(u, v)$  Corresponde al vector del gradiente de la función de histograma del segmento de la imagen.

La figura 64 muestra la aplicación del operador Sobel para la detección de bordes.

**Figura 64.**

*Aplicación de la detección de bordes (operador Sobel)*



**Nota.** (a) Imagen original. (b) Detección de bordes usando el operador Sobel. La representación de salida al usar este operador es una imagen lógica donde los bordes son identificados con un valor 0 (color blanco).

2.5.4.c Operador Roberts. Realiza la estimación del gradiente mediante una matriz de convolución de tamaño 2x2 donde se emplean las direcciones diagonales del píxel de interés usando dos matrices de convolución expresadas a continuación.[62]

$$H_1^R = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \quad ; \quad H_2^R = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Donde:

$H_1^R$ : matriz de convolución en dirección de la diagonal inferior del segmento de la imagen.

$H_2^R$ : matriz de convolución en dirección de la diagonal superior del segmento de la imagen.

Las matrices de convolución  $H_1^R$  y  $H_2^R$  son usadas para obtener el filtrado de la imagen y realzar los bordes usando las componentes del gradiente determinadas a partir de las siguientes expresiones:

$$D_1 = I * H_1^R \quad ; \quad D_2 = I * H_2^R$$

Donde:

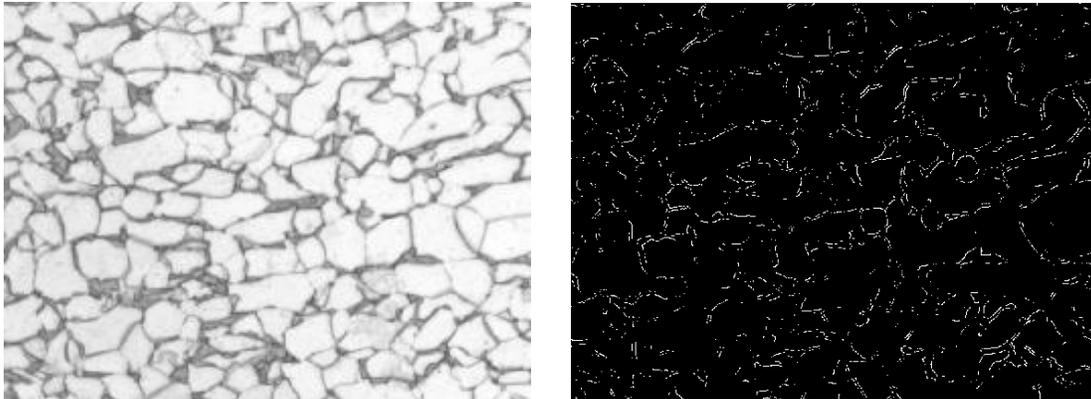
$D_1$ : dirección del gradiente de la función de distribución del histograma en la dirección inferior.

$D_2$ : dirección del gradiente de la función de distribución del histograma en la dirección superior.

La figura 65 muestra la aplicación del operador Roberts para la detección de bordes.

### Figura 65.

*Aplicación de la detección de bordes (operador Roberts)*



(a)

(b)

**Nota.** (a) Imagen original. (b) Detección de bordes usando el operador Roberts. La representación de salida al usar este operador es una imagen lógica donde los bordes son identificados con un valor 0 (color blanco).

2.5.4.d Algoritmo Canny. Realiza la cuantificación del gradiente mediante las derivadas parciales usando la siguiente expresión: [62]

$$G[f(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} f(x, y) \\ \frac{\partial}{\partial y} f(x, y) \end{bmatrix}$$

Donde:

$G[f(x, y)]$ : gradiente de la función de distribución del histograma

$\begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix}$ : componentes en dirección  $(x, y)$  escritas de forma matricial

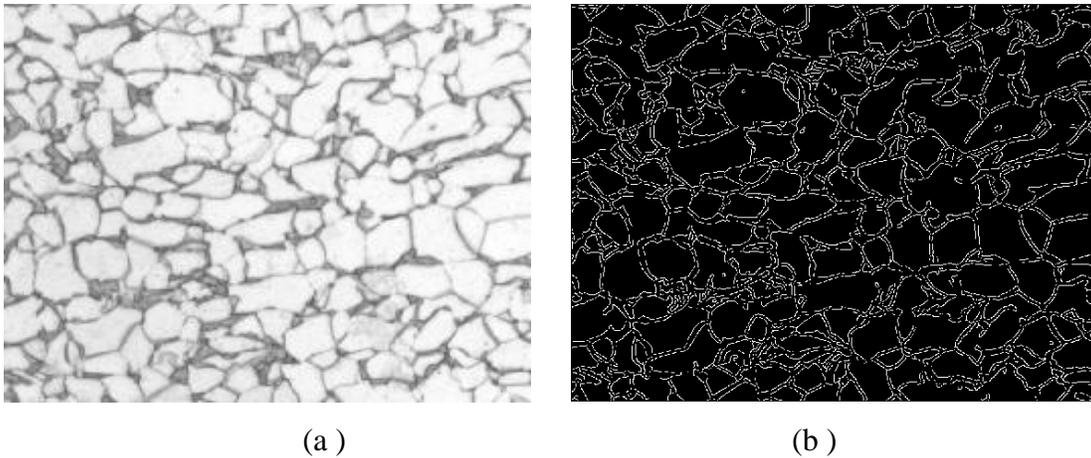
$\frac{\partial}{\partial x} f(x, y)$ : derivada parcial de la función del histograma en dirección "x"

$\frac{\partial}{\partial y} f(x, y)$ : derivada parcial de la función del histograma en dirección "y"

La figura 66 muestra la aplicación del algoritmo Canny para la detección de bordes.

**Figura 66.**

*Aplicación de la detección de bordes (algoritmo Canny)*



**Nota.** (a) Imagen original. (b) Detección de bordes usando el algoritmo Canny. La representación de salida al usar el algoritmo Canny es una imagen lógica donde los bordes son identificados con un valor 0 (color blanco). El algoritmo Canny no emplea aproximaciones del gradiente y por usar las derivadas en dos dimensiones " $G_x$ " , " $G_y$ " usa una cuantificación directa del gradiente por lo que el resultado es más eficiente.

2.5.4.e Filtro laplaciano. Realiza la homogeneización local de texturas sin modificar los bordes de la imagen, considerando la conectividad de elementos de la fase principal; usa la operación de detección de bordes con los valores de amplitud del histograma y el laplaciano de la función o gradiente que emplean las derivadas de la función de distribución de histograma para detectar los cambios de intensidad entre el entorno. [63]

La determinación del gradiente del filtro laplaciano se expresa a continuación.

$$\nabla^2 f = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$$

Donde:

$\nabla^2 f$ : gradiente del operador laplaciano de la función

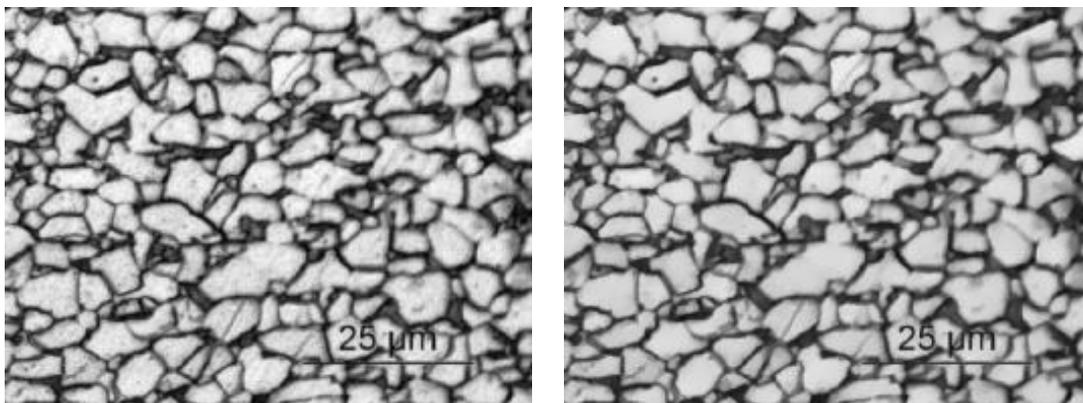
$\frac{\partial^2 f}{\partial x^2}$ : segunda deriva de la función de distribución de histograma en el eje  $x$

$\frac{\partial^2 f}{\partial y^2}$ : segunda deriva de la función de distribución de histograma en el eje  $y$

La aplicación del filtro laplaciano se muestra en la figura 67.

**Figura 67.**

*Aplicación del filtro mediano*



(a)

(b)

**Nota.** (a) imagen filtrada mediante el filtro mediano; (b) imagen filtrada mediante el filtro laplaciano. La aplicación del filtro homogeniza las texturas de la fase principal (color claro) manteniendo el realce de la segunda fase (color oscuro) y resalta los bordes de grano usando el gradiente u operador laplaciano.

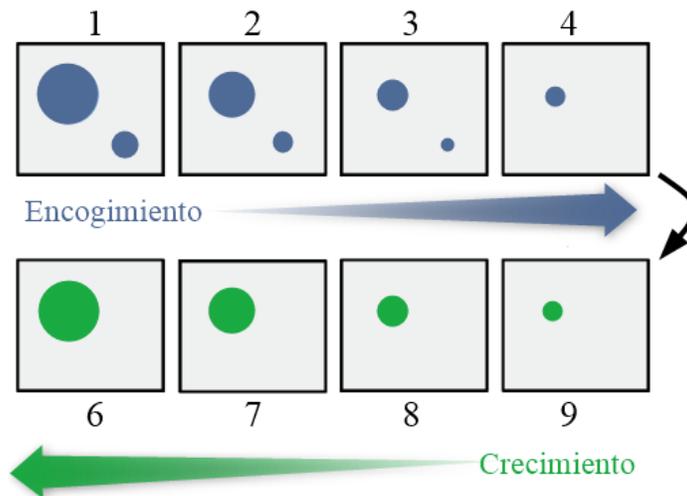
### 2.5.5 Operaciones morfológicas

«Es un amplio conjunto de operaciones de procesamiento de imágenes basadas en formas. *Morfología*. Las operaciones morfológicas aplican un elemento de estructuración a una imagen de entrada, creando una imagen de salida del mismo tamaño. En una operación morfológica, el valor de cada píxel de la imagen de salida se basa en una comparación del píxel correspondiente en la imagen de entrada con sus vecinos.»[64].

2.5.5.a Dilatación y erosión. Son operaciones que permiten modificar la morfología de la imagen dilatando o erosionando los elementos de la imagen binaria. Las operaciones se basan en producir un encogimiento (erosión) o crecimiento (dilatación) de los elementos de la imagen segmentada, este proceso se ejemplifica en la figura 68.[65]

**Figura 68.**

*Operaciones de encogimiento y crecimiento de formas de una imagen*



**Nota.** Las etapas 1, 2, 3 y 4 corresponden al encogimiento de la morfología (erosión) donde en la etapa 4 la forma circular de menor tamaño se elimina producto del encogimiento. Las etapas 6, 7, 8 y 9 corresponden al crecimiento de la morfología (dilatación). Tomado de: W. Burger, M. Burger, Digital Image Processing. pp. 182.

La dilatación de la morfologías se determina mediante la siguiente expresión:

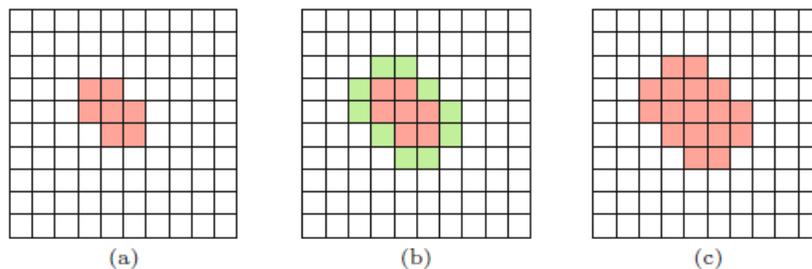
$$I \oplus H = \{(p + q) | \text{for all } p \in I, q \in H\}$$

Donde se define que el conjunto de puntos resultado de la operación de dilatación morfológica es la suma vectorial de los posibles pares de puntos coordinados pertenecientes a los conjuntos originales (todo  $p$  perteneciente al conjunto  $I$  y todo  $q$  perteneciente al conjunto  $H$ ).[65]

La figura 69. Muestra la operación morfológica de dilatación.

**Figura 69.**

*Dilatación morfológica dentro de una representación de píxeles*

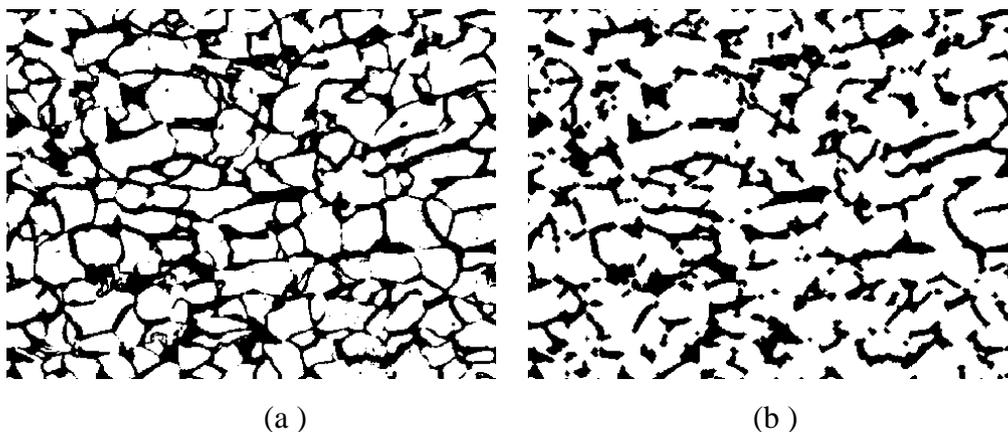


**Nota.** (a) Representación de un segmento de color rojo; (b) Representación de la operación de dilatación que procede a añadir la sección verde; (c) Resultado de la operación morfológica de dilatación Tomado de: W. Burger, M. Burger. Digital Image Processing. pp. 181.

La figura 70. Muestra la aplicación de la dilatación morfológica a partir de una imagen binaria.

**Figura 70.**

*Dilatación morfológica*



**Nota.** (a) Imagen original, segmentada por el método de binarización. (b) Dilatación de imagen donde los elementos blancos aumentan su tamaño.

La erosión de la morfologías se determina mediante la siguiente expresión:

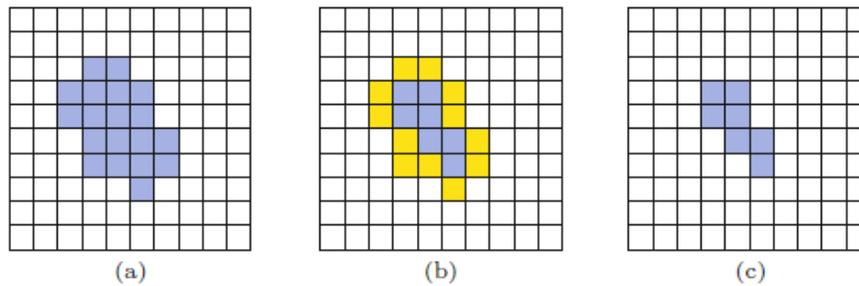
$$I \ominus H = \{(p \in \mathbb{Z}^2) | (p + q) \in I \text{ for all } q \in H\}$$

Donde se define que el conjunto de puntos resultado de la operación de erosión morfológica es un punto  $p$  si está contenido en el conjunto  $H$  y es subconjunto de  $I$ . [65]

La figura 71. Muestra la operación morfológica de erosión.

**Figura 71.**

*Erosión morfológica dentro de una representación de píxeles*

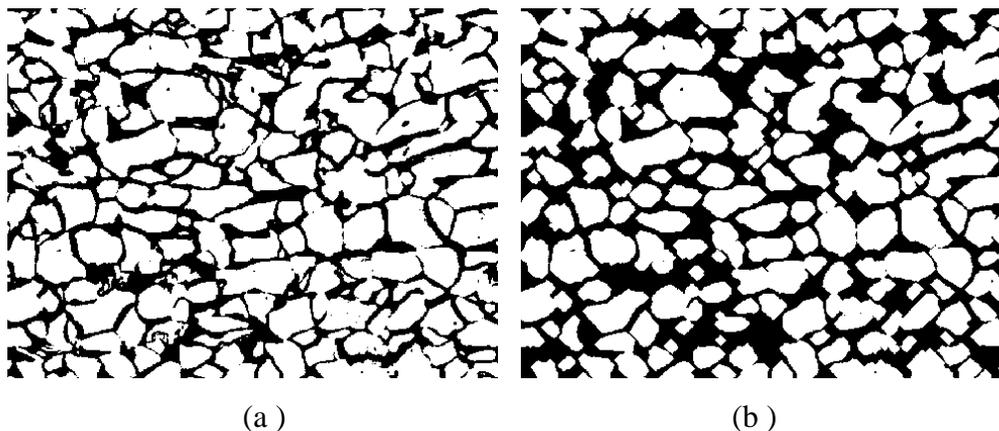


**Nota.** (a) Representación de un segmento de color azul; (b) Representación de la operación de erosión que procede a eliminar la sección amarilla; (c) Resultado de la operación morfológica de erosión. Tomado de: W. Burger, M. Burger. Digital Image Processing. pp. 181.

La figura 72. Muestra la aplicación de la erosión morfológica a partir de una imagen binaria.

**Figura 72.**

*Erosión morfológica*

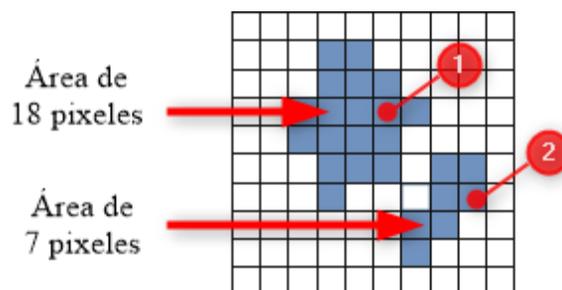


*Nota.* (a) Imagen original, segmentada por el método de binarización. (b) Erosión de imagen donde los elementos blancos reducen su tamaño.

2.5.5.b Eliminación de áreas. Este tipo de operación permite eliminar áreas de la imagen binaria. Para efectuar esta eliminación se cuantifica el área de cada segmento de la imagen el cual corresponde al número de píxeles que contiene un área específica. La figura 73 muestra el valor de área para dos elementos presentes en la imagen donde la representación se hace como la unión de píxeles.

**Figura 73.**

*Cuantificación de áreas en una imagen*



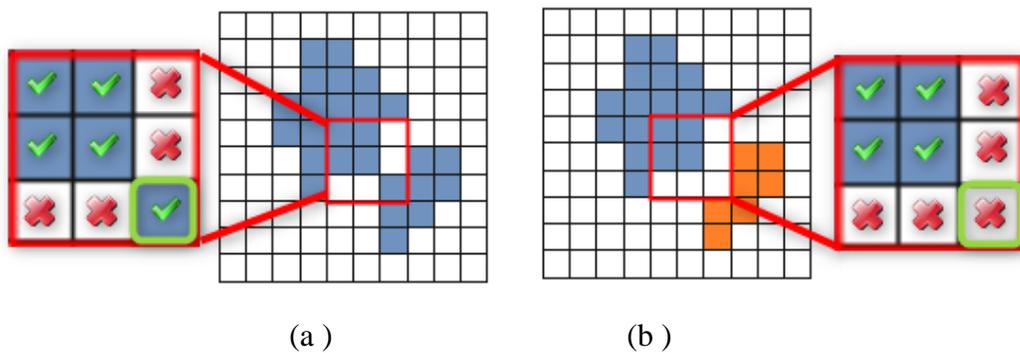
*Nota.* el elemento 1 posee un área equivalente a 18 píxeles siendo mayor al elemento 2 que posee un área menor de 7 píxeles contenidos en su morfología.

La eliminación de áreas se realiza empleando la conectividad del elemento, si la vecindad de un píxel posee su mismo valor, este forma parte del área definida.

La figura 74 muestra la definición de las áreas considerando la conectividad.

**Figura 74.**

*Definición del área de un segmento a partir de su conectividad*

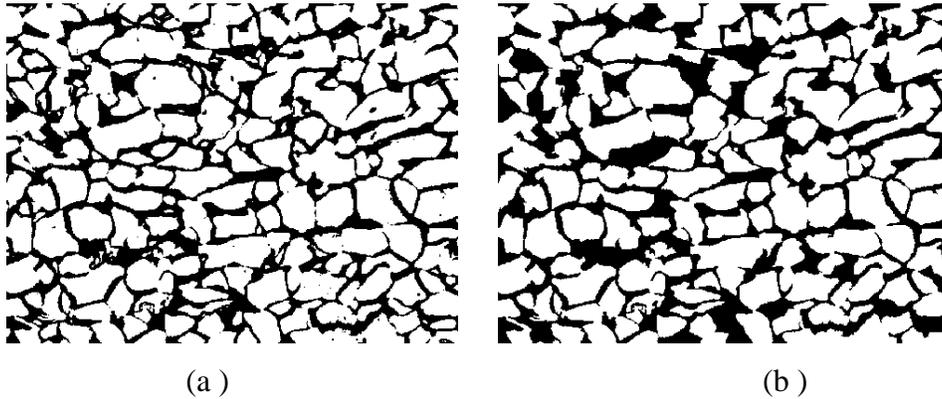


**Nota.** (a) Representación de un segmento de color azul con un valor de área de 26 píxeles contenidos, su conectividad debido a la presencia del píxel marcado con el recuadro verde que define un solo elemento para todo el conjunto azul; (b) Representación de un segmento de color azul con un valor de área de 18 píxeles contenidos, su conectividad debido a la falta del píxel marcado con el recuadro verde define dos elementos dentro del conjunto siendo el elemento naranja un segmento diferente de área de 7 píxeles.

La aplicación de la eliminación de áreas se muestra en la figura 75.

**Figura 75.**

*Eliminación de áreas*



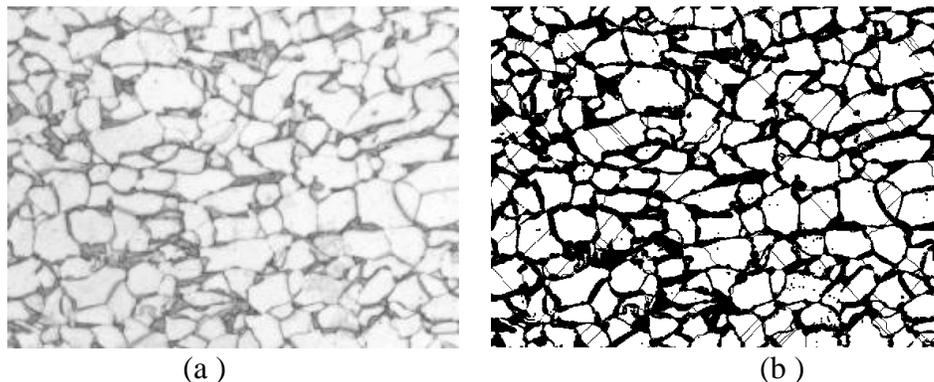
*Nota.* ( a ) Imagen original, segmentada por el método de binarización. ( b ) eliminación de áreas para segmentos blancos y negros dentro de la imagen. La eliminación de áreas elimina imperfecciones derivadas del proceso de binarización.

#### 2.5.5.c Transformación de cuenca hidrográfica

Este tipo de transformación realiza una división de la imagen trazando la superficie de unión de dos elementos juntos, empleando una transformación binaria donde se calcula menor la distancia de los objetos para determinar la línea de unión. La figura 76 muestra la aplicación de la transformación de cuenca hidrográfica

**Figura 76.**

*Transformación de cuenca hidrográfica*



*Nota.* ( a ) Imagen original ( b ) Transformación de cuenca hidrográfica donde se muestran segmentaciones en la imagen binaria producto de la línea definida por la menor distancia entre elementos negros de la ilustración.

En conclusión, las herramientas de segmentación permiten refinar la morfología derivada del proceso de filtración; se realiza una segmentación de fase para enfatizar los granos de las fases presentes, eliminar imperfecciones o discontinuidades derivadas de la filtración y enfatizar los bordes de grano de la muestra; este proceso define la morfología la cual debe ser medida para cuantificar y caracterizar sus propiedades.

## 2.6 Medición de datos

Para realizar el proceso de medición de los elementos de las microscopías se emplea las denominadas propiedades de regiones de imágenes, las cuales son mediciones de forma dentro de una matriz binaria; las propiedades que permiten detectar formas físicas se muestran en la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Principales propiedades de regiones*

Propiedad	Descripción	Representación
Área	Corresponde a la cantidad o número de píxeles que contiene el área de análisis.	
Diámetro equivalente	Corresponde a la medición del diámetro equivalente de un círculo tomando el área del segmento.	
Cajas contenedoras	Corresponde a la caja de menor tamaño que contiene las diferentes áreas de la imagen.	
Centroides	Corresponde a la identificación del centroide de las figuras representadas sobre sus respectivas áreas.	

**Nota.** Las propiedades de área, alto y ancho de las cajas contenedoras son mediciones en términos de píxeles por lo que no representan una unidad de longitud. Tomado de: <https://la.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>

El procesamiento digital de imágenes permite la manipulación de las imágenes para realzar formas, detectar, medir y caracterizar la morfología que en ella se ilustra, para tal fin, se usan herramientas de filtración que permiten mejorar el aspecto y detalle de la imagen, segmentación para etiquetar y caracterizar la morfología donde después de este proceso se realizan mediciones del plano bidimensional para obtener los datos de interés. Este procesamiento simplifica muchas de las labores realizadas en estereología que demanda tiempo y experiencia en este campo; además, suprime algunos errores cometidos durante las etapas de medición con un proceso automático que presenta mayor detalle y exactitud frente las mediciones manuales. [66]

### 3. DESARROLLO METODOLÓGICO

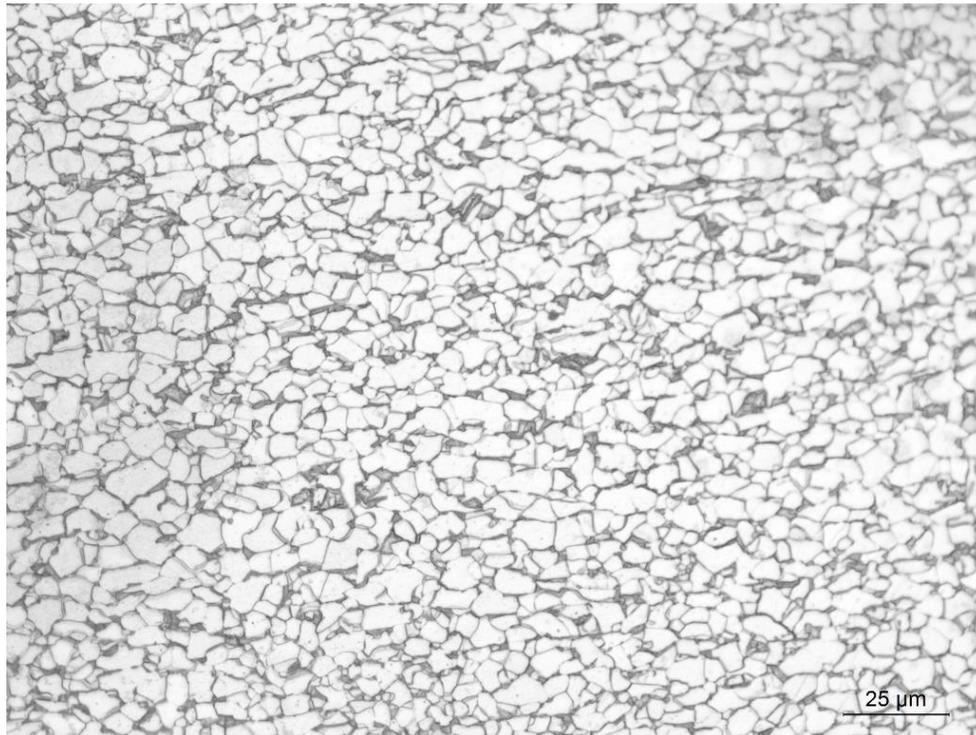
En este capítulo se muestra el procedimiento realizado, las diferentes herramientas seleccionadas para efectuar el procesamiento de las imágenes de manera digital, la selección de software que permita implementar estas herramientas, la selección de las muestras a analizar considerando morfología y distribución de fase junto a la implementación en el software escogido.

#### 3.1 Selección de la muestra a analizar

Para la selección de las muestras a analizar se emplea la información de las investigaciones realizadas por el ingeniero Diego Fernando Avendaño, donde se seleccionaron dos microscopías de aceros de doble fase; un acero de doble fase en estado de entrega, ilustrado en la figura 77 y un acero de doble fase tratado térmicamente donde se incrementa su volumen en fracción de martensita, ilustrado en la figura 78.

#### **Figura 77.**

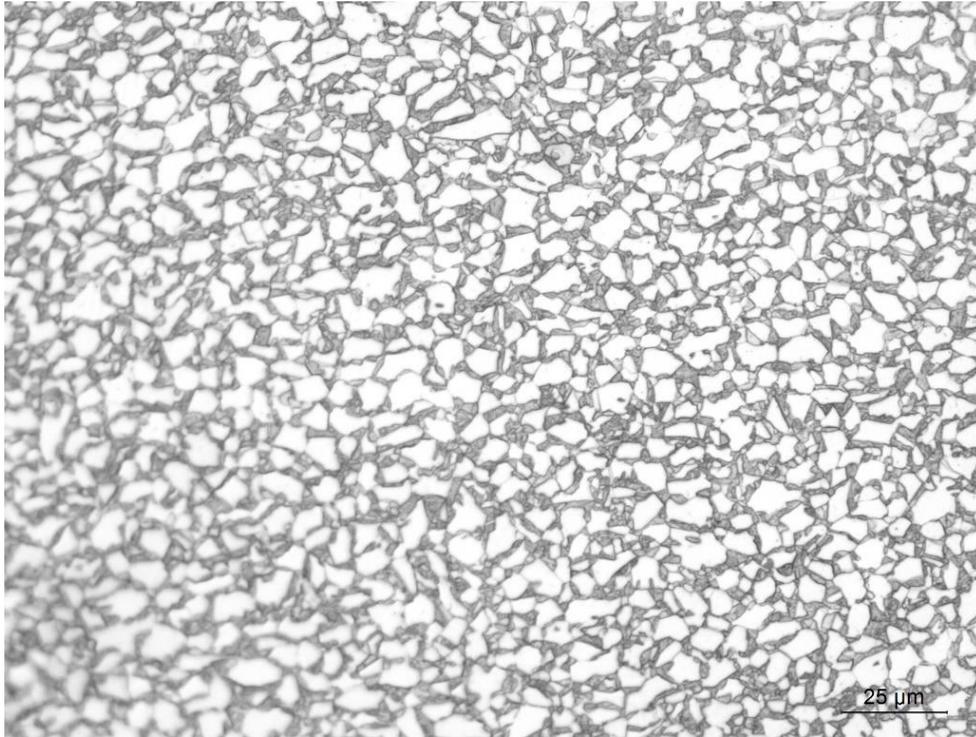
*Acero de doble fase en estado de entrega*



**Nota.** El acero en estado de entrega presenta bordes de grano con elevados niveles de detalle y una escala de 25 μm siendo la martensita la zona más oscura de la microscopía.

### **Figura 78.**

*Acero de doble fase tratado térmicamente*



*Nota.* El acero tratado térmicamente presenta bordes de grano con elevados niveles de detalle y una escala de 25  $\mu\text{m}$ , donde se evidencia el claro aumento del volumen en fracción de martensita que corresponde a las zonas más oscuras de la microscopía.

### **3.2 Selección del software**

Se realiza la búsqueda de los diferentes software que permitan el procesamiento digital de imágenes. Para la selección se elabora una matriz la cual evaluará las siguientes opciones y sus respectivos lenguajes de programación:

- Dev-C++ (Lenguaje de programación C++)
- PyDev (Lenguaje de programación Python)
- MATLAB® (Lenguaje de programación MATLAB®)
- VisualBasic (Lenguaje de programación VisualBasic)
- NetBeans (Lenguaje de programación Java)
- Atom (Lenguaje de programación Go)

Para realizar la calificación se emplea la siguiente tabla:

**Tabla 5.**

*Sistema de ponderación para la evaluación de selección de software*

<b>Calificación</b>	<b>Puntuación</b>
Deficiente / No	1
Insuficiente	2
Regular	3
Bueno	4
Excelente / Sí	5

*Nota.* Para los criterios donde las respuestas son “Sí” o “No” se usa la puntuación 5 o 1 respectivamente.

Para cuantificar la calificación total se emplea una peso de 0% a 100% para cada uno de los ítems a evaluar; mediante la calificación asignada según la tabla 5 se multiplica el peso respectivo por la calificación siendo la ponderación de 0 a 1 para cada uno de los ítems; la suma de las ponderaciones da el resultado general de la evaluación.

**Tabla 6.**

*Matriz de evaluación para la selección de la alternativa más pertinente a usar en el desarrollo de programa computacional*

Criterio de selección	Dev-C++ (C++)		PyDev (Python)		MATLAB® (MATLAB®)		VisualBasic (VisualBasic)		NetBeans (Java)		Atom (Go)		
	Peso	Calif.	Ponde.	Calif.	Ponde.	Calif.	Ponde.	Calif.	Ponde.	Calif.	Ponde.	Calif.	Ponde.
¿El estudiante cumple con los requerimientos del sistema para instalar el software?	12%	5	0.6	5	0.6	5	0.6	5	0.6	5	0.6	5	0.6
¿El software es de código abierto o posee alguna versión de código abierto que permita aplicar el programa desarrollado?	15%	5	0.75	5	0.75	3	0.45	5	0.75	5	0.75	5	0.75
¿El software posee todas las funciones integradas siendo de fácil manipulación e instalación?	12%	2	0.24	2	0.24	5	0.6	2	0.24	2	0.24	3	0.36
¿El software posee las herramientas del procesamiento digital de imágenes investigadas?	15%	4	0.6	5	0.75	5	0.75	4	0.6	4	0.6	3	0.45
¿El software cuenta con soporte de las funciones ya desarrolladas?	8%	3	0.24	3	0.24	5	0.4	4	0.32	3	0.24	4	0.32
¿El software cuenta con módulos para la creación de una interfaz de usuario?	10%	5	0.5	5	0.5	5	0.5	5	0.5	5	0.5	5	0.5
¿La comunidad que maneja el lenguaje de programación es extensa?	8%	5	0.4	5	0.4	5	0.4	4	0.32	5	0.4	2	0.16
¿El estudiante tiene dominio del lenguaje de programación que posee el software?	20%	2	0.4	2	0.4	4	0.8	2	0.4	1	0.2	1	0.2
<b>Total</b>	<b>100%</b>		<b>3.73</b>		<b>3.88</b>		<b>4.5</b>		<b>3.73</b>		<b>3.53</b>		<b>3.34</b>

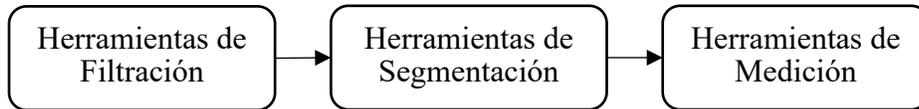
*Nota.* El software escogido es MATLAB® para la implementación del programa computacional. “Calif.” Es la calificación asignada al criterio de selección, “Ponde.” la respectiva multiplicación de la calificación y su peso correspondiente.

### 3.3 Selección de las herramientas del procesamiento digital de imágenes

Para la selección de las herramientas del procesamiento de imágenes del software escogido (MATLAB®) se distinguen 3 partes del proceso mostradas en la figura 79.

**Figura 79.**

*Etapas del proceso para la selección de herramientas*



**Nota.** Las herramientas de filtración corresponden al mejoramiento de las características de la imagen original como iluminación, intensidad, brillo y contraste; las herramientas de segmentación corresponden a la metodología para diferenciar las fases y la morfología de grano; las herramientas de medición corresponden a la determinación de propiedades estereológicas.

#### 3.3.1 Herramientas de filtración

La etapa de filtración comprende a las herramientas de eliminación de ruido y manipulación de contrastes, brillo e intensidad, las cuales permiten suavizar y resaltar formas de la imagen original, de tales herramientas se seleccionaron:

- Filtro de enmascaramiento sin enfoque: permite resaltar bordes en la imagen original.
- Ecuador de histograma adaptativo por contrastes (CLAHE): crea una capa donde los elementos oscuros poseen un contraste elevado.
- Filtrado gaussiano: permite suavizar la morfología eliminando el ruido.
- Filtrado de la mediana: permite suavizar la morfología eliminando el ruido.
- Filtrado mínimo: permite suavizar la morfología eliminando el ruido enfatizando los elementos oscuros de la imagen original.
- Filtrado máximo: permite suavizar la morfología eliminando el ruido enfatizando los elementos claros de la imagen original.
- Filtrado laplaciano: permite suavizar la morfología eliminando el ruido enfatizando los elementos claros sin modificaciones en el contraste de la morfología de elementos oscuros.

### 3.3.2 Segmentación

La etapa de segmentación permite realizar la separación de las diferentes fases, realizar cambios de forma, eliminar segmentos y mejorar el realce de elementos producto de la filtración, de dichas herramientas se seleccionaron:

- Segmentación por binarización: permite segmentar la imagen como una matriz lógica donde es posible aplicar operaciones en la morfología, medición de regiones y refinamientos de la microestructura.
- Umbralización por el método de OTSU: se emplea para determinar el umbral y efectuar la binarización; por ser un método iterativo que permite modular la sensibilidad, define la morfología según las características visuales de esta.
- Segmentación *clustering K-means*: permite segmentar la imagen siendo una herramienta visual para la detección de fases y morfología de grano.
- Operación de eliminación de áreas: permite refinar la morfología eliminando impurezas y discontinuidades derivadas de la filtración de la imagen digital o de la preparación de la muestra durante la obtención de imagen mediante microscopía óptica.
- Operación morfológica de erosión: permite modificar la morfología refinando las formas donde se realiza una reducción de su tamaño, eliminando impurezas y definiendo los bordes de grano.
- Operación morfológica de dilatación: permite modificar la morfología refinando las formas donde se realiza un aumento de su tamaño, ideal para segmentar la segunda fase independizando los granos del segundo constituyente.

### 3.3.3 Medición

La etapa de medición comprende las herramientas y procesos que permiten identificar las propiedades de la imagen tales como el área, los centroides, la detección de bordes y las operaciones de manipulación de imagen para obtener los valores deseados, de las cuales se seleccionaron:

- Medición de propiedad de área de la imagen: permite medir el área de los elementos de la imagen como un dato de cantidad de píxeles.
- Medición de propiedad de diámetro equivalente de la imagen: permite medir el diámetro de la morfología de grano a partir del área y la medición del diámetro de una circunferencia.

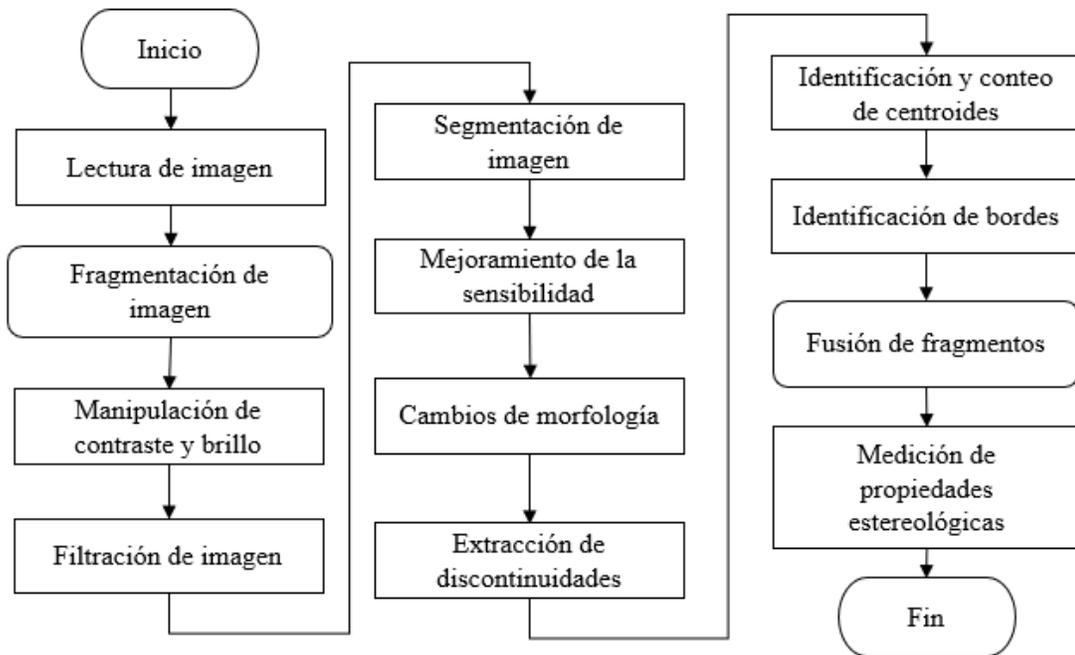
- Medición de centroides de la imagen: permite detectar el centroide de los elementos correspondientes a los granos, cuantificando la cantidad de granos dentro de la imagen.

### 3.4 Implementación

El proceso de implementación comprende las etapas del diagrama de flujo de la figura 80:

**Figura 80.**

*Etapas de la implementación de las herramientas del procesamiento digital de imágenes*

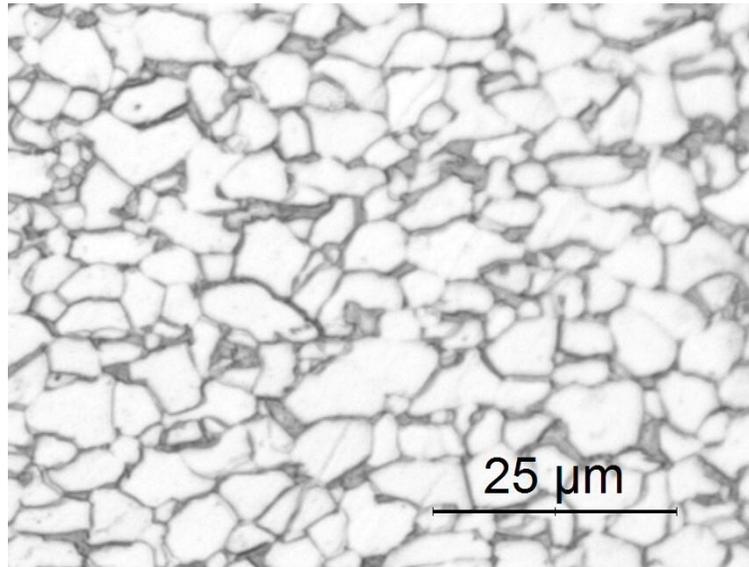


**Nota.** Cada etapa del diagrama posee un subproceso donde la eficiencia de las operaciones se evalúa mediante elementos de decisión. Los procesos de fragmentación de imagen y fusión de imagen son etapas alternativas que permiten tratar cada imagen de forma especializada como fragmentos independientes.

El proceso de implementación se realiza empleando la figura 81 como ejemplo.

### Figura 81.

*Fragmento del acero de doble fase en estado de entrega*



*Nota.* El fragmento corresponde a la parte inferior derecha de la imagen original ya que donde se ubica la escala del acero de doble fase en estado de entrega.

#### 3.4.1 Lectura de imágenes.

El proceso de lectura de imagen comprende la lectura de archivos y la determinación del tipo de imagen. Se emplean las funciones de lectura de imagen del *toolbox* de procesamiento digital de imágenes del software MATLAB® para realizar la lectura de la imagen y el almacenamiento de manera matricial de los valores de intensidad. Se determina el tipo de imagen siendo RGB, escala de gris o lógica, donde la imagen es almacenada en una matriz del tamaño  $N \times M$  que contiene cada píxel con un valor de intensidad para imágenes RGB, lógicas y en escala de gris. Los tamaños matriciales para imágenes RGB se especifican vectorialmente con tres valores por píxel para representar la intensidad de color [*rojo, verde, azul*] empleando la nomenclatura:

$$I = [i, j, k]$$

Donde:

I: matriz de la imagen original

*i*: intensidad del color rojo

$j$ : intensidad del color verde

$k$ : intensidad del color azul

Las matrices de representación de imágenes lógicas y en escala de gris no poseen este componente vectorial siendo un único valor el que representa la intensidad por píxel.

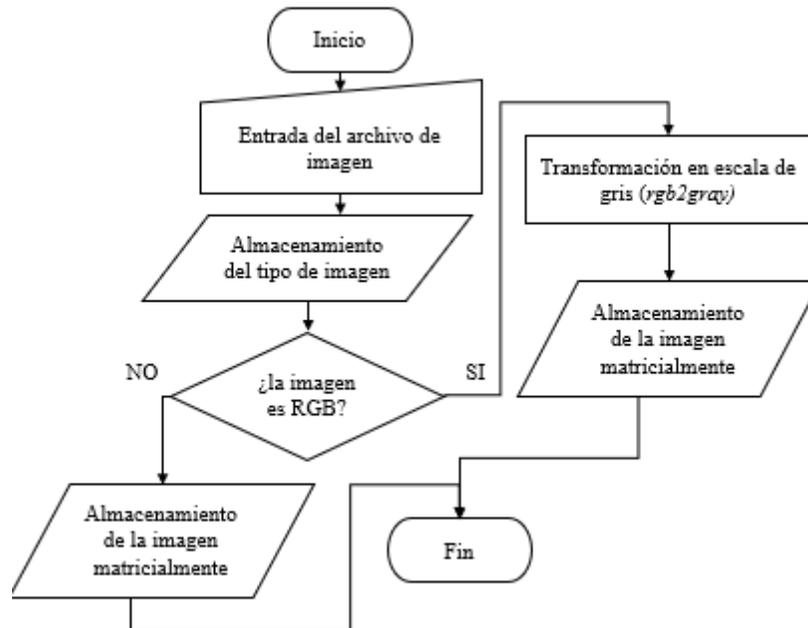
Dependiendo del tipo de imagen se realiza un proceso durante la lectura y almacenamiento:

- Para imágenes RGB se distingue el valor de tamaño matricial de 3, (componente de intensidad rojo, verde y azul) para lo que se efectúa una transformación del tipo de imagen a escala de gris mediante la función *rgb2gray* [67]; esta función permite agrupar las componentes vectoriales de cada intensidad de color y transformar en imagen de tipo escala de gris que poseen intensidades entre blanco y negro.
- Para imágenes en escala de gris y para imágenes lógicas no se realiza esta transformación ya que el punto de partida de las filtraciones son este tipo de reproducciones.

El proceso de manipulación del tipo de imagen se ilustra en el diagrama de flujo en la figura 82.

**Figura 82.**

*Diagrama de flujo del proceso de lectura de imagen*



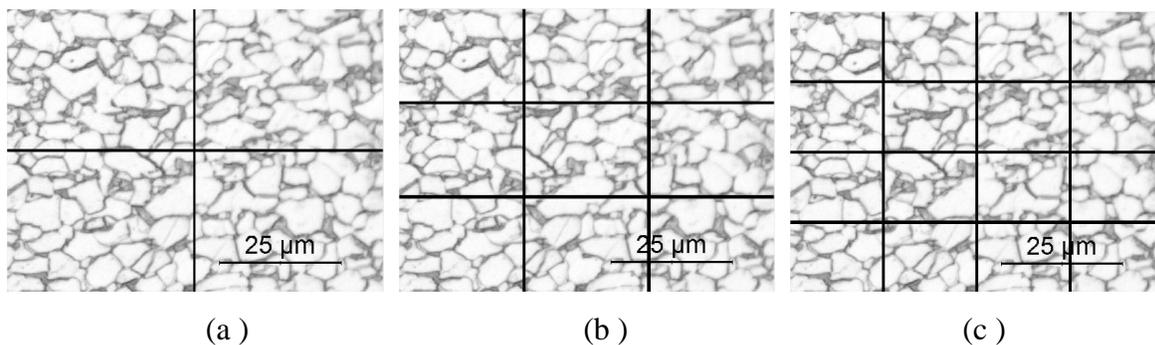
**Nota.** Para determinar el tipo de imagen se usa el tamaño matricial donde las imágenes son de tipo RGB si el tamaño dimensional es 3 y binario o en escala de gris si el tamaño dimensional es 1.

### **3.4.2 Fragmentación de imagen**

La fragmentación de imagen se basa en la partición y almacenamiento de una imagen en fragmentos que permitan ser manipulados durante el procesamiento digital de imágenes para personalizar las filtraciones por segmentos de una misma imagen. Después de ser cargada la imagen al programa, se procede a fragmentar la imagen en partes donde se realiza una partición de cuatro, nueve o dieciséis segmentos ejemplificados en la figura 83.

### Figura 83.

#### *Fragmentación de imagen*



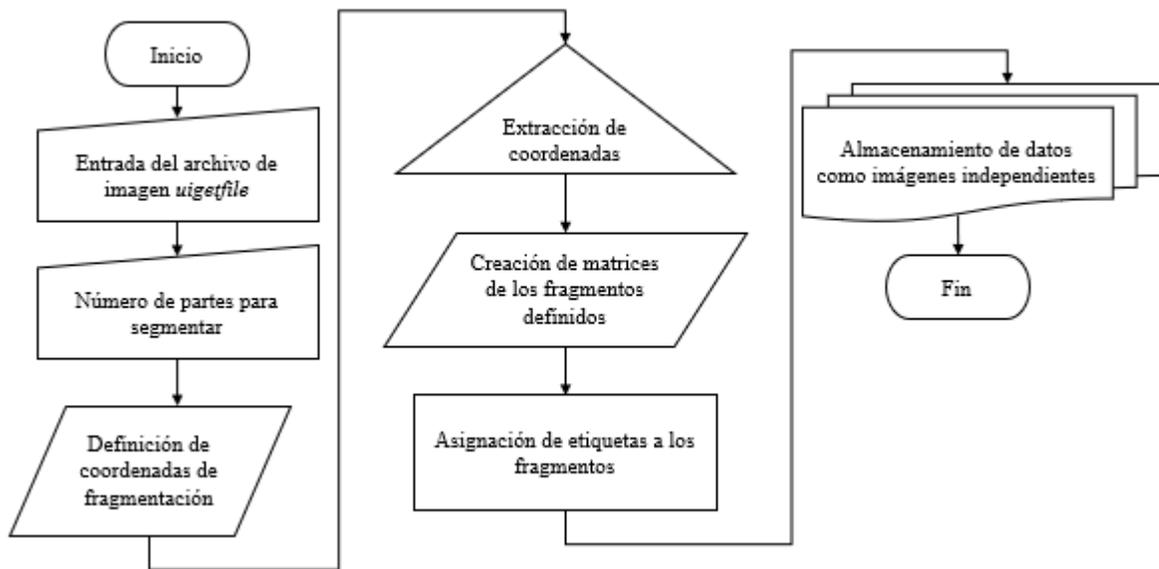
**Nota.** (a) fragmentación en cuatro segmentos, (b) fragmentación en nueve segmentos, (c) fragmentación en dieciséis segmentos.

La fragmentación se realiza subiendo la imagen a fragmentar mediante la función *uigetfile* [68] y definiendo el número de partes a segmentar siendo 4, 9 o 16; posteriormente se definen las coordenadas dadas por las dimensiones de la imagen. Se realiza la extracción de dichas coordenadas dentro de la imagen original y se define matricialmente los fragmentos de imagen mediante etiquetas para finalmente guardar cada parte como una imagen independiente.

El proceso de fragmentación de imagen se muestra en el diagrama de flujo de la figura 84.

**Figura 84.**

*Diagrama de flujo del proceso de fragmentación*

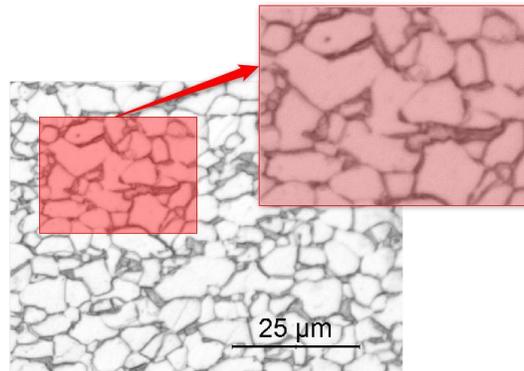


*Nota.* La entrada del archivo de imagen junto al número de partes a segmentar corresponde a una entrada de datos manual siendo este dato de número de partes un valor permitido de 4, 9 o 16.

Al requerir un análisis específico de un segmento, se realiza el recorte de una sección específica mediante la función *imcrop* [69] de un rectángulo dibujado sobre la imagen original con la función *drawrectangle*. [70] Estas funciones se ilustran en la figura 85.

**Figura 85.**

*Función `drawrectangle` e `imcrop`*

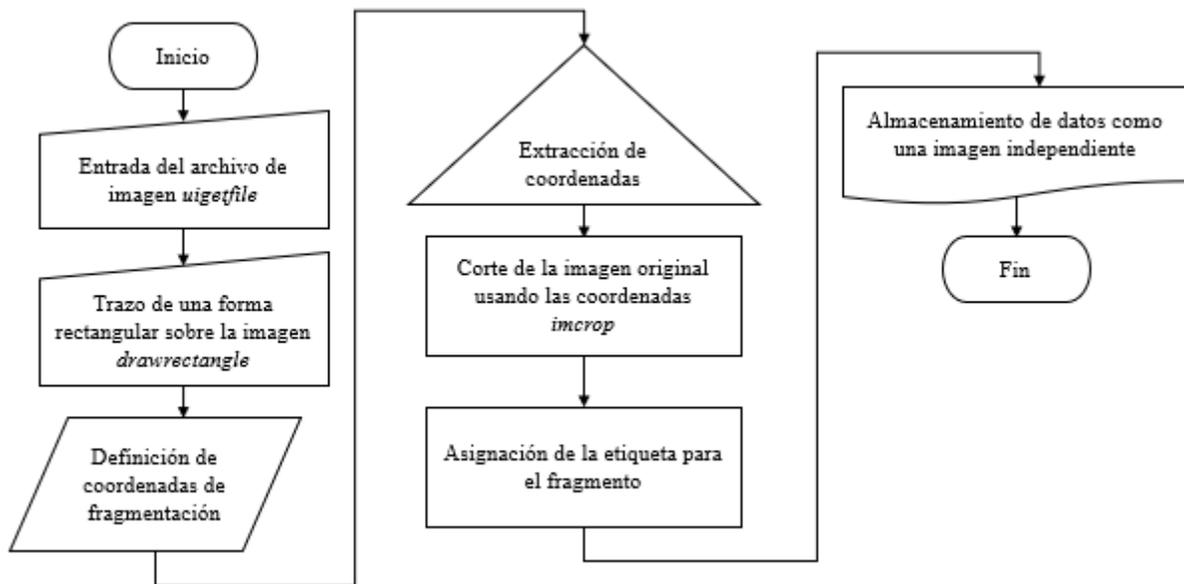


**Nota.** Se realiza el dibujo del rectángulo a recortar sobre la imagen original para seleccionar dicho recuadro, esta función permite obtener un fragmento específico de la imagen original.

El proceso de fragmentación de imagen usando un recorte rectangular se muestra en el diagrama de flujo de la figura 86.

**Figura 86.**

*Diagrama de flujo del proceso de fragmentación de un recorte de sección específica*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto trazo de la forma rectangular que permite recortar la imagen, corresponde a una entrada de datos manual siendo esta una operación donde el usuario debe definir la región de corte.

### 3.4.3 Manipulación de contraste, intensidad y brillo

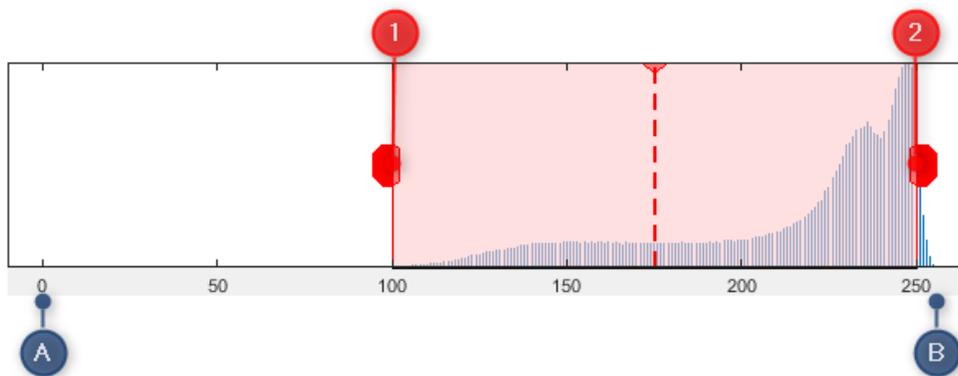
La manipulación del contraste e intensidad se basa en el uso del histograma de distribución de píxeles de una matriz de imagen en escala de gris, donde se modifican los valores máximos y mínimos del histograma para obtener una filtración y representar la imagen original en una escala distinta a los valores iniciales de intensidad.

El uso de la manipulación del histograma se realiza mediante la función *imadjust*, [71] esta función se emplea definiendo dos valores de referencia entre 0 y 255 para ajustar el histograma original de la imagen; estos datos permiten desplazar la escala de intensidad de la imagen gris siendo los valores máximos y mínimos las referencias definidas por el usuario.

La figura 87 muestra las definiciones de los límites de modificación del histograma.

**Figura 87.**

*Definición de los límites para la modificación del histograma.*

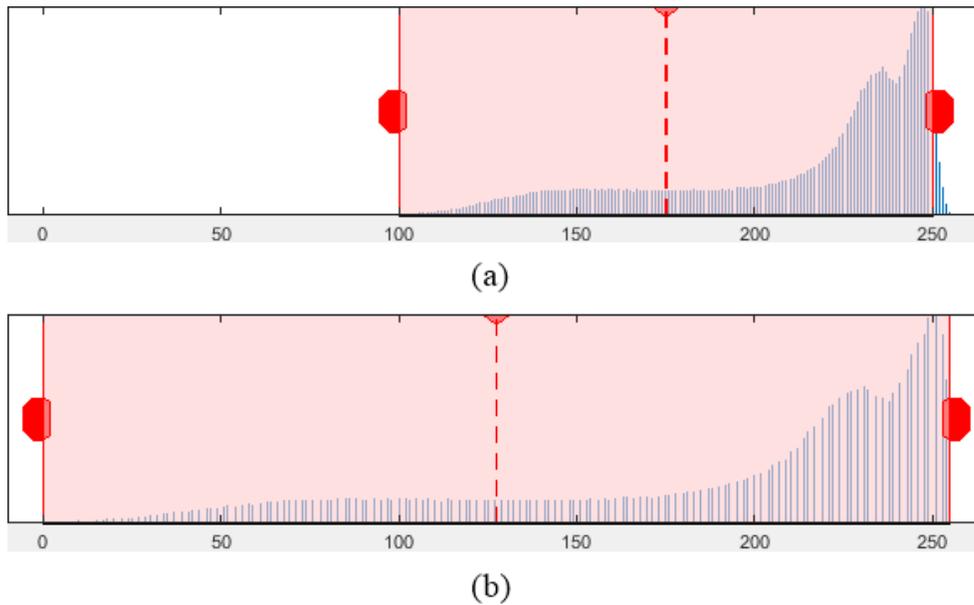


*Nota.* los puntos “A” y “B” representan los valores iniciales del histograma siendo 0 y 255 respectivamente; los puntos “1” y “2” representan los valores definidos por el usuario, siendo 103 y 250 respectivamente.

La modificación del histograma se muestra en la figura 88.

### Figura 88.

#### Modificación del histograma

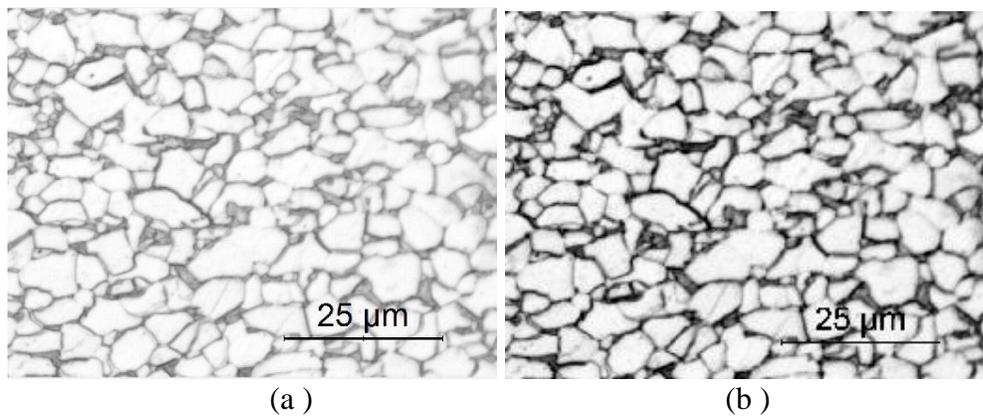


**Nota.** (a) histograma original con una demarcación de la región de interés de color rojo; (b) histograma modificado. Los valores de 100 y 250 se convierten en 0 y 255 respectivamente

El resultado de la modificación del histograma se muestra en la figura 89.

### Figura 89.

#### Aplicación de la manipulación del histograma



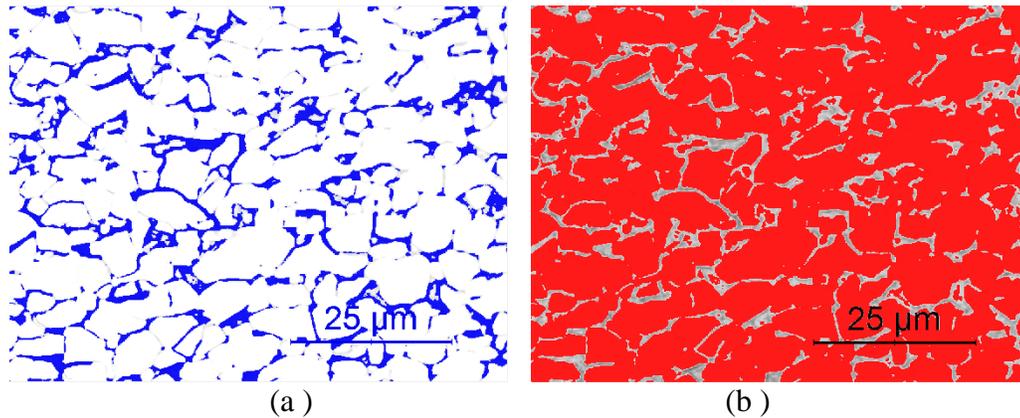
**Nota.** (a) imagen original; (b) aplicación de la modificación del histograma. El resultado de la modificación del histograma es una imagen con mayor contraste y realce de bordes donde la segunda fase se identifica con mayor detalle.

Con el objetivo de visualizar las fases presentes, se emplea la segmentación *clustering K-means* de manera simultánea a la aplicación del filtro. Para visualizar la segmentación de granos y controlar la morfología de la reproducción, se usan las funciones *imsegkmeans* y *labeloverlay* que segmentan y permite representar las fases empleando dos colores diferentes.[72], [73]

La representación de las fases se muestra en la figura 90

**Figura 90.**

*Segmentación de control de la aplicación de filtros*

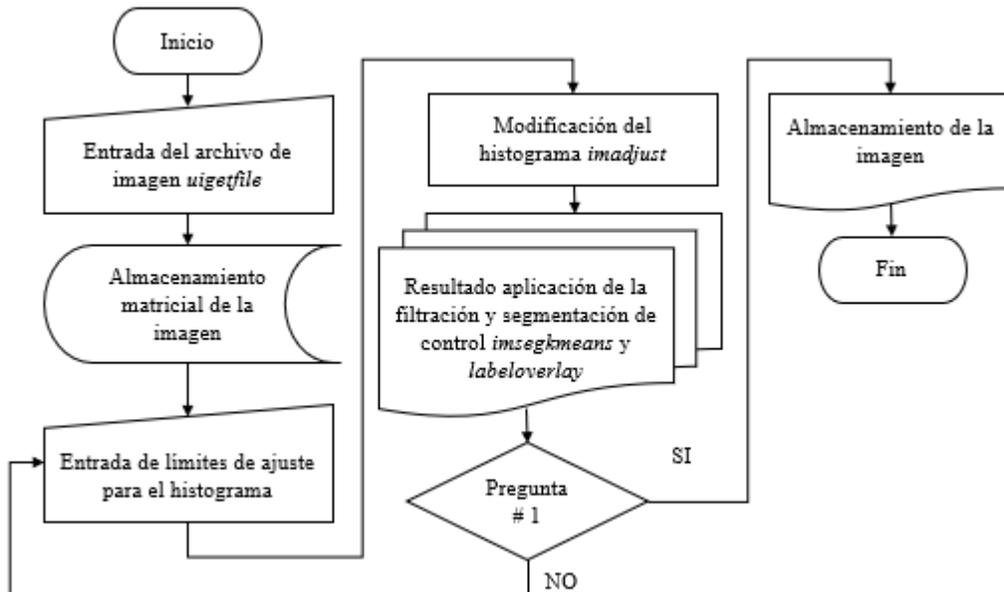


**Nota.** (a) segmentación de la fase secundaria (oscura) usando el color azul; (b) segmentación de la fase principal (clara) usando el color rojo. La segmentación se realiza con el objetivo de controlar la morfología al manipular la imagen mediante las filtraciones y no refleja la segmentación final del proceso; es solo un valor de referencia.

El proceso de manipulación del histograma de imagen junto a la segmentación para realizar el control de la aplicación de brillo y contraste se muestra en el diagrama de flujo de la figura 91.

**Figura 91.**

*Diagrama de flujo del proceso modificación del histograma*



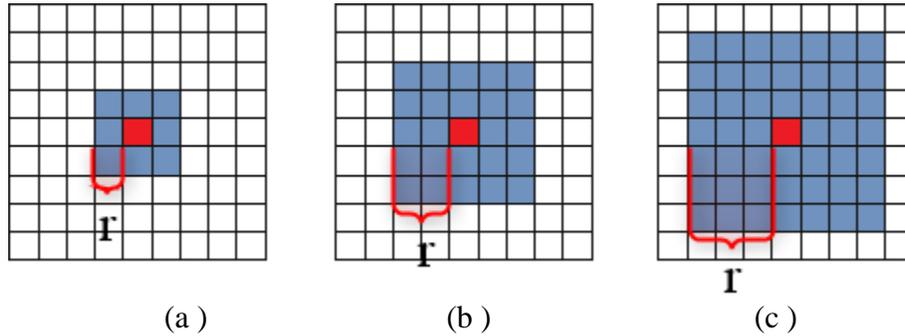
**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto al valor de los límites a modificar, corresponde a una entrada de datos manual donde los valores deben números reales, positivos, enteros entre 0 y 255 siendo el límite inferior menor al límite superior. El resultado de la aplicación y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes, siendo la segmentación de cada fase. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

### **3.4.4 Filtros de eliminación de ruido**

3.4.4.a Enmascaramiento sin enfoque. Empleando la función *imsharpen* [48] se realiza la cuantificación de la media del entorno del pixel central donde al incrementar el radio de aplicación, el entorno de cuantificación aumenta y al aumentar la intensidad del filtro la definición de borde se incrementa; el radio del entorno se ejemplifica en la figura 92.

**Figura 92.**

*Radio del entorno para un píxel central*

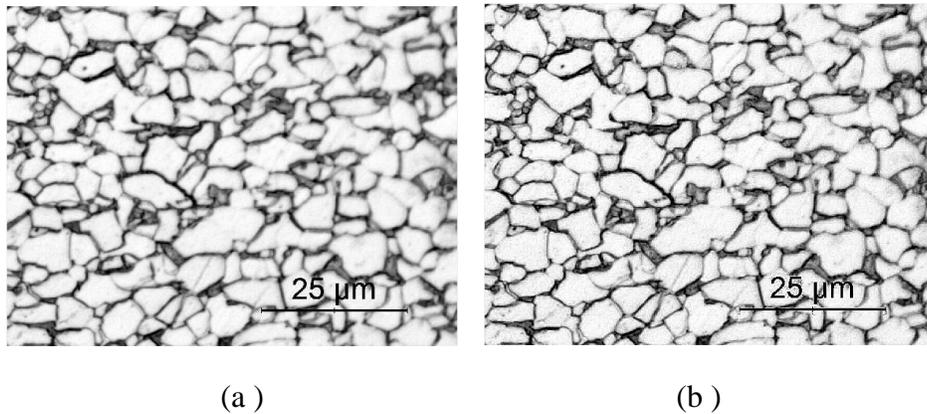


*Nota.* (a) entorno definido con un radio  $r = 1$ ; (b) entorno definido con un radio  $r = 2$ ; (c) entorno definido con un radio  $r = 3$ .

La aplicación del filtro de enmascaramiento sin enfoque se muestra en la figura 93.

**Figura 93.**

*Aplicación del filtro de enmascaramiento sin enfoque*

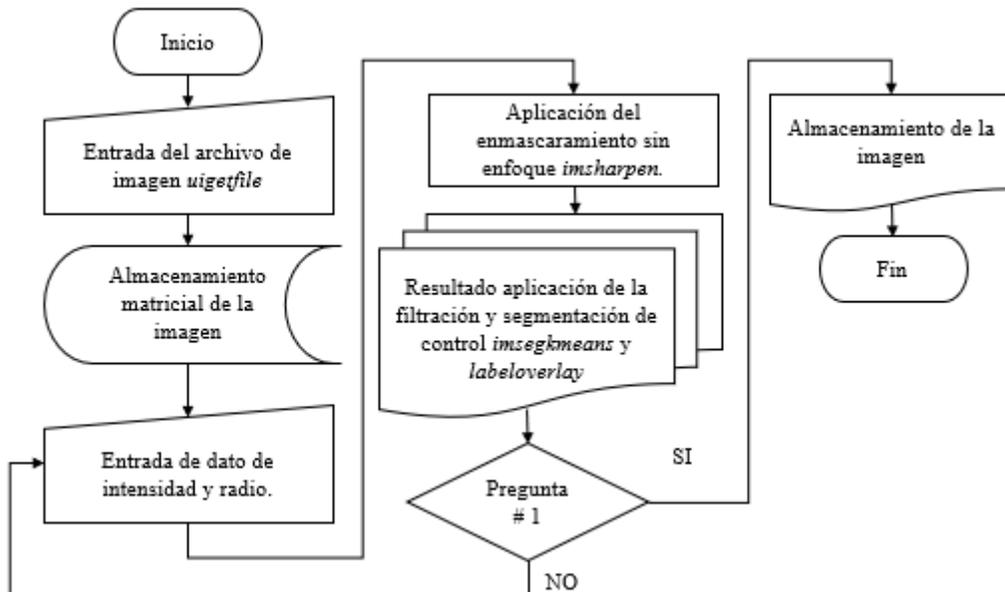


*Nota.* (a) imagen modificada usando la manipulación del histograma; (b) imagen modificada mediante el filtro de enmascaramiento sin enfoque. La operación de filtrado permite un realce de bordes incrementando la nitidez de la imagen; se mantiene el radio en un valor mínimo y se manipula la intensidad con el objetivo de no afectar los elementos de la primera fase.

El proceso de aplicación del enmascaramiento sin enfoque junto a la segmentación de control de la aplicación del realce de bordes se muestra en el diagrama de flujo de la figura 94.

**Figura 94.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro de enmascaramiento sin enfoque*



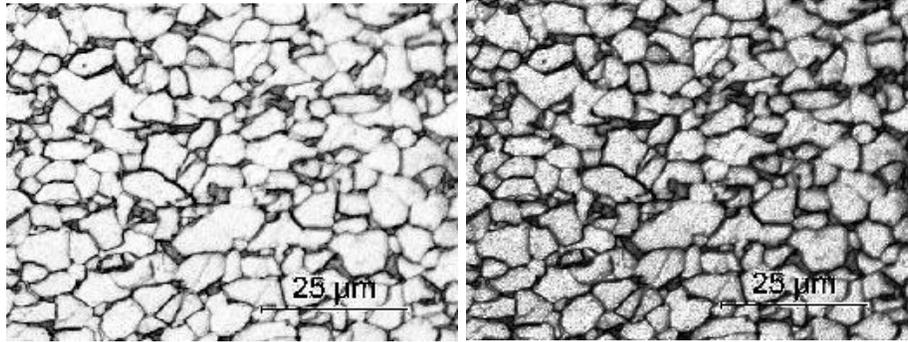
**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto a el valor de la intensidad del filtro corresponde a una entrada de datos manual donde el valor del datos del radio debe ser un número real, positivos entre 0 y 1 y el valor de intensidad un valor entero positivo  $> 0$ . El resultado de la aplicación del filtro y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

3.4.4.b Ecuador de histograma adaptativo por contrastes (CLAHE). se homogeniza la distribución del histograma equilibrando los valores pico de la distribución mediante la función *adapthisteq*; [74] el parámetro de entrada es el límite de mejora de contraste, el cual modifica la intensidad considerando los valores pico del histograma para homogeneizar los valores

La aplicación del filtro se muestra en la figura 95.

**Figura 95.**

*Aplicación de la ecualización por contrastes adaptativos (CLAHE)*



(a)

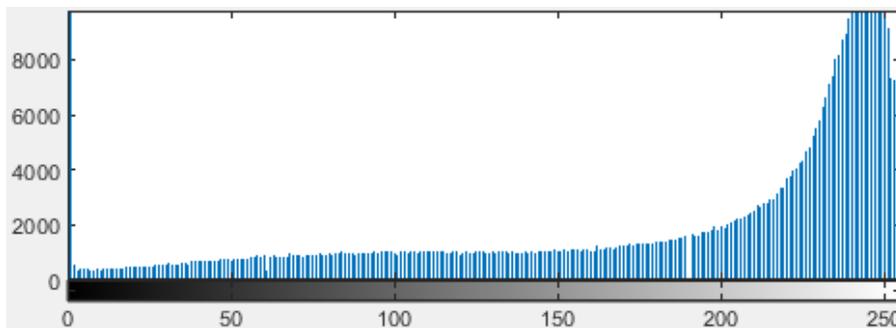
(b)

**Nota.** (a) imagen filtrada mediante el enmascaramiento sin enfoque; (b) filtro de ecualización de histograma adaptativo por contraste (CLAHE). La filtración crea similitud entre los valores de intensidad acentuando la segunda fase (elementos oscuros); sin embargo, se crea ruido dentro de la imagen producto de la filtración.

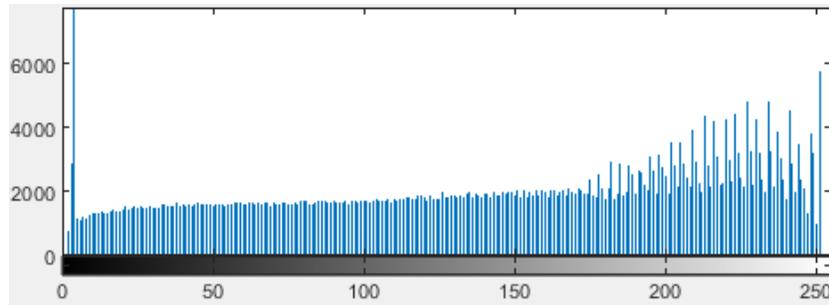
La homogeneidad del histograma durante la aplicación del filtro se muestra en la figura 96.

**Figura 96.**

*Homogeneización del histograma producto del filtro (CLAHE)*



(a)



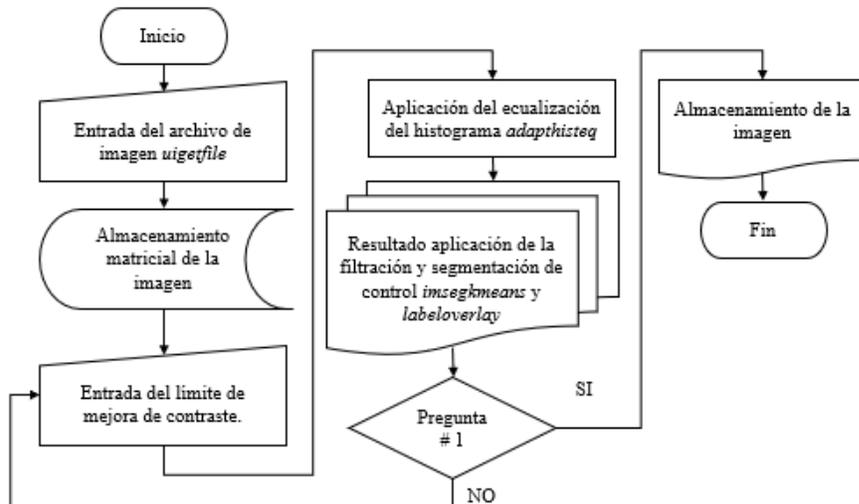
(b)

**Nota.** (a) Histograma original; (b) Histograma al aplicar la ecualización de histograma adaptativo por contraste. Al aplicar la filtración el histograma se homogeniza; los valores pico de la distribución pasan de valores por encima de 8000 elementos con intensidad de 240 a 5000 elementos con el mismo valor de intensidad.

El proceso de aplicación del filtro (CLAHE) se muestra en el diagrama de flujo de la figura 97.

**Figura 97.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro CLAHE*

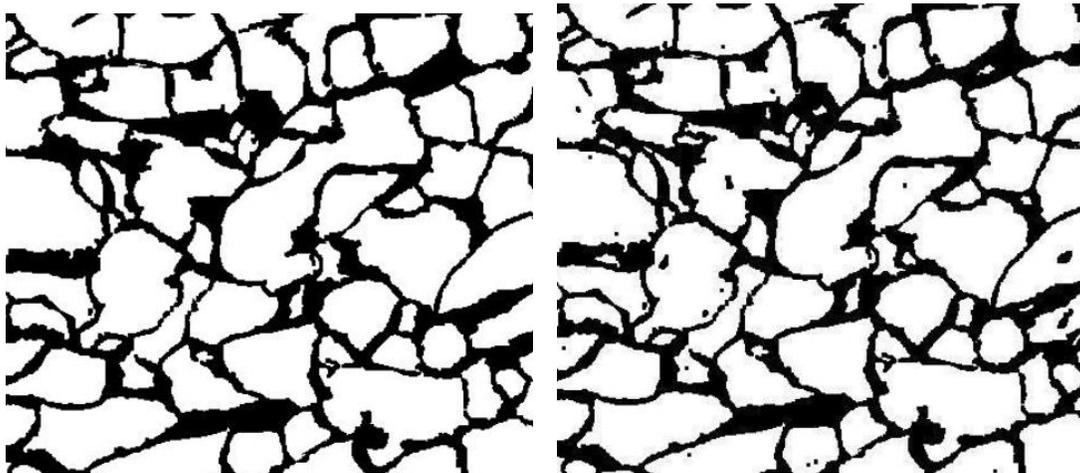


**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto al valor del límite de mejoramiento de contraste corresponden a una entrada de datos manual, donde el valor del límite de mejoramiento de contraste debe ser un número real, entre 0 y 1. El resultado de la aplicación del filtro y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

3.4.4.c Filtro gaussiano. Permite implementar una eliminación de ruido y homogenización de las texturas suavizando la imagen, donde se implementa de forma leve mediante la función *imgaussfilt*. [49] La aplicación del filtro gaussiano permite homogeneizar el resultado para eliminar los segmentos que poseen picos en la distribución del histograma que se muestran como discontinuidades durante los procesos de segmentación como ilustra la figura 98.

**Figura 98.**

*Mejora durante la aplicación de la segmentación después del filtro gaussiano*



(a)

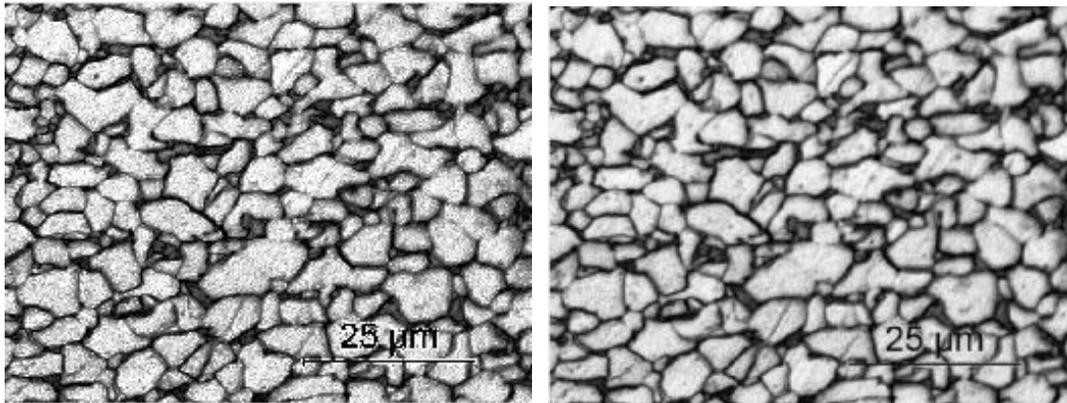
(b)

**Nota.** (a) segmentación de imagen aplicando filtrado gaussiano; (b) segmentación de imagen sin la aplicación del filtro gaussiano, donde se evidencian la no homogeneidad del resultado para la fase principal (blanco) y se destacan morfologías consideradas imperfecciones para la muestra (puntos negros).

La aplicación del filtro se muestra en la figura 99.

**Figura 99.**

*Aplicación del filtro gaussiano*



(a)

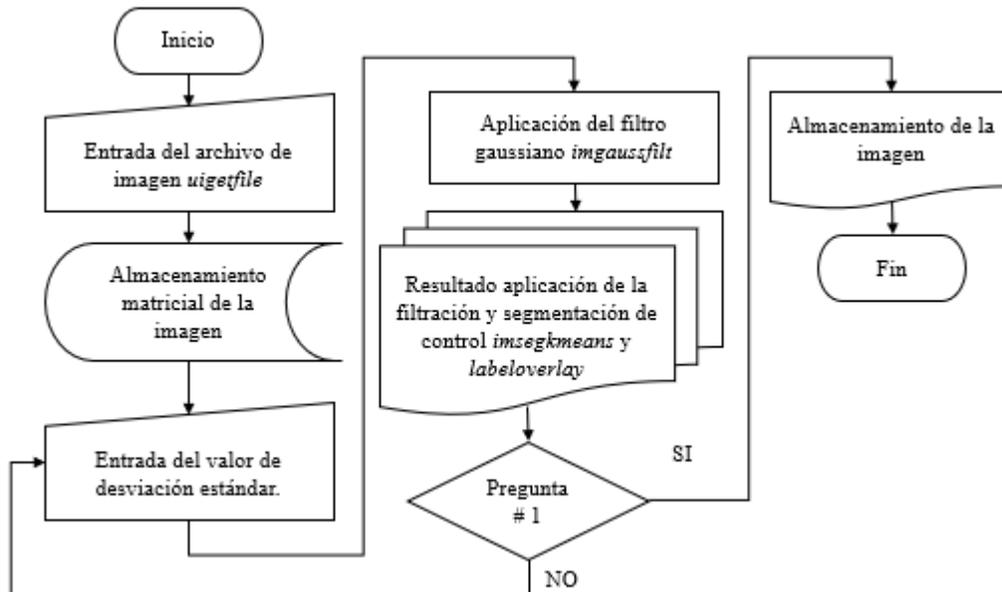
(b)

**Nota.** (a) imagen filtrada mediante la ecualización de histograma adaptativo por contraste; (b) imagen filtrada mediante el filtro gaussiano. La figura muestra la homogeneización de las texturas eliminando el ruido producto del filtrado (CLAHE) manteniendo el realce de la segunda fase.

El proceso de aplicación del filtro gaussiano se muestra en el diagrama de flujo de la figura 100.

**Figura 100.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro gaussiano*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto al valor de la desviación estándar corresponden a una entrada de datos manual donde el valor de la desviación debe ser un número real  $> 0$ . El resultado de la aplicación del filtro y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

3.4.4.d Filtro mediano, mínimo y máximo. Permiten realizar una eliminación del ruido buscando la mejora de la imagen al emplear la mediana, el valor máximo o el valor mínimo de los elementos de la matriz.

Durante el proceso de filtrado, la selección del valor mediano, máximo o mínimo produce una respuesta en el resultado final que considera la distribución de píxeles, donde el filtro mínimo realiza la intensidad con valor 0 (color negro), el filtro máximo realiza la intensidad con valor 255 (color blanco) y el filtro mediano cuantifica la mediana de los datos según el entorno del píxel central.

Para la aplicación del filtro se usa la función *ordfilt2* donde como criterio de entrada se fija un valor que define el tipo de aplicación ( $n$ ) siendo 1, 9 o 5 para los filtros mínimo, máximo y mediano respectivamente, donde se usa una matriz de convolución de [3,3]; la estructura de la implementación se define a continuación. [52]

$$\text{ordfilt2}(I, n, \text{ones}(3,3))$$

Donde:

$I$ : matriz de representación de imagen

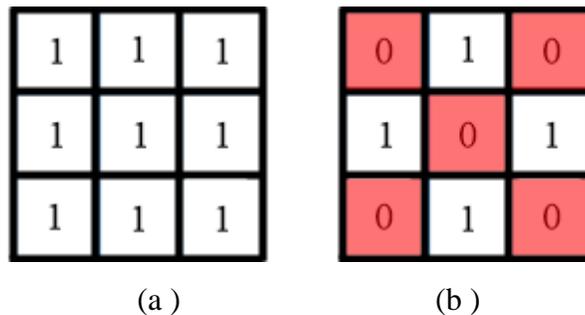
$n = 1$  (Filtro mínimo)  $n = 9$  (Filtro máximo)  $n = 5$  (Filtro mediano)

$\text{ones}(3,3)$ : matriz de convolución  $[3,3]$  donde se implementa la detección del dato  $n$  y se usa función  $\text{ones}$  para emplear una matriz de unos en sus posiciones, considerando todo el entorno.

El filtro mínimo permite una variación en su aplicación denominada “Mínimo de vecinos del norte, sur, este y oeste (NSEO)”, [52] el cual considera una matriz de aplicación usando las coordenadas  $[1,2]$ ;  $[2,1]$ ;  $[2,3]$  y  $[3,2]$  mostradas en la figura 101.

**Figura 101.**

*Matrices de convolución para los filtros mínimo, máximo, mediano y NSEO*

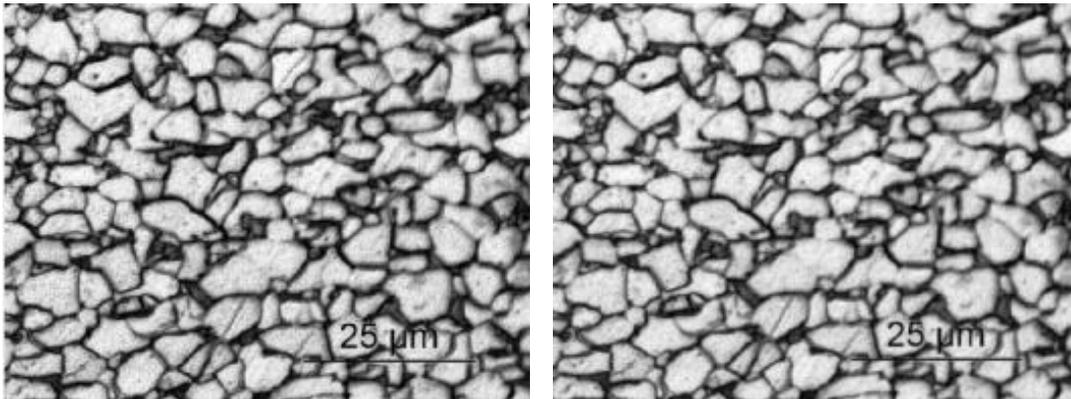


*Nota.* (a) matriz de convolución para los filtros mínimo, máximo, mediano y mínimo; (b) matriz de convolución para el filtro NSEO que no considera la matriz completa por lo que su nombre se debe a los principales puntos cardinales norte, sur, este y oeste.

La aplicación del filtro mediano se muestra en la figura 102.

**Figura 102.**

*Aplicación del filtro mediano*



(a)

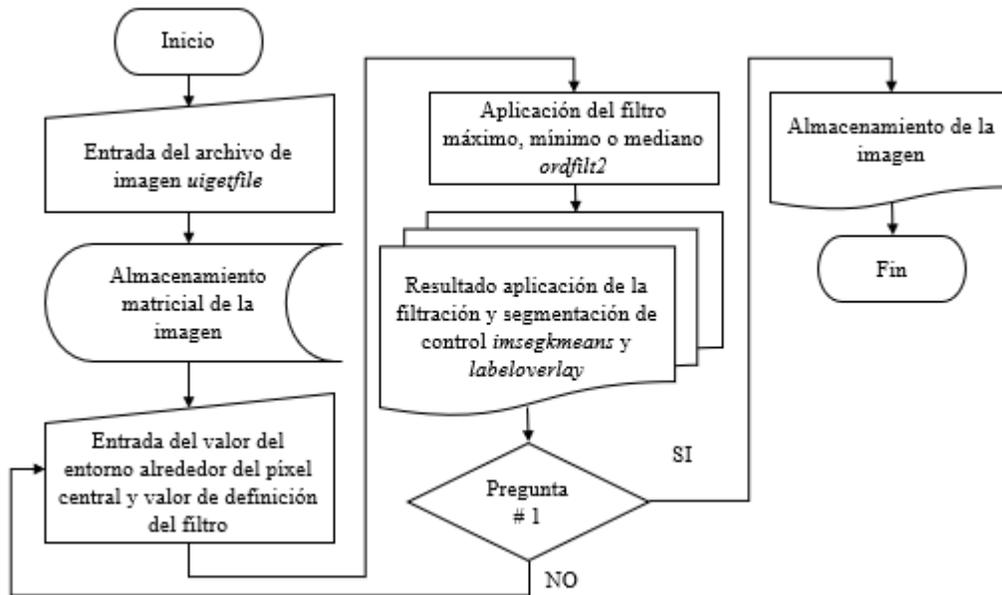
(b)

*Nota.* (a) imagen filtrada mediante con filtro gaussiano; (b) imagen filtrada con el filtro mediano. La aplicación del filtro homogeniza las texturas de la fase principal (color claro) manteniendo el realce de la segunda fase y bordes de grano (color oscuro).

El proceso de aplicación del filtro mínimo, máximo o mediano se muestra en el diagrama de flujo de la figura 103.

**Figura 103.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro mínimo, máximo o mediano*



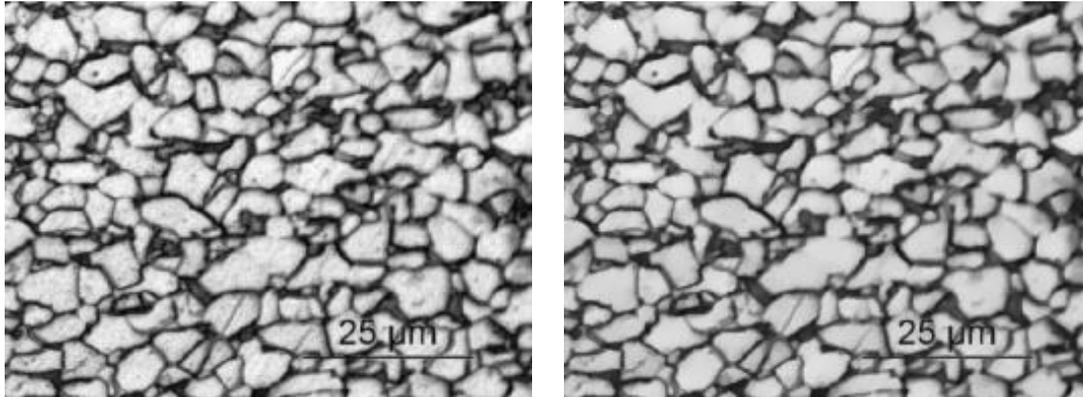
*Nota.* La entrada del archivo de imagen junto al valor del entorno alrededor de píxel central y la definición del filtro corresponde a una entrada de datos manual, donde el valor del entorno debe ser un número real, entero  $> 3$  y el valor de definición del filtro corresponde a 1, 9 o 5 (valor mínimo, máximo y mediano respectivamente para una aplicación de entorno de tamaño [3,3]). El resultado de la aplicación del filtro y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

3.4.4.e Filtro laplaciano. Realiza la homogeneización local de texturas sin modificar los bordes de la imagen, considerando la conectividad de elementos de la fase principal mediante la función *locallapfilt* [63]

La aplicación del filtro laplaciano se muestra en la figura 104.

### Figura 104.

#### *Aplicación del filtro mediano*



(a)

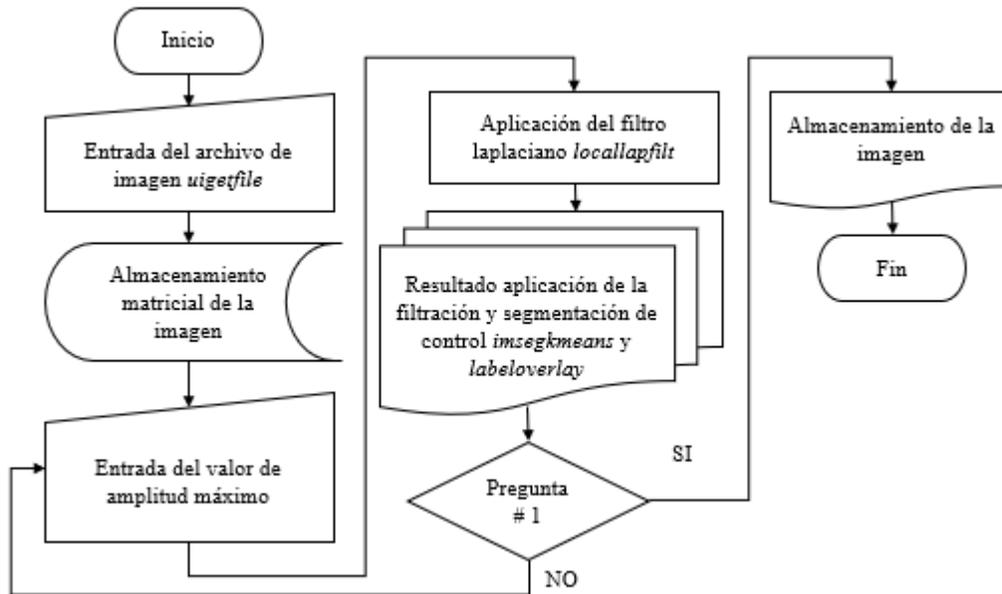
(b)

**Nota.** (a) imagen filtrada mediante el filtro mediano; (b) imagen filtrada mediante el filtro laplaciano. La aplicación del filtro homogeniza las texturas de la fase principal (color claro) manteniendo el realce de la segunda fase (color oscuro) y resalta los bordes de grano usando el gradiente u operador laplaciano.

El proceso de aplicación del filtro laplaciano se muestra en el diagrama de flujo de la figura 105.

**Figura 105.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación del filtro laplaciano*

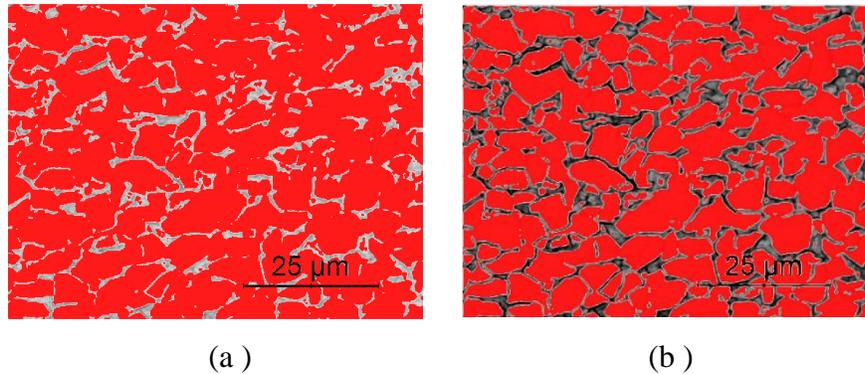


**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto al valor del entorno alrededor de píxel central y el valor de amplitud máximo corresponde a una entrada de datos manual, donde el valor de la amplitud debe ser un número real, entre 0 y 1; entre mas cercano se encuentre el valor al número máximo la definición de bordes considera menor número de elementos. El resultado de la aplicación del filtro y la segmentación de control se muestran como imágenes independientes. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

La implementación de la filtración varía dependiendo de la luz y nitidez en la obtención de la reproducción de la microscopía, la intensidad de las fases, los constituyentes, su distribución dentro de la muestra, la magnificación usada y la experiencia con la toma de muestras metalográficas. Además, cada filtro incorpora la pregunta “¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?” Esto se realiza con el objetivo de regresar a la aplicación de cada parámetro de filtración en el caso de no obtener el resultado esperado el cual se determina realizando una inspección visual usando la segmentación de control. En la figura 106 se muestra la segmentación de control después de aplicar las filtraciones.

**Figura 106.**

*Segmentación de control para la fase principal antes y después del filtrado de imagen*



**Nota.** (a) segmentación en la imagen original; (b) segmentación en la imagen filtrada. Después de la aplicación de filtros se muestra la fase principal con mayor nivel de detalle y definición de los bordes de grano.

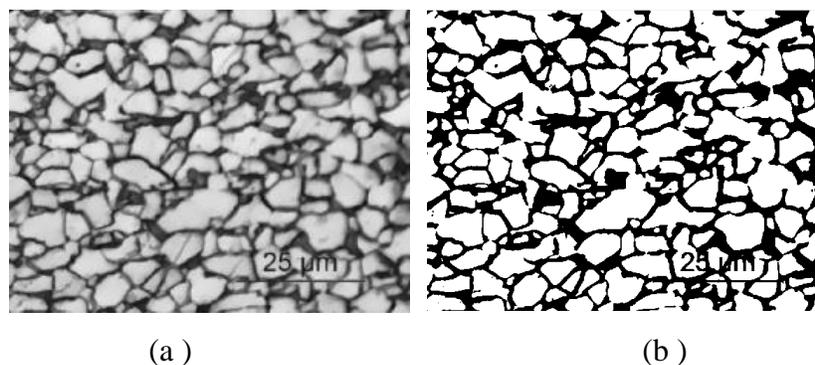
### **3.4.5 Segmentación.**

La segmentación se realiza por el método de binarización y la determinación del umbral por el método de OTSU; se realiza una transformación del umbral identificando la distribución de histograma que menor varianza posea para cada valor de píxel, empleando la función *imbinarize* [75] para cuantificar el umbral y representar de la imagen de forma lógica.

La aplicación de la binarización con la determinación del umbral por el método de OTSU se muestra en la figura 107.

**Figura 107.**

*Segmentación por el método de binarización*

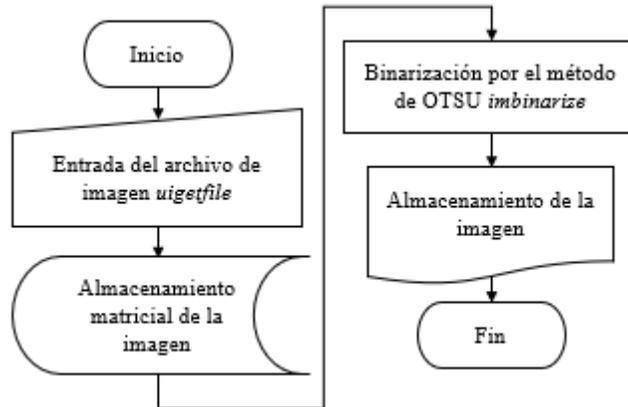


**Nota.** (a) imagen filtrada; (b) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU.

El proceso de aplicación del proceso de binarización se muestra en el diagrama de flujo de la figura 108.

**Figura 108.**

*Diagrama de flujo del proceso de binarización*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen corresponde a una entrada de datos manual, la función *imbinarize* realiza la aplicación de la binarización incorporando el umbral por el método de OTSU. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica donde los elementos blancos poseen un valor de 1 dentro de la matriz de representación y los elementos negros un valor de 0.

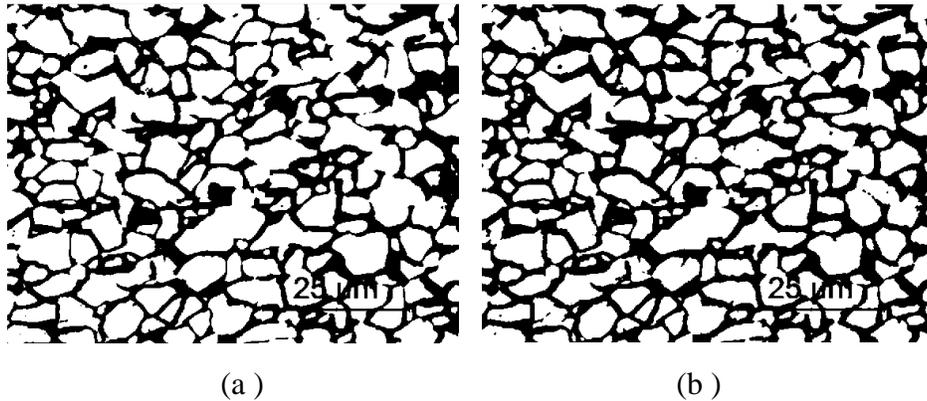
### **3.4.6 Mejoramiento de la sensibilidad.**

Se emplea para manipular el umbral de binarización determinado por el método de OTSU; usa un valor entre 0 y 1 o 0% y 100% como factor de multiplicación para el umbral, permitiendo obtener diferentes valores para este, el cual al ser aplicado modifica la respuesta dependiendo del nivel seleccionado.

En la figura 109 se muestra la modificación de la sensibilidad a la binarización realizada al 60% y la figura 110 una magnificación que detalla el resultado obtenido.

**Figura 109.**

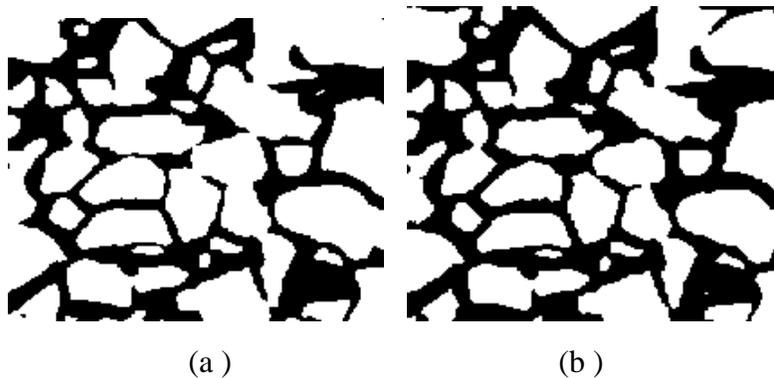
*Aplicación del mejoramiento de la sensibilidad*



*Nota.* (a) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU; (b) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU modificado a 60% del umbral.

**Figura 110.**

*Magnificación del resultado del mejoramiento de la sensibilidad*

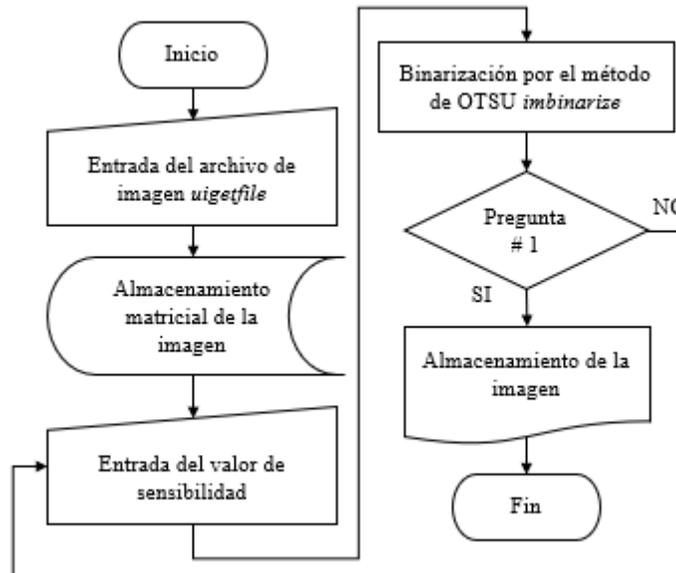


*Nota.* (a) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU; (b) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU modificado a 60% del umbral; la figura muestra una mejora en la definición de bordes de grano y la segmentación de la fase principal (color blanco).

El proceso de aplicación de la binarización considerando la sensibilidad se muestra en el diagrama de flujo de la figura 111.

**Figura 111.**

*Diagrama de flujo del proceso de sensibilización a la binarización*

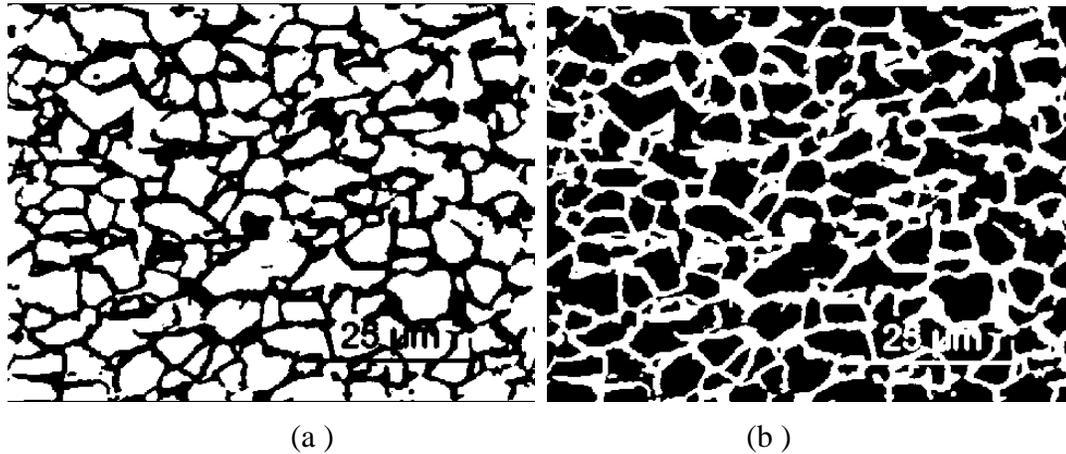


**Nota.** La entrada del archivo de imagen junto al valor de sensibilidad corresponden a una entrada de datos manual, siendo el valor de sensibilidad un número real entre 0 y 1. La función *imbinarize* realiza la aplicación de la binarización incorporando el umbral por el método de OTSU y el valor de sensibilidad. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica donde los elementos blancos poseen un valor de 1 dentro de la matriz y los elementos negros un valor de 0. La pregunta #1 Corresponde a: ¿el valor fijado de sensibilidad permite identificar correctamente la morfología de fases?

Al momento de realizar el proceso de binarización se debe definir la representación de color considerando el objeto a analizar; los procesos de cambios de morfología y refinamiento de datos se realizan sobre los segmentos que adquieren matricialmente un valor de 1; es decir, el color blanco por lo que se realiza una inversión de los valores matriciales de la imagen con el objetivo de obtener una representación de la fase secundaria de color blanco, empleando la función *imcomplement*. [76] Esto se ilustra en la figura 112.

**Figura 112.**

*Inversión del procesos de binarización*

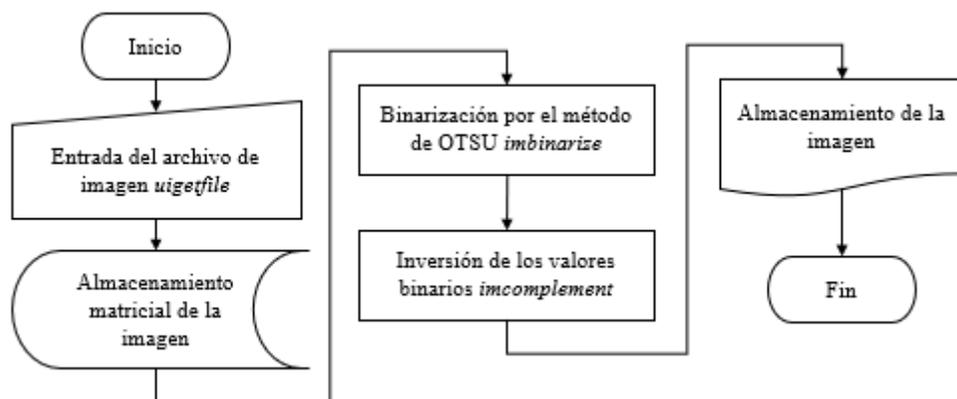


*Nota.* (a) imagen binarizada por el método de umbral de transformación de OTSU; (b) imagen binarizada invirtiendo los valores matriciales. El resultado de la operación es el complemento de la imagen que permite realizar modificaciones de la morfología de la segunda fase. La modificación de la morfología y procesos de medición se realizan sobre los segmentos blancos.

El proceso de aplicación de la binarización considerando la sensibilidad se muestra en el diagrama de flujo de la figura 113.

**Figura 113.**

*Diagrama de flujo del proceso de sensibilización a la binarización*



*Nota.* La entrada del archivo de imagen corresponde a una entrada de datos manual, la función *imcomplement* invierte el valor de la binarización. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica invertida.

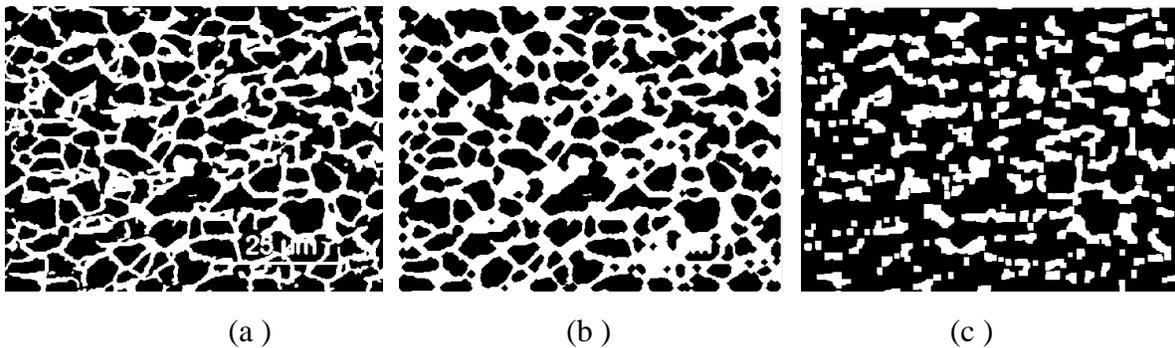
### 3.4.7 Cambios de morfología

Permiten realizar modificaciones a la representación binaria; se aplican las operaciones morfológicas de erosión y dilatación, definiendo un elemento estructurante morfológico mediante la función *strel*; este elemento estructurante plano se usa para aproximar la vecindad del píxel central a la forma definida siendo: *disk*, *square*, *rectangle*, *circle*, *line*, *octagon* o *diamond*. [77]

Se usa un número para definir el radio de aplicación para las formas *disk*, *circle*, *octagon*, *diamond* (radio) y dos valores para la aplicación de las formas, *square* y *rectangle* (alto y ancho). La operación de dilatación y erosión se aplican con las funciones *imopen* e *imclose* respectivamente y se muestra en la figura 114. [78], [79]

**Figura 114.**

*Aplicación de dilatación y erosión morfológica en una imagen matricialmente invertida*

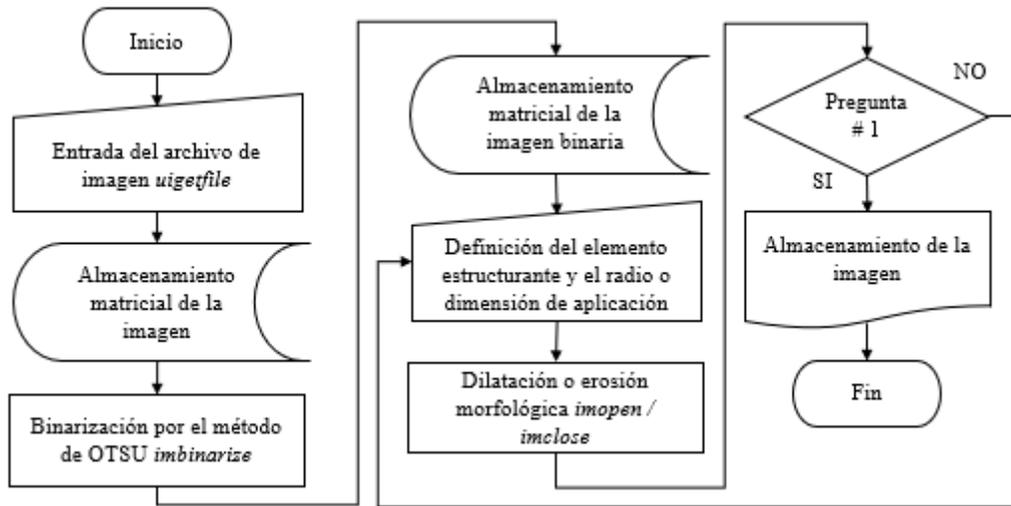


*Nota.* (a) imagen binarizada con valores matriciales invertidos; (b) dilatación de imagen usando el elemento estructurante *octagon*; se muestra el crecimiento de la fase secundaria (color blanco) reduciendo el tamaño de la morfología de la fase principal (color negro) y separando los elementos conectados de color negro (c) erosión de imagen usando el elemento estructurante *square*; se muestra el encogimiento de la fase secundaria (color blanco) aumentando el tamaño de la morfología de la fase principal (color negro) y separando los elementos conectados (color blanco).

El diagrama de flujo que representa las operaciones de dilatación y erosión se muestran en las figuras 115.

**Figura 115.**

*Diagrama de flujo del proceso de aplicación de dilatación y erosión morfológica*



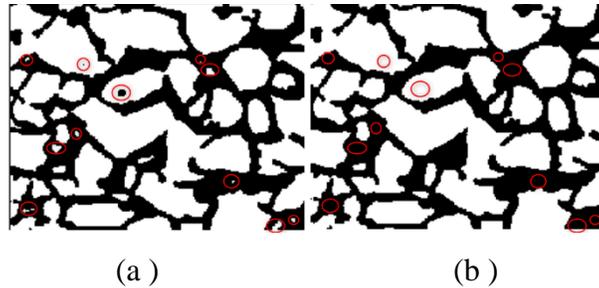
*Nota.* La entrada del archivo de imagen, el tipo de elemento estructurante y su valor de dimensión corresponde a una entrada de datos manual, el radio o dimensión debe ser un número real entero positivo. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica. La pregunta #1 Corresponde a: ¿la aplicación del filtro mejora la morfología de la imagen?

### **3.4.8 Extracción de discontinuidades.**

La extracción de discontinuidades se aplica a las imágenes segmentadas donde se identifican las áreas de los segmentos de color blanco para eliminar elementos de un tamaño específico de áreas. El valor de áreas por segmento se cuantifica realizando un conteo de la cantidad de píxeles que ocupan el área detectada; este proceso usa la función *bwareaopen* [80] y se ilustra en la figura 116.

**Figura 116.**

*Aplicación de eliminación de áreas o extracción de discontinuidades en una imagen binaria*

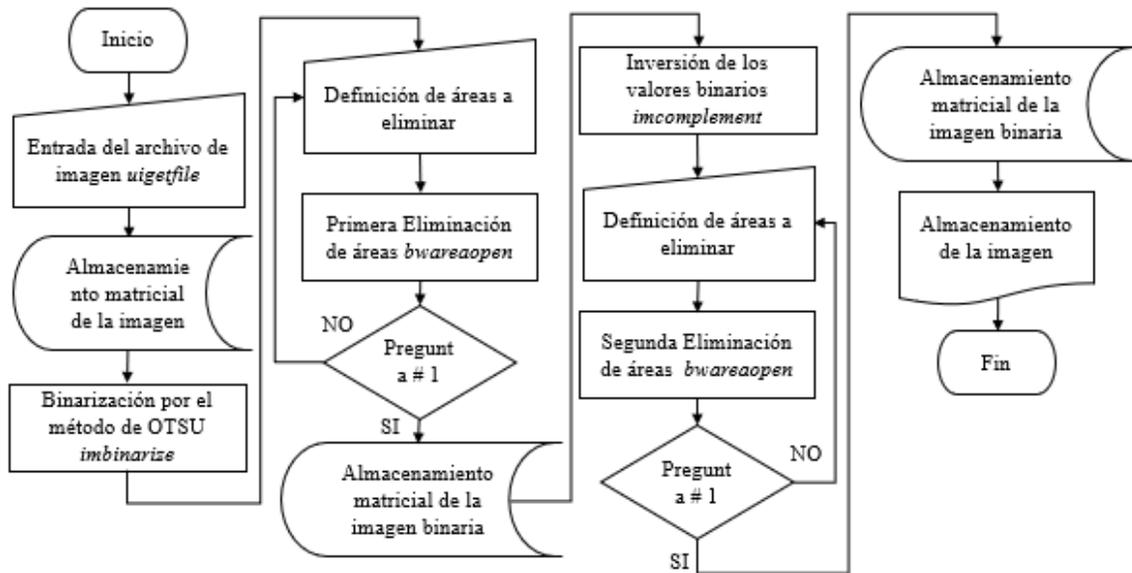


*Nota.* (a) imagen binaria con identificación de elementos a eliminar; (b) imagen binaria realizando la eliminación de áreas correspondientes a 110 píxeles conectados tanto para la morfología negra como blanca.

El diagrama de flujo que permite realizar la eliminación de áreas se muestra en la figura 117.

**Figura 117.**

*Diagrama de flujo de la eliminación de áreas o extracción de discontinuidades*



*Nota.* La entrada del archivo de imagen, y la definición de áreas a eliminar corresponden a una entrada de datos manual donde las áreas a eliminar deben ser un número real y un valor entero positivo. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica invertida. La pregunta # 1 corresponde a: ¿el valor definido para la eliminación de áreas permite eliminar las discontinuidades de la morfología de fase?

### 3.4.9 Identificación y conteo de centroides.

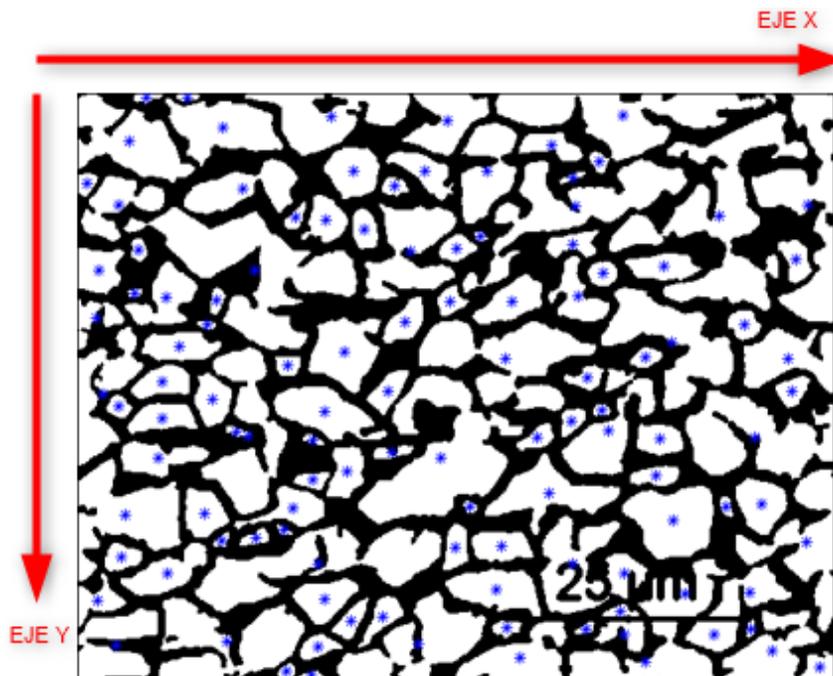
La identificación de centroides se realiza mediante la filtración de las propiedades de región de la imagen, donde se efectúa el conteo de elementos para determinar el número de granos y mostrar los centroides correspondientes sobreponiendo los puntos en la imagen.

Se emplea la función *regionprops* y el criterio de filtración *centroid* para extraer las coordenadas del centroide de cada área detectada para la imagen. El resultado matricial de la extracción de centroides corresponde a una matriz de  $[n, 2]$  donde  $n$  representa el número de elementos y el número dos la coordenada en el eje "x" y coordenada en el eje "y" para la imagen. El sistema coordenado y la gráfica de los puntos de cada centroide sobre la imagen se ilustra en la figura 118.

[66]

**Figura 118.**

*Centroides y sistema coordenado de referencia*

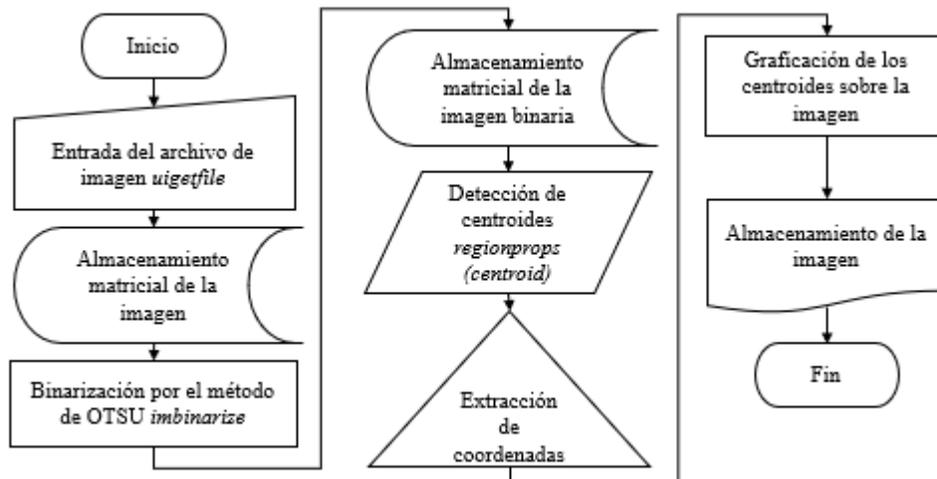


**Nota.** la figura muestra los centroides de los elementos blancos usando un asterisco (\*) de color azul; cada elemento blanco de imagen es detectado como un objeto independiente que considera la conectividad de cada píxel.

El diagrama de flujo que representa el proceso de identificación de centroides se muestra en la figura 119.

**Figura 119.**

*Diagrama de flujo del proceso de identificación y gráfica de centroides*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen corresponde a una entrada de datos maunal donde la propiedad de región usada es *centroid*. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica con superposición de centroides graficados.

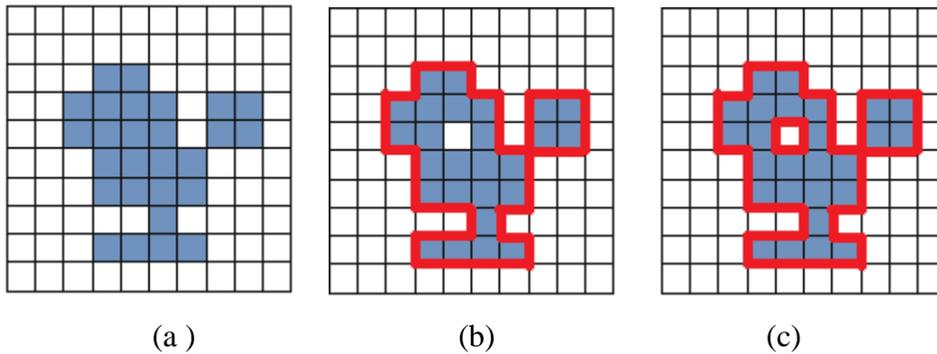
### 3.4.10 Identificación de bordes.

La identificación de bordes se realiza mediante las propiedades de conectividad de los elementos; se almacena la línea del contorno del borde y se grafica sobre la imagen original. El refinamiento de bordes se basa en el dibujo de un polígono sobre la imagen original que modifica el color y valor del interior de este, para transformar de forma poligonal segmentos blancos o negros.

La identificación de bordes emplea la función *bwboundaries*. Dependiendo de la conectividad de los elementos, la función traza una línea sobre la división de segmentos conectados. Considera la presencia de agujeros dentro del segmento usando los criterios *holes* y *nholes* como se ejemplifica en la figura 120.[81]

**Figura 120.**

*Representación de identificación de bordes en una imagen segmentada*

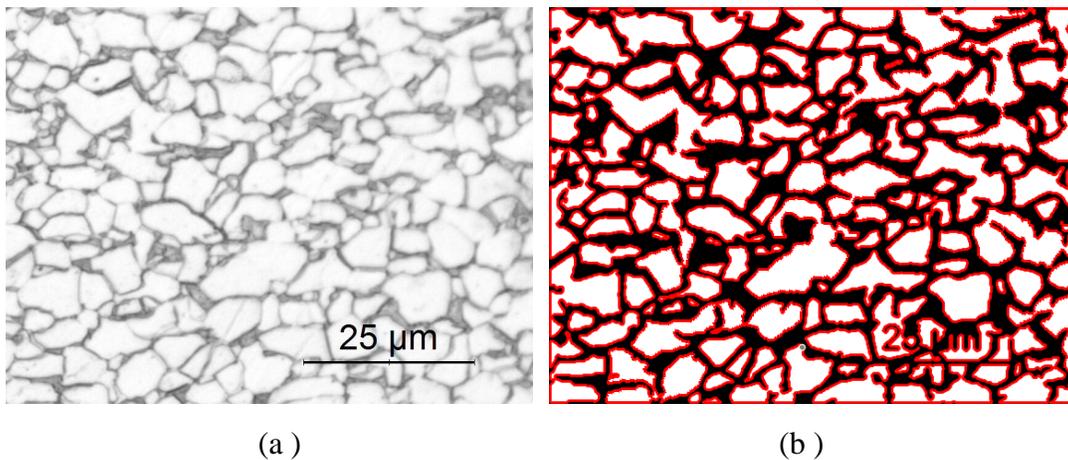


**Nota.** (a) representación de área en píxeles; (b) identificación de bordes mediante el criterio *noholes*; (c) identificación de bordes mediante el criterio *holes*. Se emplea el criterio *holes* para realizar la detección de bordes por su demarcación e identificación de agujeros dentro de la morfología, los cuales pueden ser atribuidos a imperfecciones.

La detección de bordes de grano en la imagen original se muestra en la figura 121.

**Figura 121.**

*Aplicación de la detección de bordes*

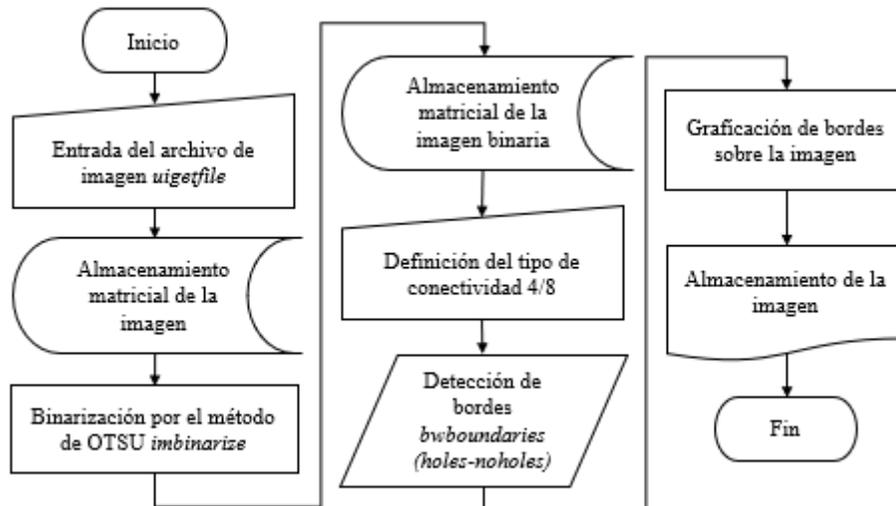


**Nota.** (a) imagen original; (b) imagen segmentada con identificación de bordes usando el criterio *noholes*.

El diagrama de flujo que representa el proceso de identificación de bordes se muestra en la figura 122.

**Figura 122.**

*Diagrama de flujo del proceso de identificación y gráfica de bordes*

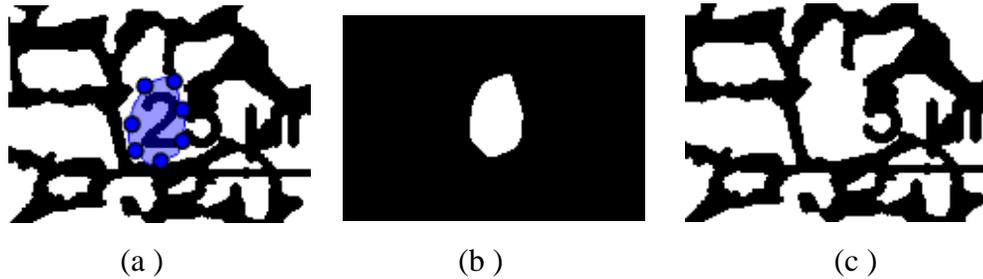


**Nota.** La entrada del archivo de imagen corresponde a una entrada de datos manual. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica con superposición de bordes graficados.

El refinamiento de bordes consiste en una operación de trazo de segmentos para ser representados como una fase u otra. El proceso consiste dibujar de forma libre sobre la imagen segmentada un polígono usando la función *drawfreehand*; [82] la cual extrae la propiedad de posición de la forma trazada y se representa de forma binaria sobre una matriz de unos o de color negro identificando el área de la forma poligonal con un color blanco de valor matricial. Esta matriz se denomina máscara y se crea mediante la función *createMask*. [83] Posteriormente se emplean ciclos iterativos para representar los elementos blancos de la máscara sobre la imagen segmentada de color blanco o negro, lo cual depende de las necesidades de la morfología; estas operaciones se ilustran en las figuras 123 y 124.

**Figura 123.**

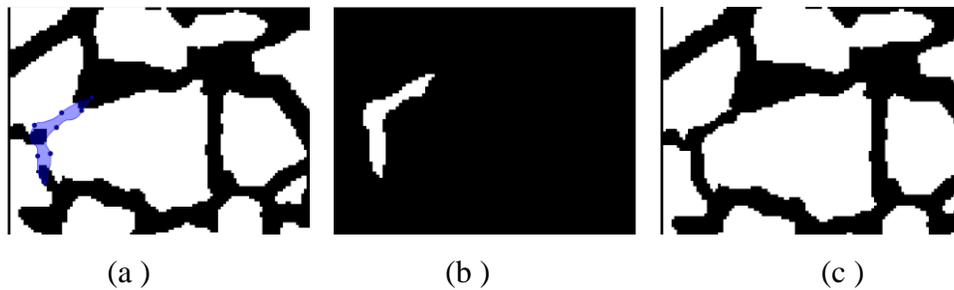
*Creación de segmentos blancos (definición de grano)*



*Nota.* (a) polígono dibujado sobre la imagen segmentada; (b) máscara de representación del polígono; (c) imagen segmentada con la adición del polígono dibujado como color blanco lo cual elimina el valor de la escala de la microscopía.

**Figura 124.**

*Creación de segmentos negros (definición de bordes de grano)*

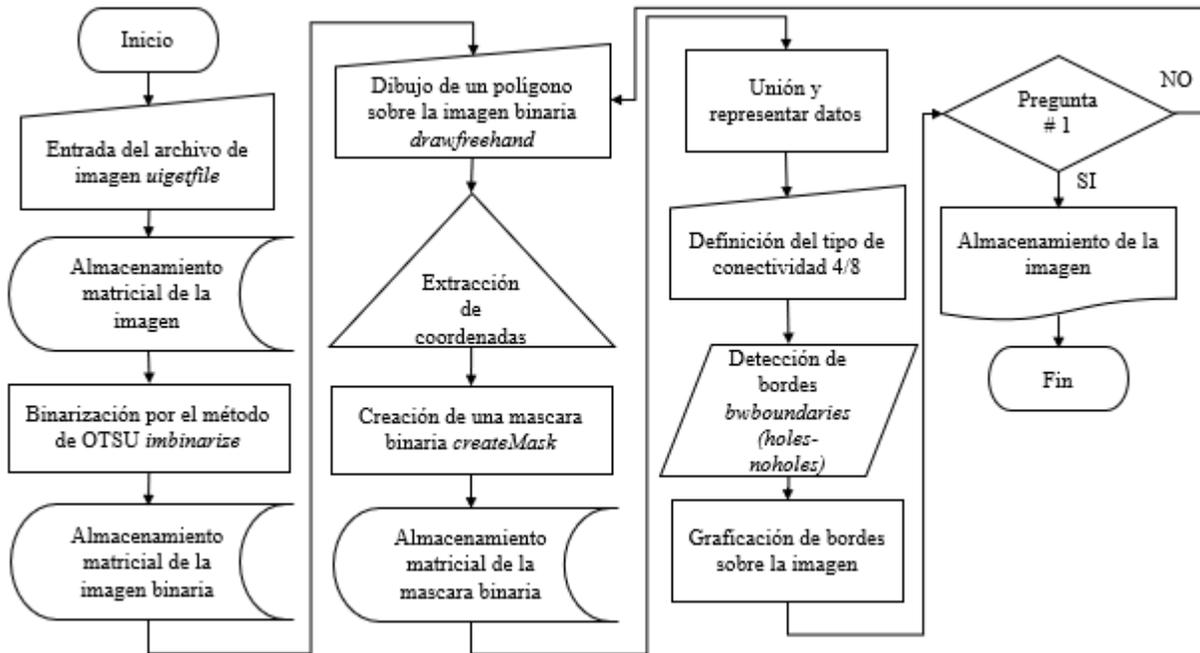


*Nota.* (a) polígono dibujado sobre la imagen segmentada; (b) máscara de representación del polígono; (c) imagen segmentada con la adición del polígono dibujado como color negro que permite dividir el grano en su morfología original.

El diagrama de flujo que representa el proceso de dibujo de formas poligonales sobre la imagen para modificar la morfología se muestra en la figura 125.

**Figura 125.**

*Diagrama de flujo del proceso dibujo refinamiento (dibujo de formas poligonales)*



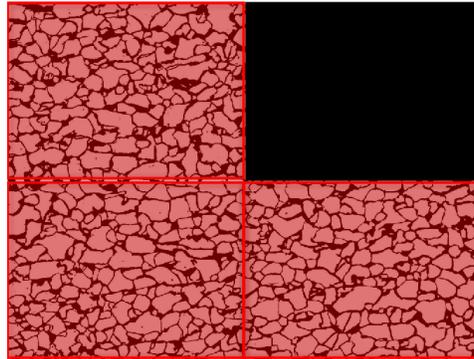
**Nota.** La entrada del archivo de imagen, el dibujo poligonal *draawfreehand* y la definición del tipo de conectividad del elementos corresponde a una entrada de datos manual. La creación de una máscara binaria se almacena de forma matricial, la cual posee el mismo tamaño de la reproducción original para realizar el reemplazo de los valores de la máscara sobre las coordenadas originales de la imagen. El resultado de la aplicación de la binarización es una imagen lógica con superposición de bordes graficados. La pregunta # 1 corresponde a: ¿con la definición de la forma poligonal se definen totalmente los granos y bordes de grano?

### 3.4.11 Fusión de fragmentos.

Permite realizar la concatenación de las partes en las cuales se fragmentó la imagen original; se almacena cada parte de la imagen de forma matricial independiente, para posteriormente ser concatenadas las matrices de representación en una sola reproducción como muestra la figura 126.

**Figura 126.**

*Unión de imágenes mediante la concatenación matricial*

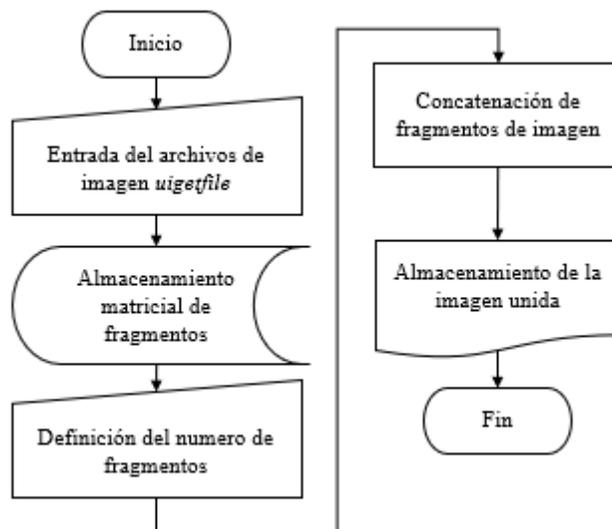


**Nota.** La figura muestra la concatenación matricial de cuatro fragmentos, donde se han unido los fragmentos [1,1], [2,1] y [2,2].

El diagrama de flujo que representa el proceso de fusión de fragmentos mediante la concatenación matricial se muestra en la figura 127.

**Figura 127.**

*Diagrama de flujo de la fusión de fragmentos de imagen (Concatenación matricial)*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen y la definición del número de fragmentos corresponde a una entrada de datos manual; dependiendo del número de fragmentos (4, 9 o 16) se define el orden de concatenación siendo [2,2], [3,3] o [4,4] respectivamente. El resultado de la aplicación de la concatenación es una imagen lógica concatenada.

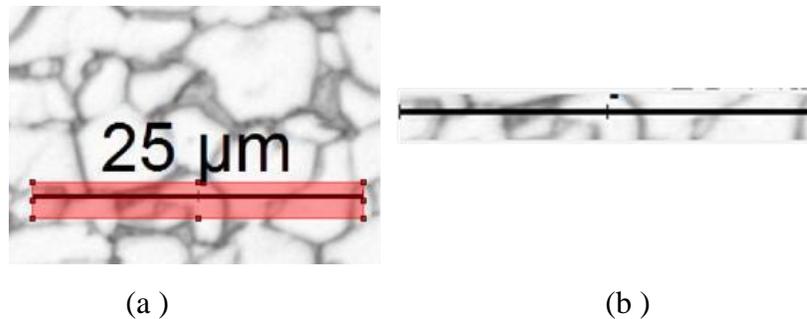
### 3.4.12 Medición de propiedades estreológicas.

Son las mediciones realizadas a partir las propiedades de región que permite la medición de áreas, la cuantificación de diámetros, el espaciamiento entre fases, el volumen en fracción y su distribución, que junto a la representación mediante histogramas y gráficos muestran la tendencia de datos.

3.4.12.a Medición de la escala de imagen. Se emplea la medición de la escala de la microscopía original para determinar el tamaño equivalente de la escala en términos de píxeles, donde se usa la función *drawrectangle* para trazar la forma de la escala y recortar el rectángulo dibujado con la función *imcrop* como ilustra la figura 128.[69], [70]

**Figura 128.**

*Recorte de la escala mediante la función drawrectangle e imcrop*



**Nota.** (a) trazo de un rectángulo sobre la escala en la imagen original usando la función *drawrectangle* (b) recorte de la imagen original usando la función *imcrop*; el recorte de la escala permite definir el número de píxeles que contiene la escala.

Al recortar la escala se divide el ancho de la imagen recortada que es un valor de cantidad de píxeles entre un valor consignado por el usuario de la magnitud en  $\mu m$ . La longitud de cada píxel se determina mediante la siguiente expresión:

$$LP = \frac{s}{R}$$

Donde:

$LP$ : longitud de un píxel

$R$ : valor del ancho en densidad de píxeles para la imagen recortada

$s$ : valor de la escala real de la imagen

Una vez definido el valor de la longitud de un píxel, se determina el área mediante la ecuación mostrada a continuación.

$$AP = LP^2$$

Donde:

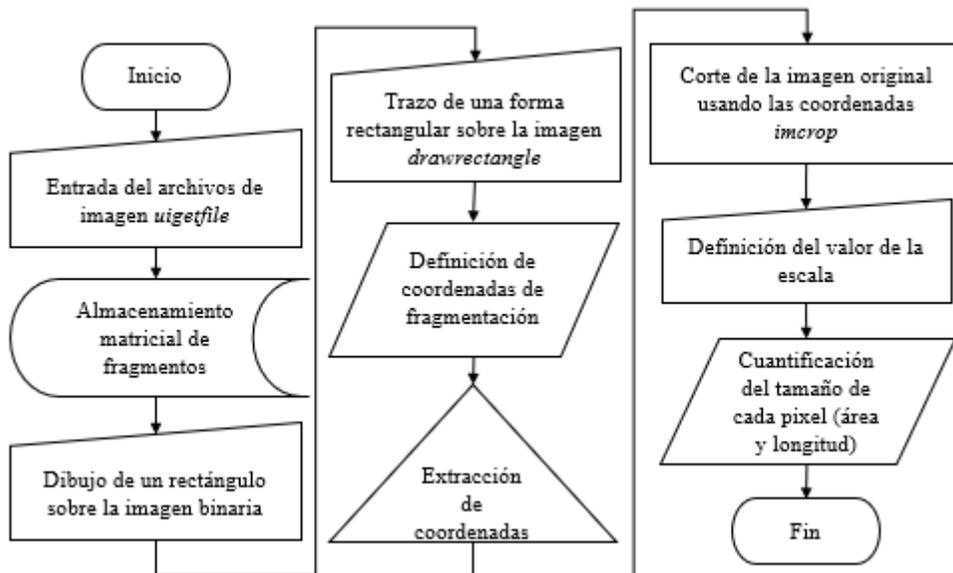
$AP$ : área de un píxel

$LP$ : longitud de un píxel

El diagrama de flujo del proceso de medición de la escala se muestra en la figura 129.

**Figura 129.**

*Diagrama de flujo del proceso de medición de la escala*



**Nota.** La entrada del archivo de imagen, la medición de la escala y el valor de magnitud corresponde a una entrada de datos manual donde la definición del valor de la escala se realiza en  $\mu m$ .

3.4.12.b Medición de tamaño de grano (áreas). Se usan las propiedades de región de área de imagen con la función *regionprops* y el criterio de filtración *area* para determinar la cantidad de píxeles en los segmentos detectados y obtener el valor de área en términos de número de píxeles; [66] con el dato de área de un píxel *AP* cuantificado en la medición de la escala de la imagen, se realiza la multiplicación de los valores del área en píxeles por el área real de la imagen en  $\mu m$  para determinar el área para cada segmento mediante la siguiente ecuación.

$$AR = AP * A$$

Donde:

*AR*: área para cada segmento o grano de la imagen

*AP*: área de un píxel

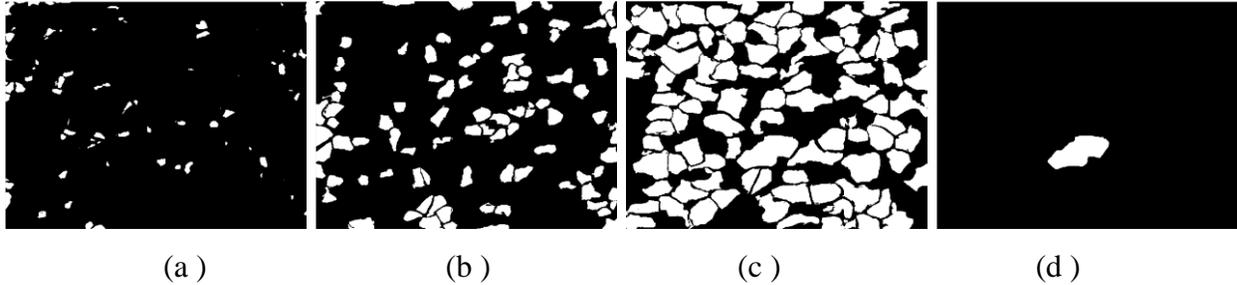
*AP*: vector que contiene las áreas de todos los elementos medidas en términos de píxel

Al definir el área para cada elemento y con el objetivo de realizar una representación gráfica del área para cada grano, se define un valor de etiquetas para distribuir la cantidad de granos sobre el número definido y poder representar cada elemento con un color usando la función *colormap*. [84]

Para realizar la representación se organizan los valores de área en un vector de forma ascendente, se divide el vector de áreas en la cantidad de etiquetas definida con un espaciamiento equidistante entre mediciones, para crear un vector de etiquetas donde se usa la función *bwpropfilt* y el criterio de filtración *area* para filtrar las áreas en orden ascendente entre un valor máximo y mínimo y asignarle el valor máximo de cada etiqueta a cada elemento. La filtración y asignación de etiquetas se muestra en la figura 130 donde se emplean 4 etiquetas para representar los granos de la imagen. [85]

**Figura 130.**

*Filtración de la imagen original por tamaño de área para 4 etiquetas*

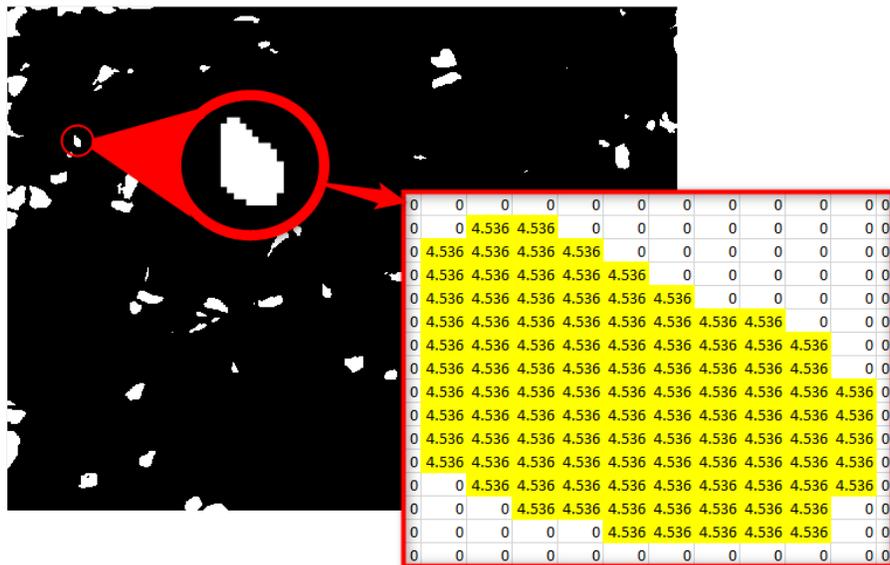


**Nota.** (a) áreas representativas de la imagen entre  $0.0080\mu\text{m}^2$  y  $4.5360\mu\text{m}^2$ ; (b) áreas representativas de la imagen entre  $4.5360\mu\text{m}^2$  y  $15.2663\mu\text{m}^2$ ; (c) áreas representativas de la imagen entre  $15.2663\mu\text{m}^2$  y  $80.5485\mu\text{m}^2$ ; (d) áreas representativas de la imagen entre  $80.5485\mu\text{m}^2$  y  $80.5485\mu\text{m}^2$ . La asignación de etiquetas se realiza usando el valor máximo del intervalo de área.

La figura 131 muestra la asignación de la primera etiqueta mostrada en la figura 130 (a).

**Figura 131.**

*Asignación del primer valor de etiqueta para los segmentos blancos de la figura 129 (a)*

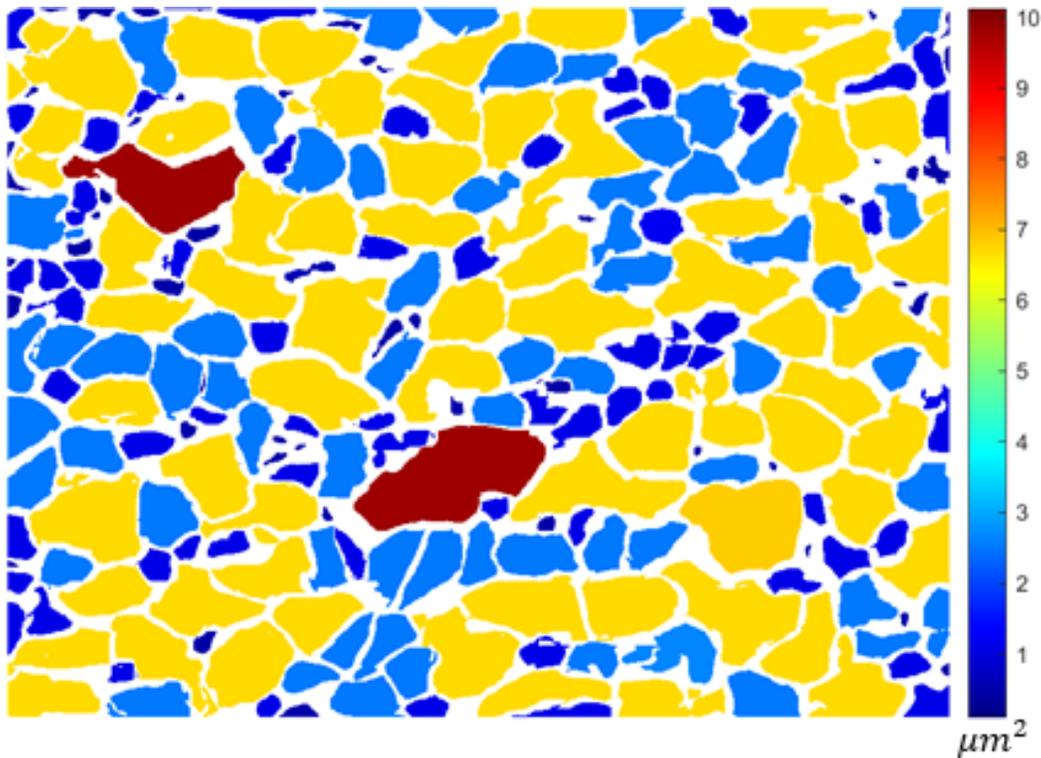


**Nota.** La figura muestra la asignación del valor  $4.536\mu\text{m}^2$  (valor máximo de la primera etiqueta de intervalo de área) a un elemento filtrado por la función *bwpropfilt* y el criterio *area*; la asignación de la etiqueta se realiza a todos los elementos de color blanco visibles en la figura.

Al realizar el etiquetado de los segmentos se emplea la función *bwconncomp*, *labelmatrix*, *label2rgb* y *colormap* para representar los granos considerando una escala de referencia “*jet*” e independizar los granos del fondo de la imagen; la gráfica de área para cada grano se representa en la figura 132.[86] [84]

**Figura 132.**

*Representación del área de grano en  $\mu\text{m}^2$*

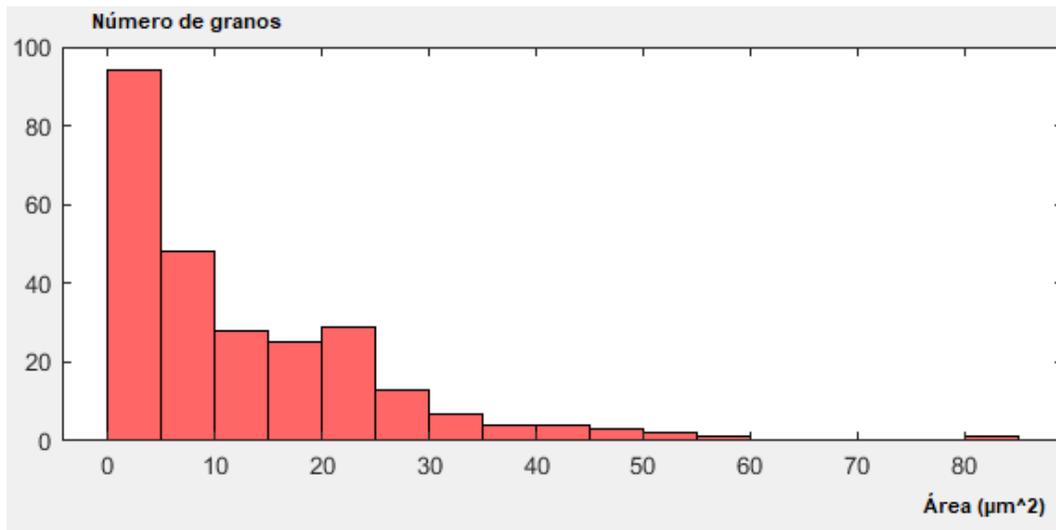


*Nota.* La figura representa el área de grano medida en  $\mu\text{m}^2$  empleando 4 colores de etiquetas para representar la medición.

Para realizar la muestra de datos se emplea un histograma de distribución como el de la figura 133 que muestra la distribución de datos de cantidad de granos en función de la medición de área en  $\mu\text{m}^2$  empleando la función *imhist* [87]

**Figura 133.**

*Histograma de distribución de resultados (áreas)*

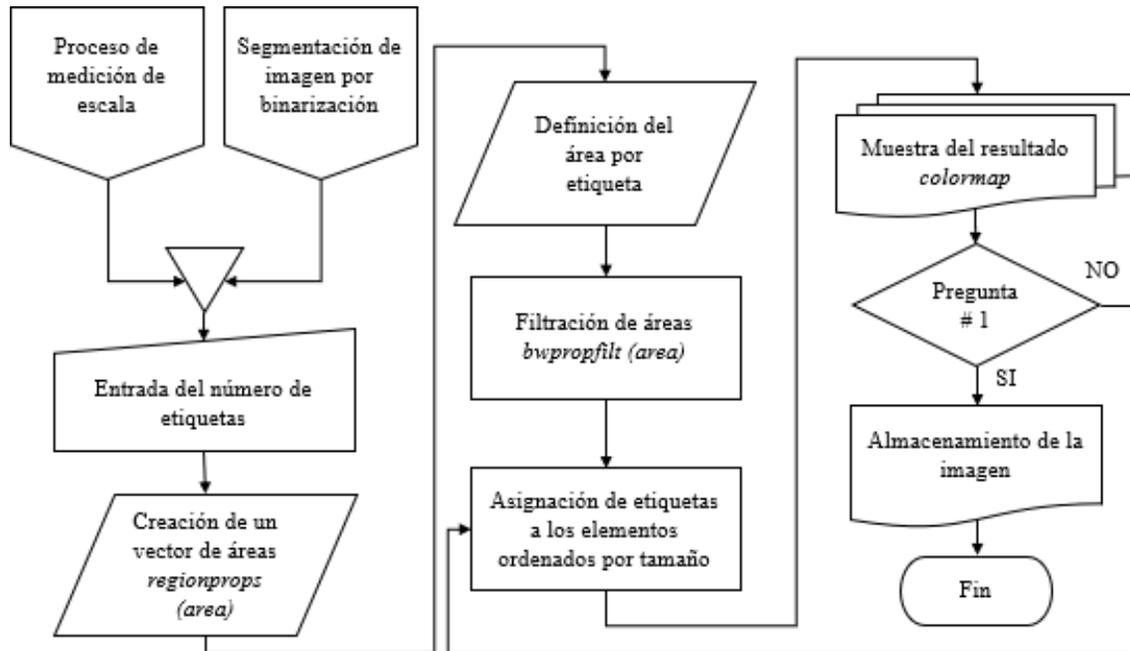


**Nota.** la distribución de datos muestra la cantidad de granos que poseen áreas dentro de intervalos de áreas de grano medidas en  $\mu m^2$

La figura 134 muestra el diagrama de flujo del proceso de aplicación de la medición de áreas.

**Figura 134.**

*Diagrama de flujo del proceso de medición de áreas*



*Nota.* El conector del proceso de medición de escala y segmentación de imagen por binarización se realiza en otras etapas del proceso general, la definición del número de etiquetas se realiza mediante una entrada de datos manual; es un valor entero positivo > 0 el cual no puede exceder el número de elementos en la imagen para evitar mayor costo computacional. La muestra de resultados se realiza mediante un histograma de distribución de áreas y una gráfica de color. La pregunta #1 corresponde a: ¿con el número de etiquetas definido puede representar adecuadamente el tamaño de grano con la grafica de color considerando el histograma creado?

3.4.12.c Medición de tamaño de grano (diámetro). Permite medir el diámetro de la morfología de grano usando la propiedad de región de diámetro equivalente, la cual cuantifica el diámetro de un círculo usando el área de los segmentos en términos de píxel empleando la ecuación mostrada a continuación.

$$DP = \sqrt{\frac{4 * AS}{\pi}}$$

Donde:

*DP*: diámetro en términos de píxeles

*AS*: área de cada segmento en términos de píxeles

Al definir el valor de diámetro en términos de píxel se calcula el diámetro real mediante la siguiente expresión:

$$DR = DP * LP$$

Donde:

*DR*: diámetro real del grano en términos de la escala definida

*DP*: diámetro en términos de píxeles

*LP*: longitud de un píxel en términos de la escala definida

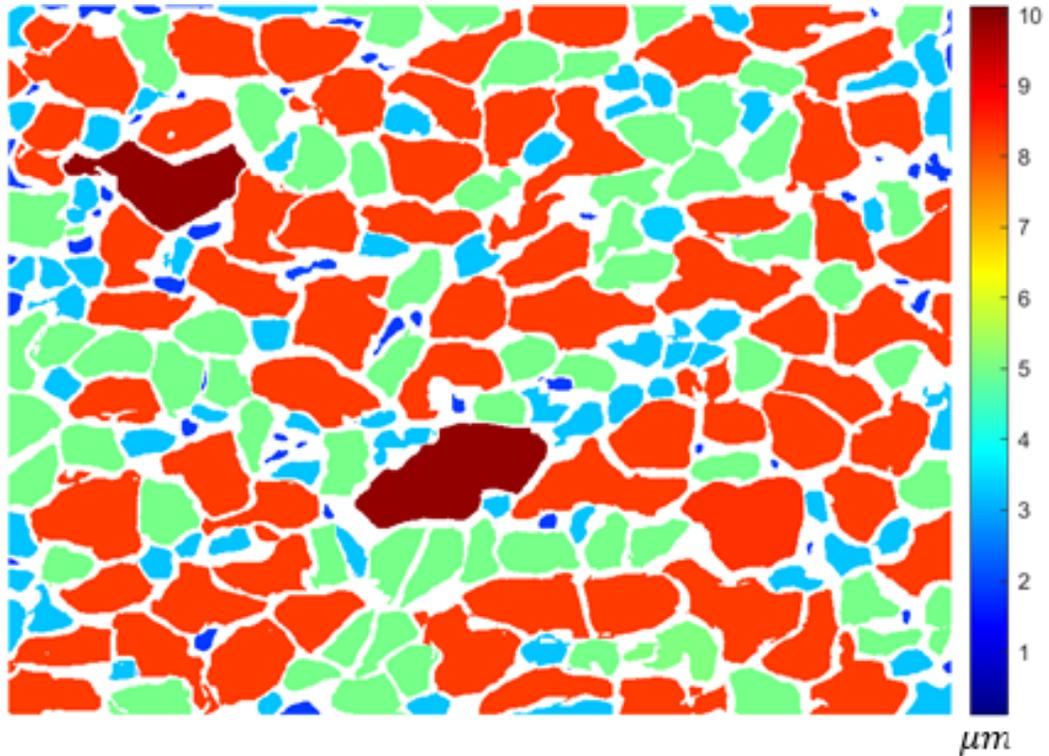
Al definir el diámetro para cada elemento y con el objetivo de realizar una representación gráfica del diámetro para cada grano, se define un valor de etiquetas para distribuir la cantidad de granos sobre el número definido y poder representar cada elemento con un color usando la función `colormap`. [84]

Para realizar la representación se organizan los valores de diámetro en un vector de forma ascendente, se divide el vector de diámetros en la cantidad de etiquetas definida con un espaciamiento equidistante entre mediciones para crear un vector de etiquetas donde se usa la función `bwpropfilt`, y el criterio de filtración *diameter* para filtrar los diámetros en orden ascendente entre un valor máximo y mínimo y asignarle el valor máximo de cada etiqueta a cada elemento como se describió en la medición del tamaño de grano (áreas). [86]

La gráfica de diámetro para cada grano se representa en la figura 135.

**Figura 135.**

*Representación del diámetro de grano en  $\mu m$*

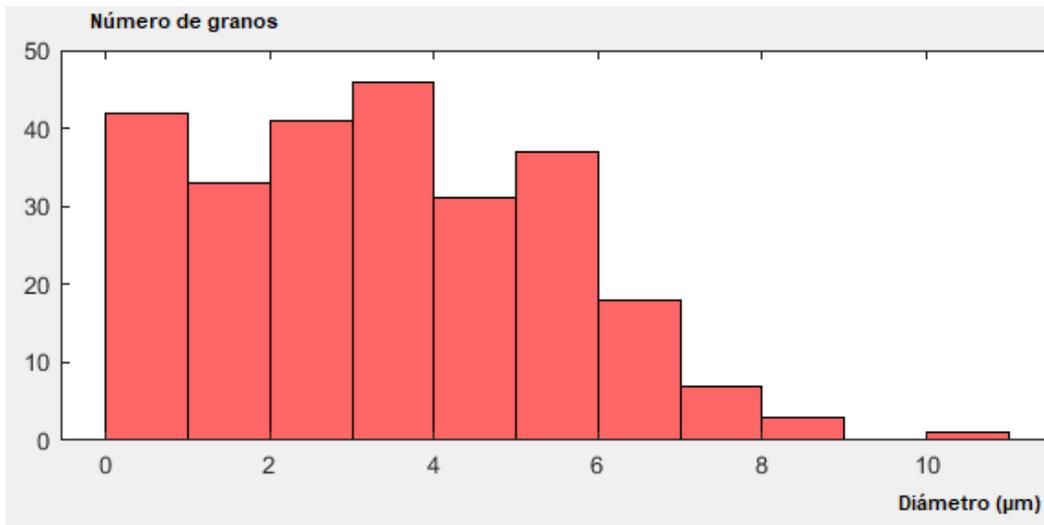


**Nota.** La figura representa el diámetro de grano medido en  $\mu m$  empleando 4 colores de etiquetas para representar la medición.

Para realizar la muestra de datos se emplea un histograma de distribución como el de la figura 136 que muestra la distribución de datos de cantidad de granos en función de la medición de diámetro en  $\mu m$  empleando la función *imhist*. [87]

**Figura 136.**

*Histograma de distribución de resultados (diámetros)*

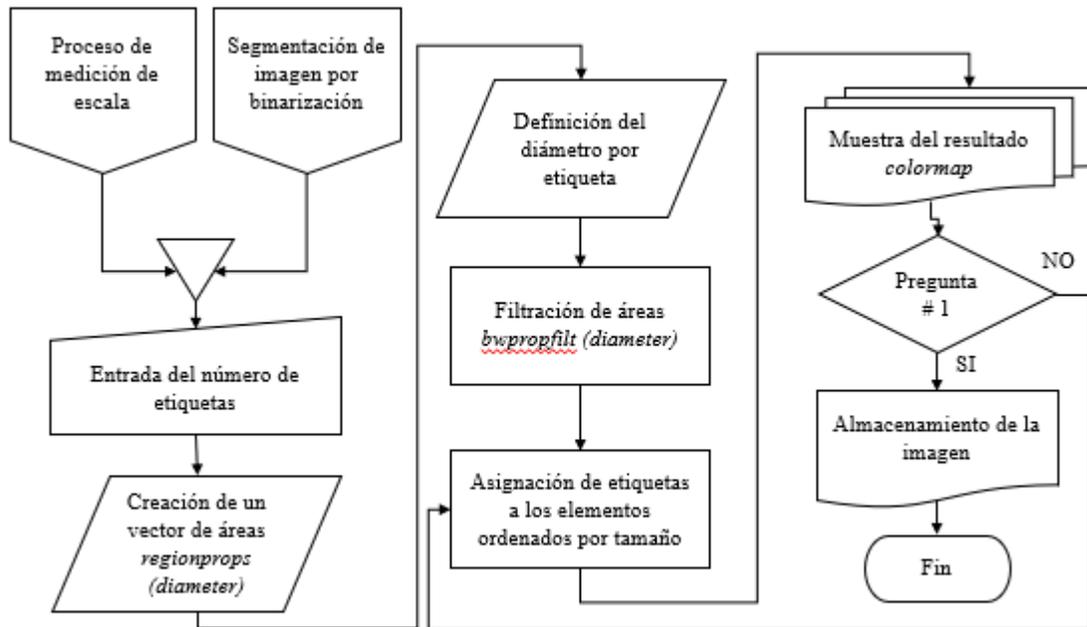


**Nota.** la distribución de datos muestra la cantidad de granos que poseen diámetros dentro de intervalos de diámetros de grano medidos en  $\mu\text{m}$ .

La figura 137. muestra el diagrama de flujo del proceso de aplicación de la medición de áreas.

**Figura 137.**

*Diagrama de flujo del proceso de medición de diámetros*



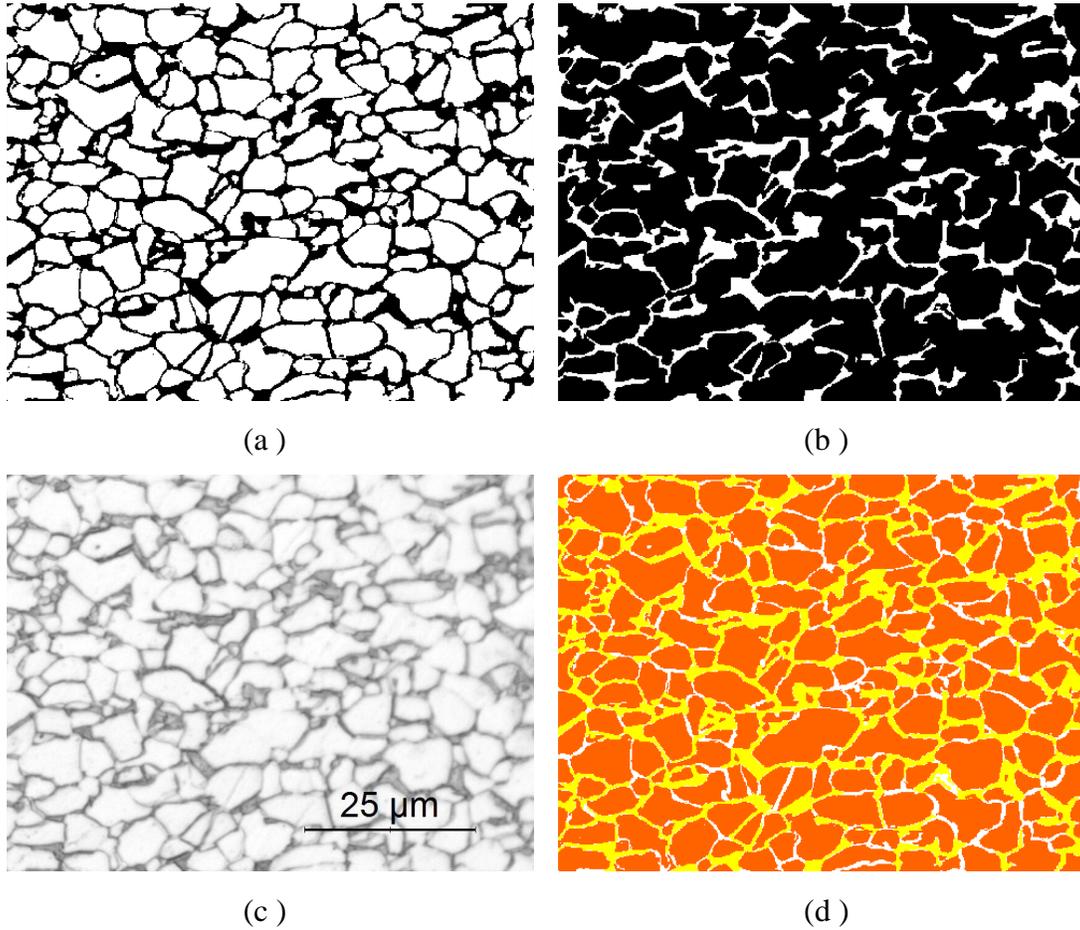
**Nota.** El conector del proceso de medición de escala y segmentación de imagen por binarización se realiza en otras etapas del proceso general, la definición del número de etiquetas se realiza mediante una entrada de datos manual; es un valor entero positivo  $> 0$  el cual no puede exceder el número de elementos en la imagen para evitar mayor gasto computacional, la muestra de resultados se realiza mediante un histograma de distribución de áreas y una gráfica de color. La pregunta #1 corresponde a: ¿con el número de etiquetas definido puede representar adecuadamente el tamaño de grano con la gráfica de color considerando el histograma de datos?

3.4.12.d Medición del volumen en fracción y distribución de fase. permite medir la cantidad en porcentaje de constituyentes o fases presentes en la imagen. Se unen dos imágenes las cuales contienen la información de cada una de las fases presentes y mediante ciclos iterativos píxel a píxel asigna un valor de representación o color para cada fase siendo  $n_1$  y  $n_2$  los valores de primera y segunda fase respectivamente donde  $n_1 \neq n_2$ ; para este fin se usa la función *imcomplement*, [76] para tratar mediante filtros la reproducción y enfatizar la segmentación de la segunda fase. La muestra del color se realiza mediante la función *colormap* [84]

La figura 138 muestra las fases independientes junto a la unión de fases.

**Figura 138.**

*Fases presentes en un acero de doble fase*



**Nota.** (a) segmentación de la fase principal “ferrita”; (b) segmentación de la fase secundaria “martensita”; (c) microscopía original; (d) unión de segmentaciones de fase y asignación de color. La fase amarilla representa la martensita, la fase naranja la fase ferrita y los segmentos blancos bordes de grano detectados.

Al realizar la unión de fases se cuentan los elementos de color blanco en las segmentaciones de fase y se determina el porcentaje de dichas fases, considerando la totalidad de datos en la matriz de representación mediante las expresiones mostradas a continuación:

$$\% f_i = \frac{P_i}{P_t} * 100\%$$

Donde:

$\% f_i$ : porcentaje de la fase de interés presente en la imagen

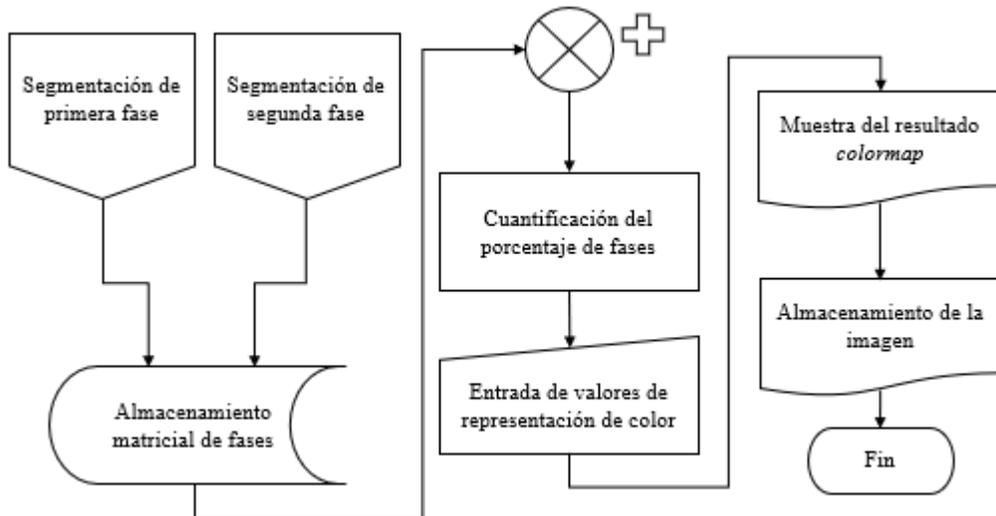
$P_i$ : cantidad de elementos en la matriz de representación iguales al valor de la fase de interés

$P_t$ : totalidad de elementos en la matriz de representación

El diagrama de flujo que representa la cuantificación del volumen en fracción de las fases presentes se muestra en la figura 139.

**Figura 139.**

*Diagrama de flujo del proceso de cuantificación del volumen en fracción.*



**Nota.** El conector del proceso de segmentación de primera y segunda fase se realiza en otras etapas del proceso general. La definición de valores de representación se realiza mediante una entrada de datos manual; los valores deben ser dos números enteros positivos donde  $n_1 \neq n_2$  (valores de primera y segunda fase respectivamente); el resultado del procesos es una imagen de representación de fases RGB almacenada.

3.4.12.e Espaciamiento entre fases. Permite medir la longitud entre fases usando ciclos iterativos; la operación recorre la totalidad de las filas de la reproducción realizando un conteo de la cantidad de píxeles entre la fase de interés (conteo de elementos negros en la imagen o valores iguales a 0

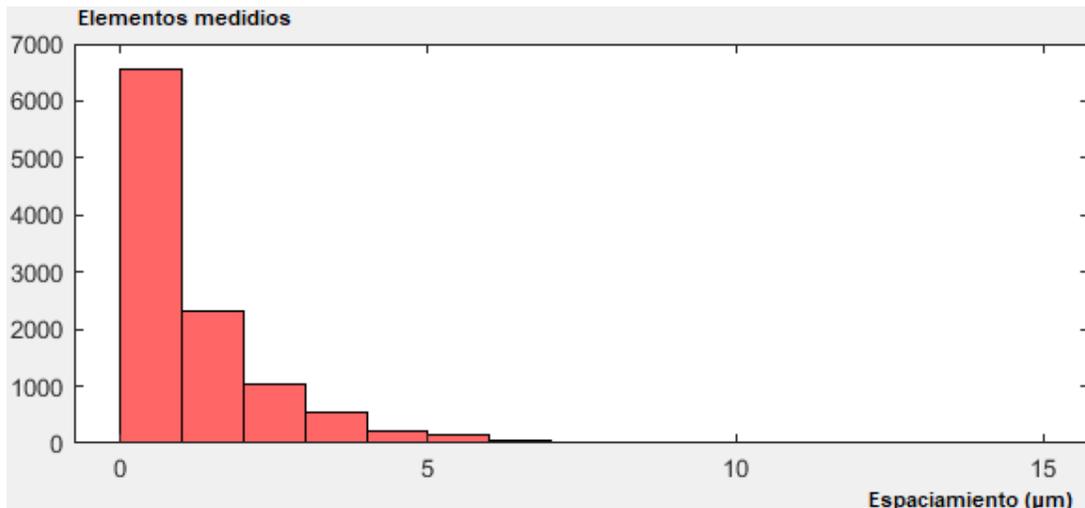
en la matriz de representación). Este conteo se almacena en un vector de espaciamento entre fases de tamaño  $[n, 1]$  donde  $n$  representa la cantidad de elementos contados.

Se usa el factor  $LP$  (longitud de un píxel en términos de la escala definida) para determinar la longitud de cada espaciamento medido.

Para realizar la muestra de datos, se emplea un histograma de distribución como el de la figura 140 que muestra la distribución de datos de cantidad de mediciones tomadas en función de la longitud empleando la función *imhist*. [87]

**Figura 140.**

*Histograma de distribución de resultados (espaciamento entre fases)*

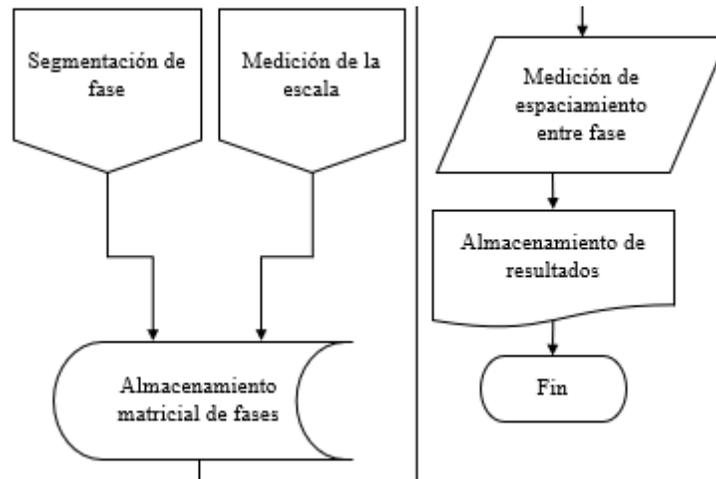


**Nota.** la distribución de datos muestra la cantidad de mediciones realizadas que poseen longitudes dentro de intervalos de diámetros de grano medidos en  $\mu\text{m}$ . La cantidad de mediciones es un dato de referencia ajeno a la cantidad de granos de la muestra; se usa exclusivamente como referencia para la toma de mediciones.

El diagrama de flujo del proceso de medición del espaciamento entre fase se muestra en la figura 141.

**Figura 141.**

*Diagrama de flujo del proceso de medición de espaciamiento entre fase*



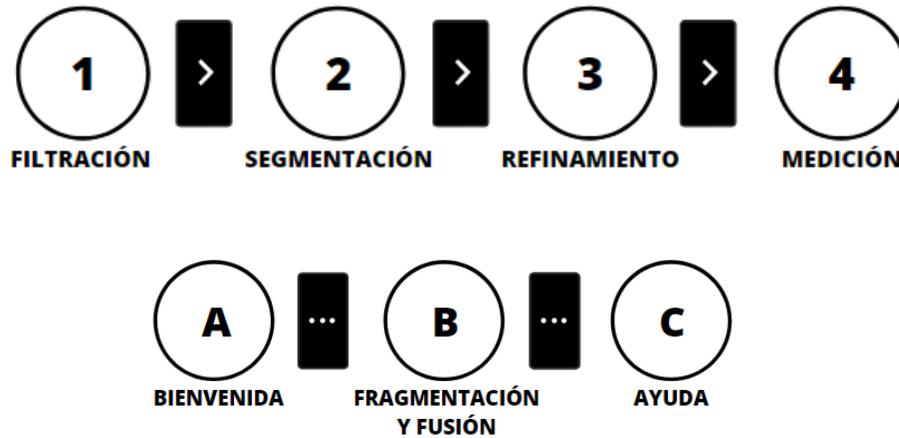
*Nota.* El conector del proceso de segmentación de fase y medición de la escala se realiza en otras etapas del proceso general. Los valores medidos del espaciamiento entre fase se almacenan en un vector, el cual se multiplica por la distancia real de cada pixel medida a partir de la definición de la escala usando el factor  $DR$ . El almacenamiento de resultados se realiza mediante las imágenes de distribución de histogramas.

### 3.5 Interfaz de usuario

Para realizar la aplicación de las herramientas del procesamiento digital de imágenes se desarrolló una interfaz gráfica que permite implementar las herramientas de filtración, segmentación y medición. La figura 142 describe un esquema de las etapas de la interfaz gráfica y las herramientas opcionales para facilitar el proceso de implementación.

**Figura 142**

*Etapas de la implementación usando una interfaz de usuario*



*Nota.* Cada etapa comprende una ventana de implementación en el software MATLAB® usando la interfaz gráfica GUI de las herramientas para realizar el procesamiento de la imagen digital; las etapas 1, 2, 3 y 4 son el proceso fundamental en la implementación de la herramienta, las etapas A, B y C son complementos de soporte a las etapas principales.

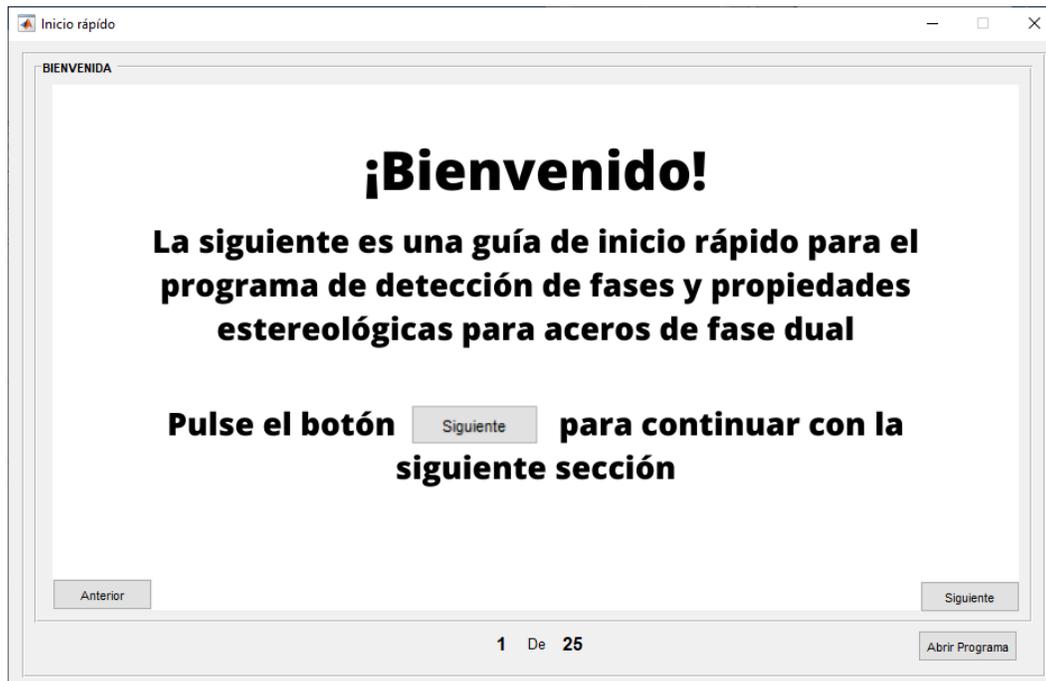
Las ventanas de la interfaz gráfica o interfaz de usuario se explican a continuación:

### **3.5.1 Bienvenida.**

Es la ventana de inicio del programa donde se realiza la explicación de los componentes de las distintas funciones mediante una ayuda visual, para guiar al usuario en la manipulación de las herramientas del procesamiento digital de imágenes y los procesos de medición. Esta ventana se ilustra en la figura 143.

**Figura 143.**

*Ventana de bienvenida (Inicio rápido)*



*Nota.* La ventana de bienvenida guiará al usuario en el entendimiento de los elementos del programa computacional.

### 3.5.2 Filtración.

La ventana de filtración de imágenes permite filtrar las reproducciones mostrando resultados visuales durante la manipulación de histogramas y filtrados del dominio espacial para la distinción de bordes de la imagen. Esta ventana se ilustra en la figura 144.

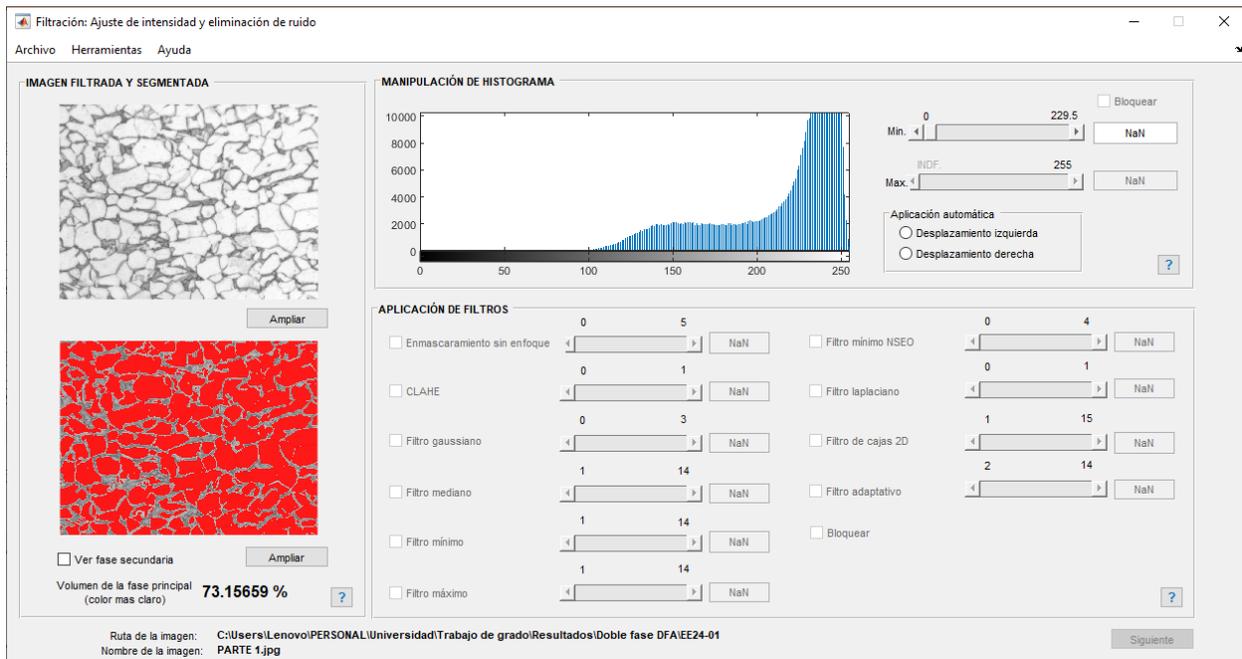
Así mismo incorpora la medición de la composición y la segmentación *clustering K-means* para guiar al usuario respecto al resultado obtenido involucrando las funciones de filtración:

- Manipulación de histograma.
- Filtro de enmascaramiento sin enfoque.
- Ecuador de histograma adaptativo.
- Filtro gaussiano.
- Filtro mediano.
- Filtro mínimo.

- Filtro máximo.
- Filtro mínimo por vecindad.
- Filtro laplaciano.
- Filtro de cajas 2D.
- Filtro adaptativo.

**Figura 144.**

*Ventana de filtración (ajuste de intensidad y eliminación de ruido)*



**Nota.** La ventana incorpora todas las filtraciones del dominio espacial, la segmentación *clustering K-means*, la cuantificación del volumen en fracción y gráfica de histograma de intensidad de imagen que se actualizan en cada aplicación de los filtros; cada segmento marcado en negrita posee un acceso al panel de ayuda y manual de usuario de la interfaz.

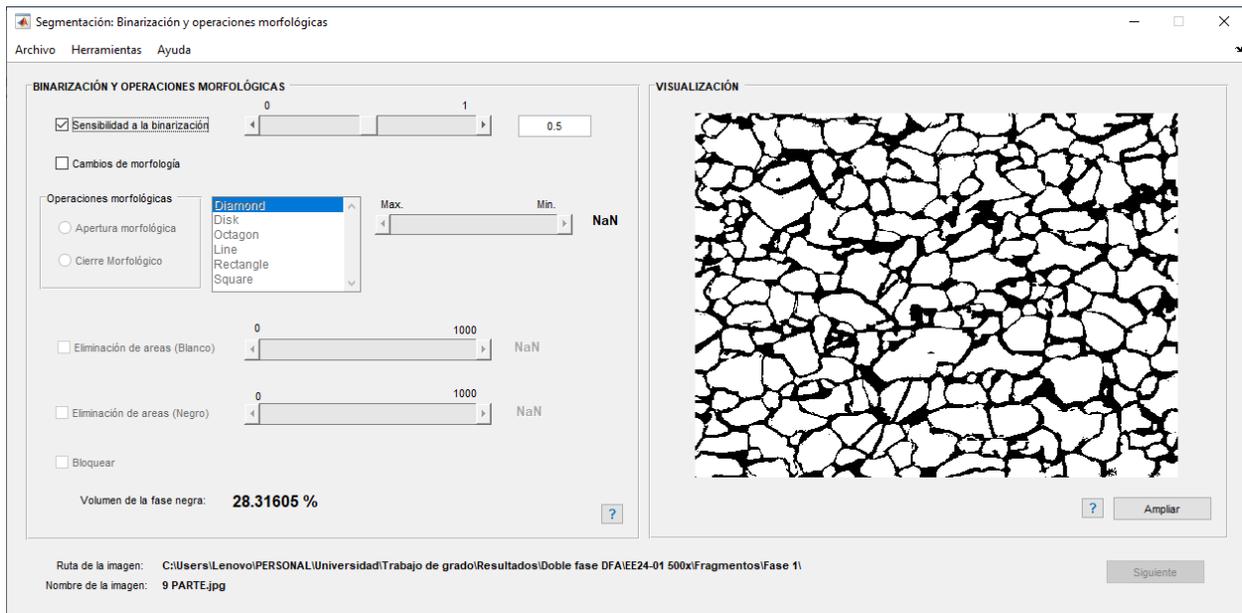
### 3.5.3 Segmentación.

Permite realizar una segmentación para la imagen mediante el método de umbralización y cuantifica las composición de fases; esta ventana se ilustra en la figura 145 e incorpora las funciones:

- Binarización adaptativo por el método de umbralización de OTSU.
- Representación invertida de la binarización.
- Aplicación de erosión morfológica.
- Ampliación de dilatación morfológica.
- Eliminación de áreas dentro de la imagen.

**Figura 145.**

*Ventana de segmentación (binarización y operaciones morfológicas)*



**Nota.** La ventana incorpora la modificación de la morfología en una visualización en tiempo real y del volumen en fracción de fase que se modifica durante las operaciones realizadas.

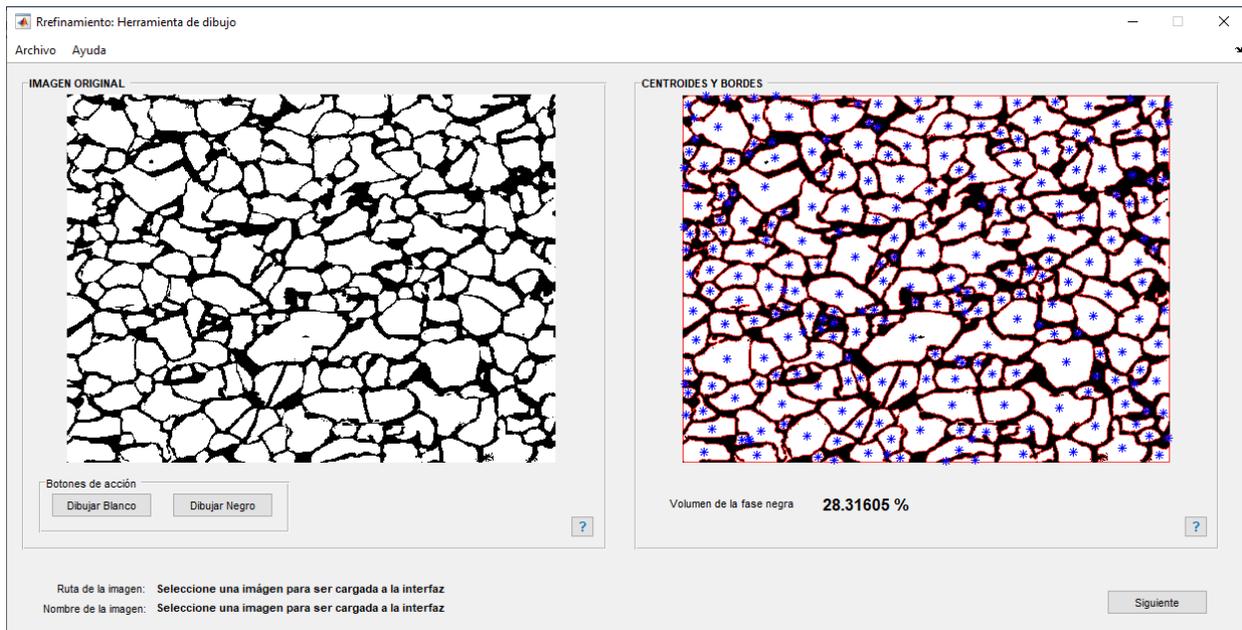
### 3.5.4 Herramienta de dibujo (refinamiento).

Permite realizar un refinamiento mediante el dibujo de formas poligonales dentro de la imagen para dibujar segmentos de interés, mostrando bordes y centroides; esta ventana se muestra en la figura 146 e incorpora las funciones:

- Detección y gráfica de centroides.
- Detección y gráfica de bordes.
- Dibujo de segmentos blancos.
- Dibujo de segmentos negros.

**Figura 146.**

*Ventana de refinamiento (herramienta de dibujo)*



**Nota.** La ventana comprende una visualización de los bordes y centroides de grano donde se realiza un dibujo poligonal sobre la imagen original (izquierda), para dibujar de forma libre segmentos de primera o segunda fase.

### 3.5.5 Medición.

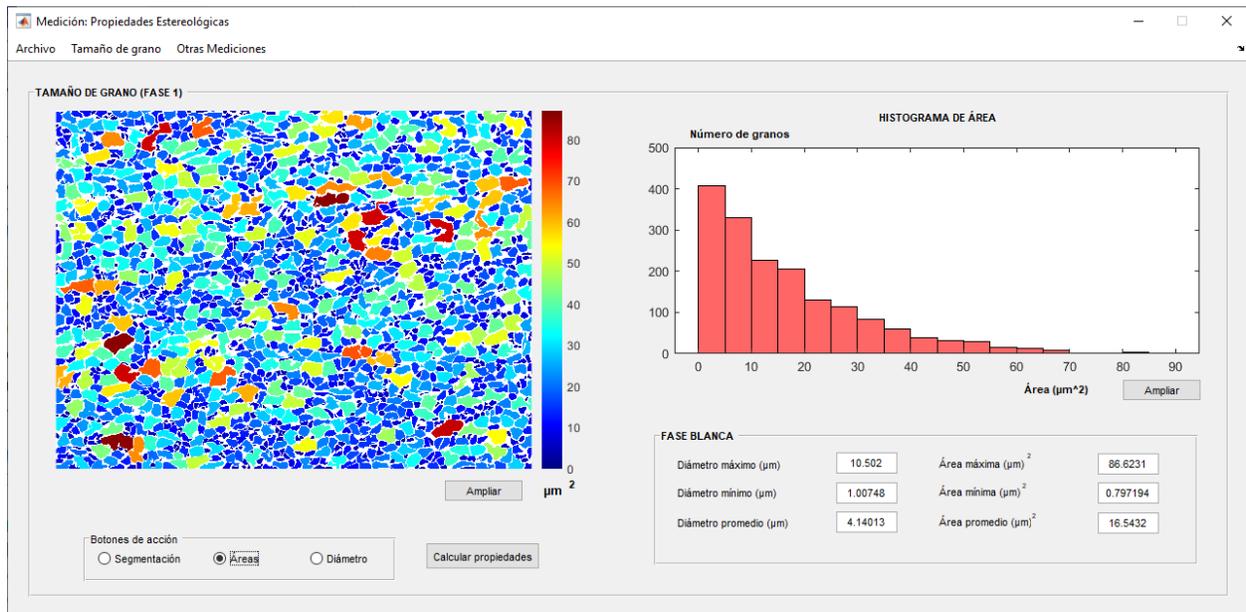
Permite realizar las mediciones correspondientes de la microestructura e involucra las funciones:

- Medición de áreas.
- Medición de diámetros.
- Conteo de granos.
- Cuantificación de volumen en fracción.
- Espaciamiento entre fases.

La figura 147 muestra la visualización de las mediciones de tamaño de grano usando el área de la formas detectadas.

**Figura 147.**

*Ventana de medición (propiedades estereológicas – área)*

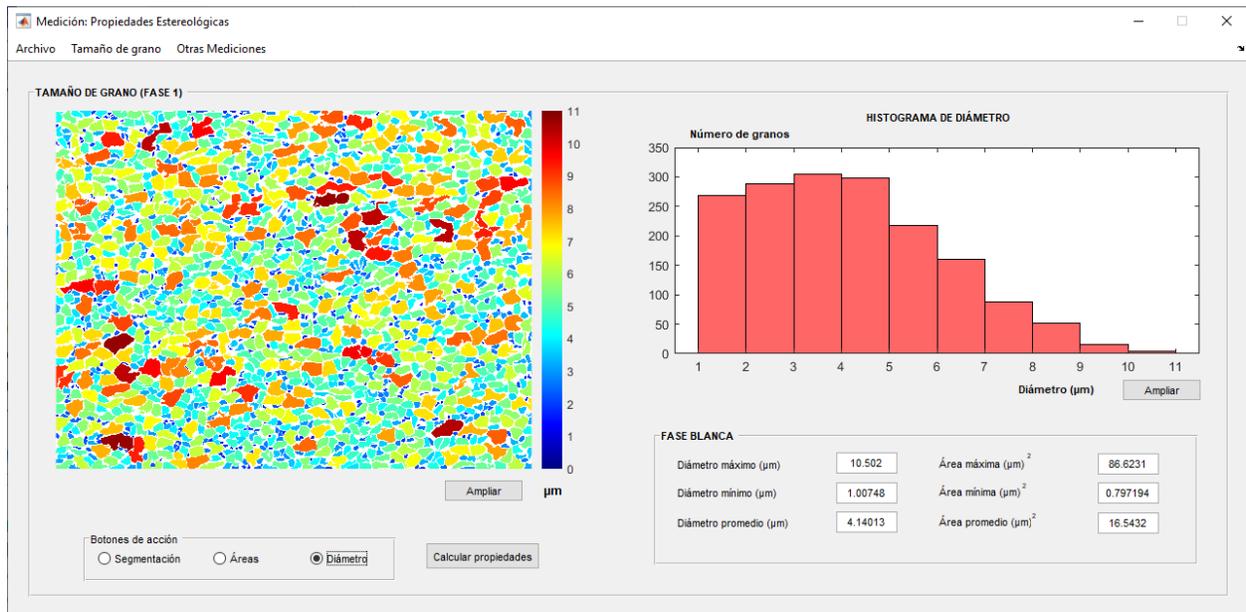


**Nota.** La muestra de resultados se realiza mediante una gráfica de color que muestra el área de grano con su respectiva escala en  $\mu m^2$ , una gráfica de histograma que representa la distribución de datos de número de granos, en función del área medida en  $\mu m^2$  y datos de referencia de la muestra (área mínima en  $\mu m^2$ , área máxima en  $\mu m^2$  y área promedio en  $\mu m^2$ )

La figura 148 muestra la visualización de las mediciones de tamaño de grano usando el diámetro equivalente a un círculo de las formas detectadas.

**Figura 148.**

*Ventana de medición (propiedades estereológicas – diámetro)*

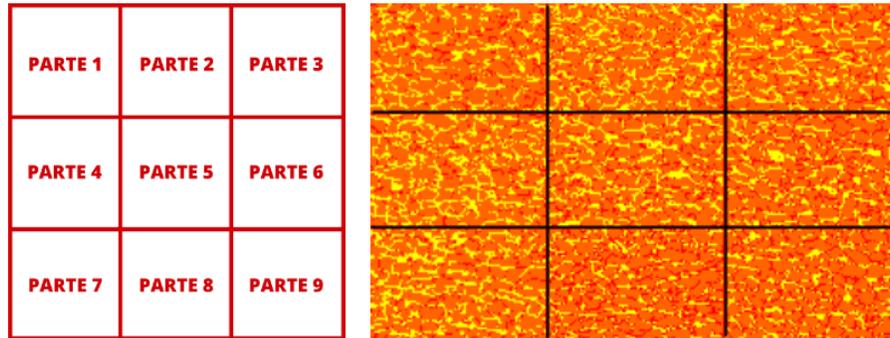


**Nota.** La muestra de resultados se realiza mediante una gráfica de color que muestra el tamaño de grano con su respectiva escala en  $\mu m$ , una gráfica de histograma que representa la distribución de datos de número de granos, en función del diámetro medido en  $\mu m$  y datos de referencia de la muestra (diámetro mínimo en  $\mu m$ , diámetro máximo en  $\mu m$  y diámetro promedio en  $\mu m$ ).

La visualización de las mediciones del volumen en fracción de fases y la distribución de fases realiza una partición de la microestructura en 9 fragmentos, donde la nomenclatura de partes se muestra en la figura 149.

**Figura 149.**

*Nomenclatura de fragmentos para la distribución de fases*

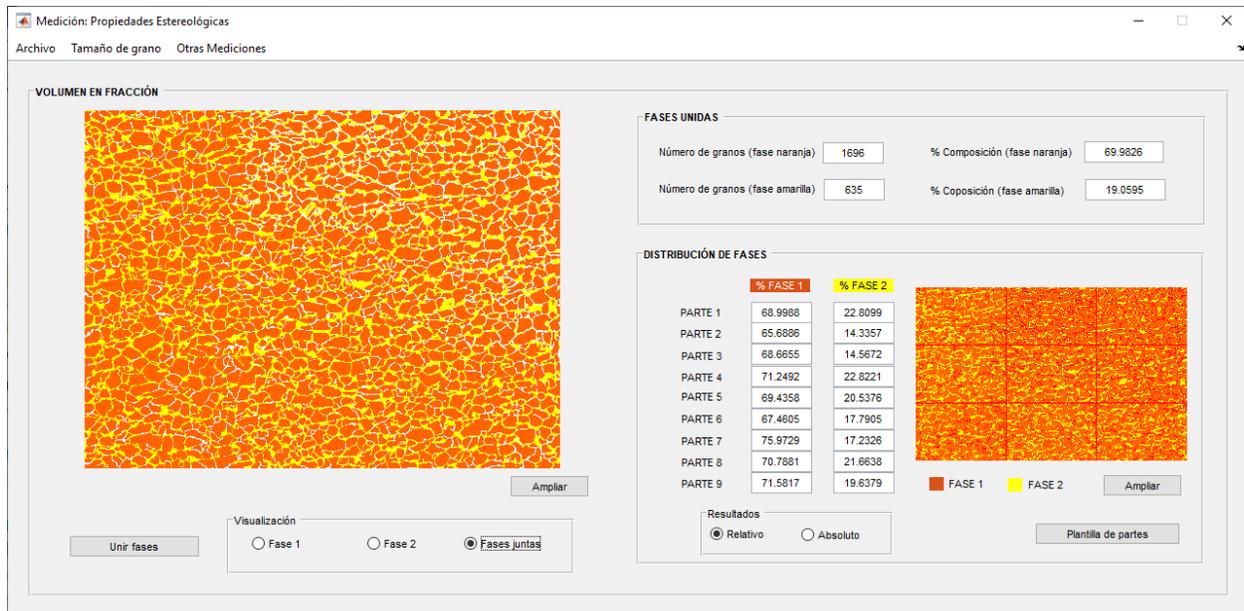


**Nota.** La muestra de resultados se realiza mostrando el volumen en fracción de fases general y específica de cada segmento de forma independiente.

La figura 150 muestra la visualización de las mediciones del volumen en fracción para la microscopía.

**Figura 150.**

*Ventana de medición (propiedades estereológicas – volumen en fracción y distribución de fase)*

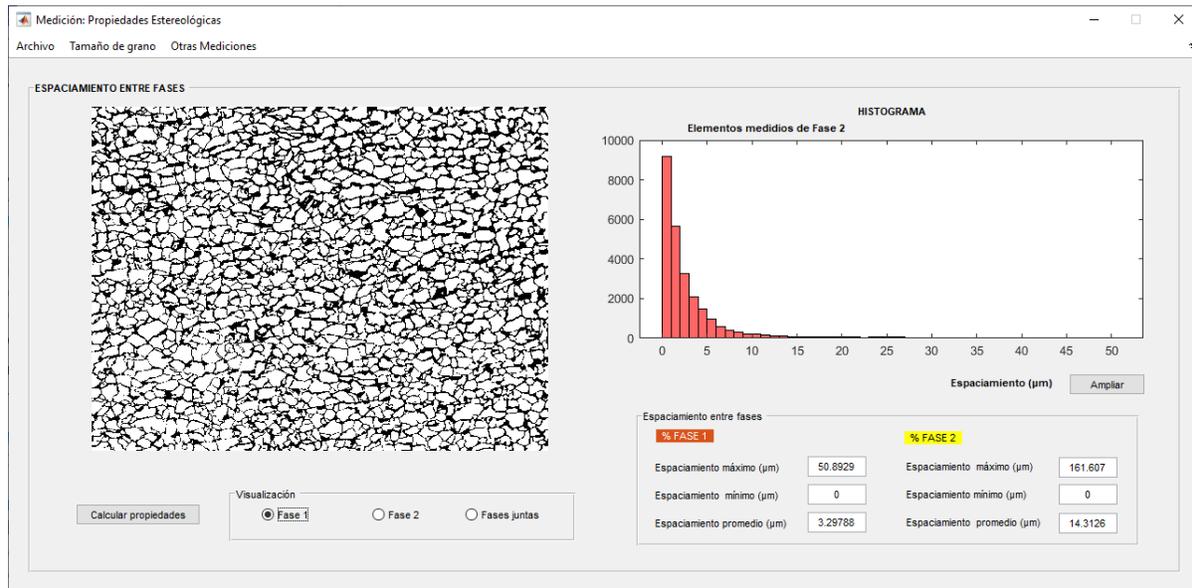


**Nota.** La ventana muestra la distribución de fases de forma relativa y absoluta considerando el volumen en fracción global de la muestra. Además, muestra la cuantificación de la cantidad de granos para cada constituyente.

La figura 151 muestra la visualización del espaciamiento entre fases de la microestructura junto al histograma de mediciones en función de la longitud del espaciamiento.

**Figura 151.**

*Ventana de medición (propiedades estereológicas – Espaciamiento entre fase)*



**Nota.** La ventana muestra la distribución de fases de forma relativa y absoluta considerando el volumen en fracción global de la muestra. Además, muestra la cuantificación de la cantidad de granos para cada constituyente.

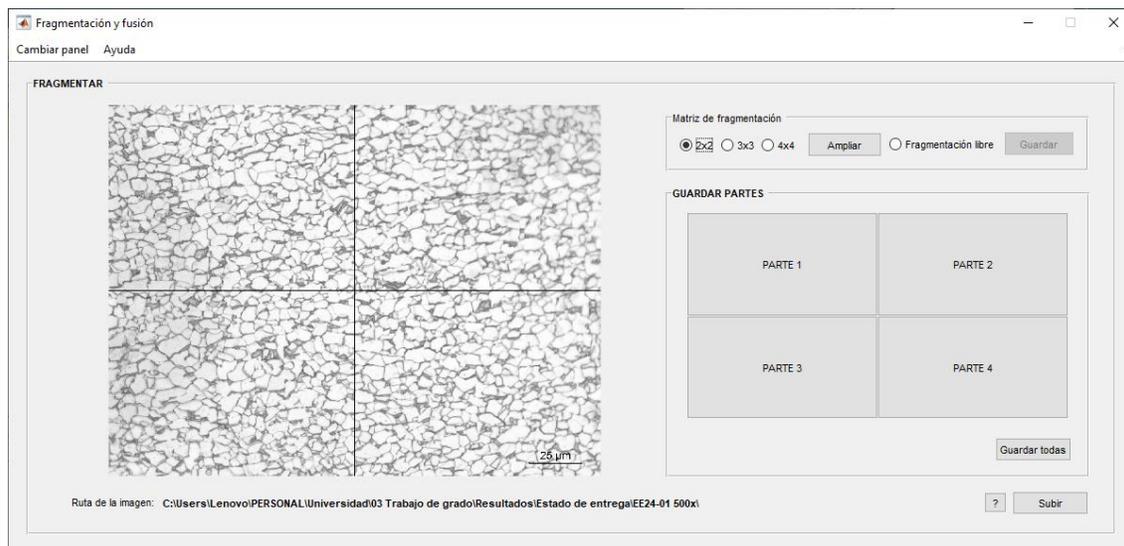
### 3.5.6 Fragmentación y fusión.

La fragmentación permite realizar la división de una imagen en fragmentos para ser tratados en procesos de filtración y segmentación. Esta ventana se ilustra en la figura 152.

Por otro lado, la fusión permite concatenar fragmentos de imagen en una única reproducción; el objetivo es unificar los fragmentos filtrados, segmentados y refinados de forma independiente. Esta ventana se ilustra en la figura 153.

**Figura 152.**

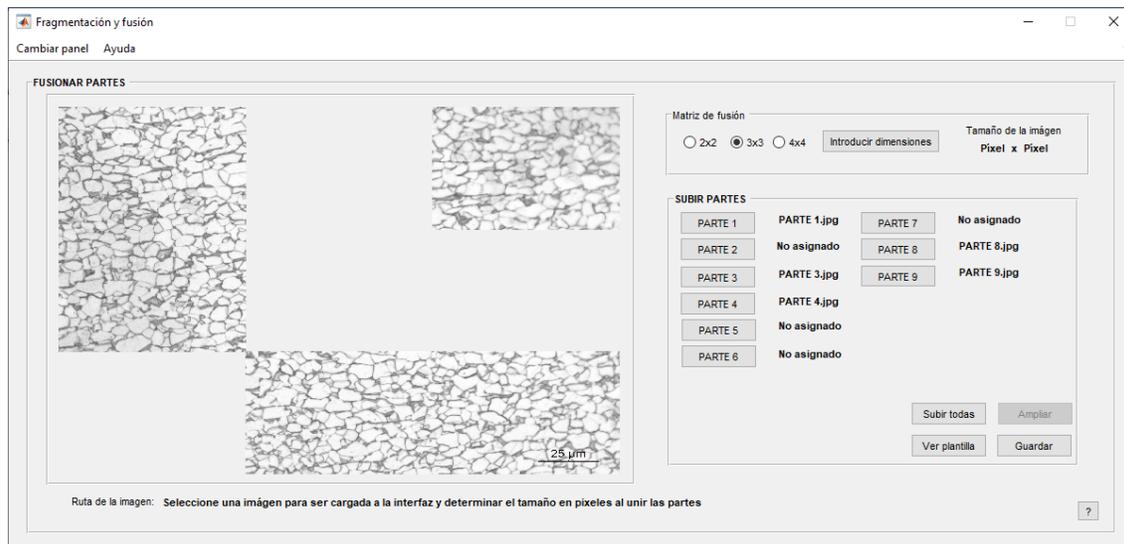
*Ventana de fragmentación y fusión (fragmentación de imagen)*



**Nota.** La fragmentación de imágenes permite dividir en diferentes partes la imagen original. Se presenta una ventana de visualización de la partición de la reproducción original y la posibilidad de guardar cada parte de manera secuencial o de forma independiente.

**Figura 153.**

*Ventana de fragmentación y fusión (fusión de imágenes)*

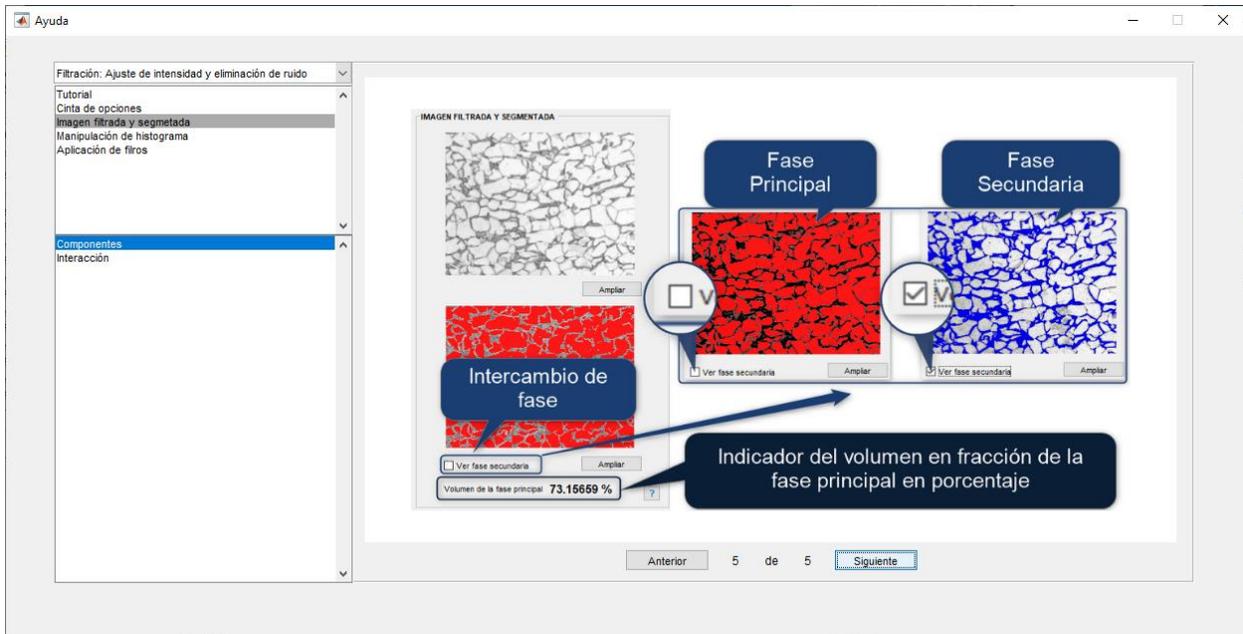


**Nota.** La fusión de imágenes permite concatenar las partes la imagen original donde se presenta una ventana de visualización para las partes que ubica las imágenes a medida que son cargadas a la plataforma.

3.5.6.a Ayuda. Permite guiar al usuario por las diferentes opciones de la interfaz gráfica, mostrando los elementos de cada sección y ventanas del programa computacional. Esta ventana se ilustra en la figura 154.

**Figura 154.**

*Ventana de ayuda*



**Nota.** La ventana de ayuda permite orientar al usuario y explicar la funcionalidad de los elementos dentro del programa. Cuenta con explicación de los componentes, un tutorial por sección, recomendaciones y aclaraciones en el uso de los elementos gráficos.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

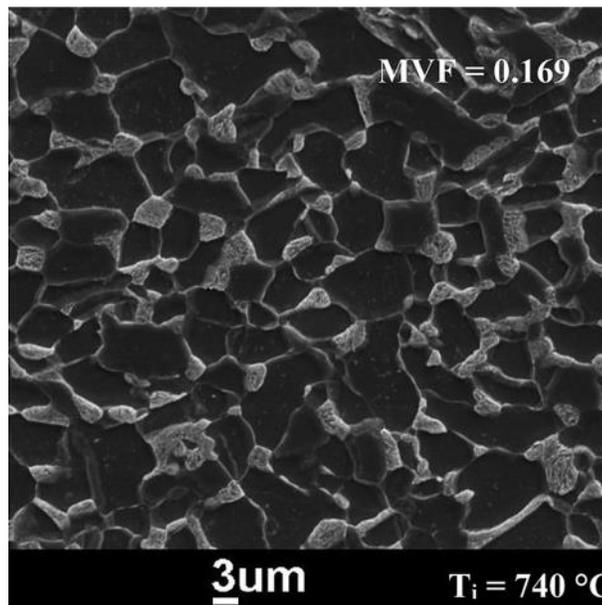
En este capítulo se describirán los resultados obtenidos en la medición de propiedades estereológicas de las microscopías de los aceros seleccionados; además, se realizan comparaciones frente a la bibliografía, mediciones experimentales y comparativas entre software que permitan evaluar la eficacia del programa computacional desarrollado en el software MATLAB®.

### 4.1 Acero de doble fase (16.9 % MVF)

Se emplea la microscopía de un acero de doble fase de 16.9% de volumen en fracción de martensita (MVF) [88] para validar los resultados del programa de MATLAB®; la microscopía de acero de doble fase se muestra en la figura 155.

**Figura 155.**

*Acero de doble fase de 16.9% de martensita*

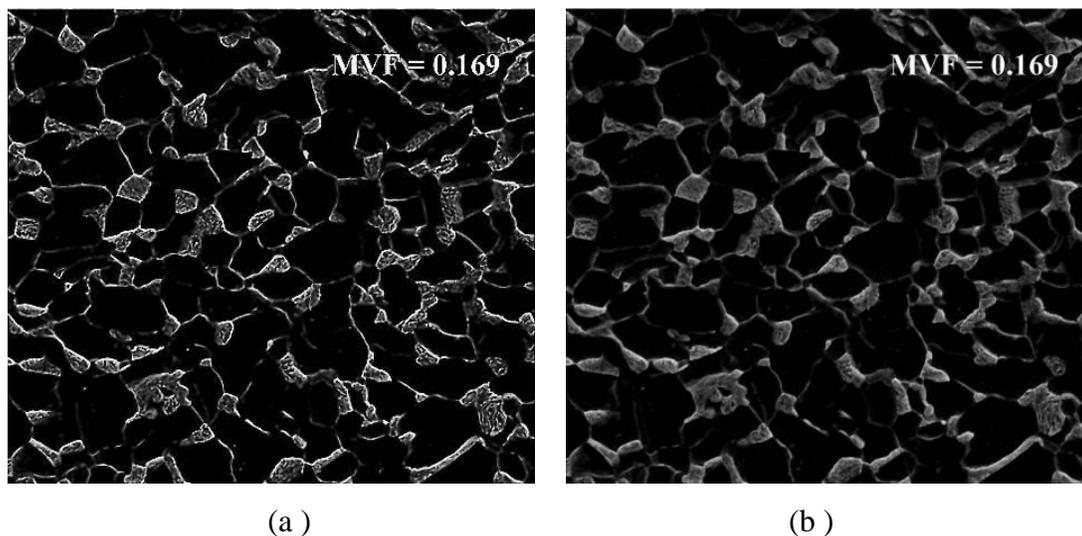


*Nota.* La microscopía corresponde a un acero de doble fase a una temperatura de recocido de 740°C y un tamaño de grano promedio de ferrita de 4.44  $\mu\text{m}$ . Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

La figura 156 muestra el resultado de las filtraciones de realce de morfología correspondiente a la fase ferrita y martensita.

## Figura 156

*Resultado de la filtración de fases*



*Nota.* (a) realce de morfología de la fase ferrita y bordes de grano; (b) realce de morfología de la fase martensita donde se destaca la homogeneidad de las texturas y la eliminación de bordes de grano de la fase ferrita.

La tabla 7 resume los valores de aplicación de las filtraciones para la fase ferrita y martensita.

**Tabla 7.**

*Datos de aplicación en la etapa de filtración*

Aplicación de filtros	Ferrita	Martensita
Histograma (superior)	50.04	42
Histograma (inferior)	255	255
Enmascaramiento sin enfoque	5	0
Ecuilización de histograma adaptativo	0	0
Filtro Gaussiano	0	0.39
Filtro Mediano	1	1
Filtro Mínimo	1	1

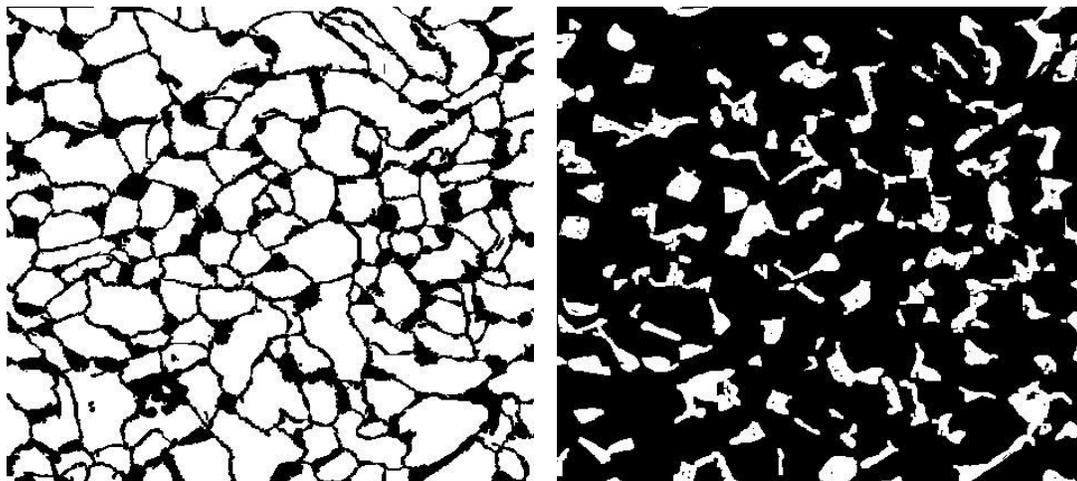
Aplicación de filtros	Ferrita	Martensita
Filtro Máximo	1	1
Filtro Mínimo (NSEO)	0	0
Filtro Laplaciano	0	0
Filtro Cajas 2D	2	1
Filtro Adaptativo	2	2

*Nota.* la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de filtración donde la modificación del histograma define el contraste para tratar una fase u otra y los valores de los filtros en el dominio espacial detallan la morfología.

La segmentación de fases se muestra en la figura 157.

### Figura 157.

*Resultado de la segmentación de fases*



(a)

(b)

*Nota.* (a) Segmentación de realce para la fase ferrita y bordes de grano donde se destaca la definición de bordes en la microscopía; (b) Segmentación de imagen de realce para la fase martensita donde los bordes de grano de la fase ferrita se eliminan.

La tabla 8 resume los valores de aplicación de las herramientas de segmentación para la fase principal y secundaria.

**Tabla 8.***Datos de aplicación en la etapa de segmentación*

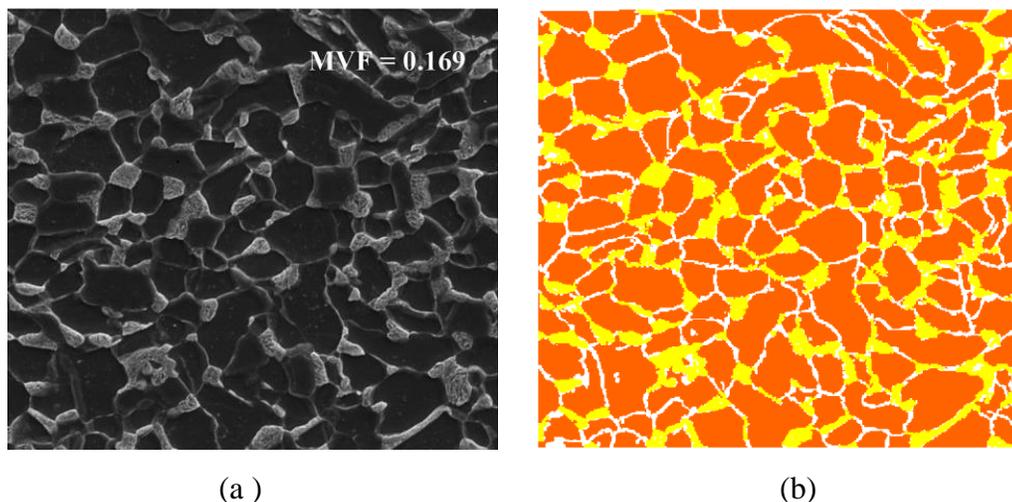
Aplicación de herramientas de segmentación	Especificación	Valor	Especificación	Valor
	Ferrita	Ferrita	Martensita	Martensita
Sensibilidad a la binarización	NaN	50.04	NaN	42
Binarización invertida	No invertida	NaN	Invertida	NaN
Operación morfológica	D (Square)	5	E (Square)	3
Eliminación de áreas 1	Negro	0	Negro	50
Eliminación de áreas 2	Blanco	100	Blanco	0

**Nota.** la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de segmentación; para la fase ferrita se realiza una operación morfológica de dilatación (D) con valor 5 y un elemento estructurante *Square*, la eliminación de áreas se aplica en la fase blanca donde se eliminan impurezas y morfologías diminutas. En la fase martensita se realiza una operación morfológica de erosión (E) con valor 3 y un elemento estructurante *Square*, la eliminación de áreas se aplica en la fase negra donde se eliminan impurezas y morfologías diminutas de color negro.

La imagen de representación de fases junto a la microscopía original se muestra en la figura 158.

### Figura 158.

*Representación de fases y bordes de grano*



**Nota.** (a) microscopía original; (b) representación de fases donde el color amarillo representa la fase martensita, el color naranja la fase ferrita y el color blanco los bordes de grano. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

Los resultados de la medición del volumen en fracción se muestran en la tabla 9 en la cual se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente a la bibliografía de referencia.

### Tabla 9.

*Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

Volumen en fracción	Bibliografía	MATLAB®	% Desacierto
Martensita (Fase 2)	16.9%	17.1%	1.18%
Ferrita (Fase 1)	83.1%	71.1%	0.72%
Bordes de grano	0.0%	11.8%	NaN

**Nota.** La medición del volumen en fracción para la fase martensita presenta un porcentaje de desacierto del 1.2% frente a la bibliografía consultada (16.9%). En la bibliografía se asume el volumen en fracción de la fase ferrita como el resto de la composición (83,1%) y no considera los bordes de grano dentro de la medición; por lo anterior, se cuantifica el porcentaje de desacierto mediante la suma de la fase ferrita (71.1%) y los bordes de grano (11.8%) obteniendo un resultado para el desacierto de 0.7%. Datos tomados de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 10, los resultados muestran el análisis de la distribución en 9 fragmentos que conforman la totalidad de la imagen.

**Tabla 10.**

*Distribución de fase por fragmentos*

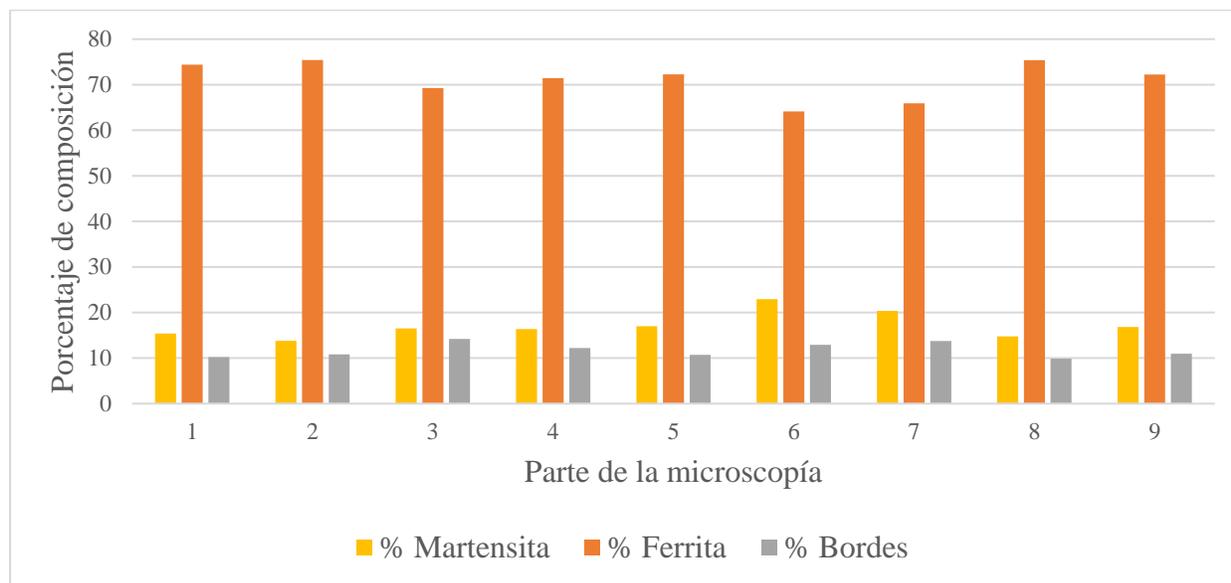
Fase	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 7	Parte 8	Parte 9
%F	74.38	75.42	69.27	71.43	72.28	64.13	65.9	75.37	72.22
%M	15.40	13.77	16.51	16.36	17.01	22.94	20.36	14.76	16.83
%B	10.22	10.81	14.22	12.21	10.71	12.93	13.75	9.87	10.95

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F), porcentaje de martensita (%M) y porcentaje de bordes de grano (%B). La distribución de fase que presenta menor y mayor cantidad de martensita corresponde a la parte 2 (13.7%) y parte 3 (22.9%).

La figura 159 muestra un histograma de distribución de fases para las partes de la microscopía.

**Figura 159.**

*Histograma de datos de distribución de fases*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 10 donde la parte 7 presenta mayor porcentaje de bordes de grano (13.7%), la parte 2 presenta mayor porcentaje de ferrita (75.4%) y la parte 6 presenta mayor porcentaje de martensita (22.9%)

Los resultados de la medición del espaciamiento entre fase se muestran en la tabla 11.

**Tabla 11**

*Espaciamiento entre fases*

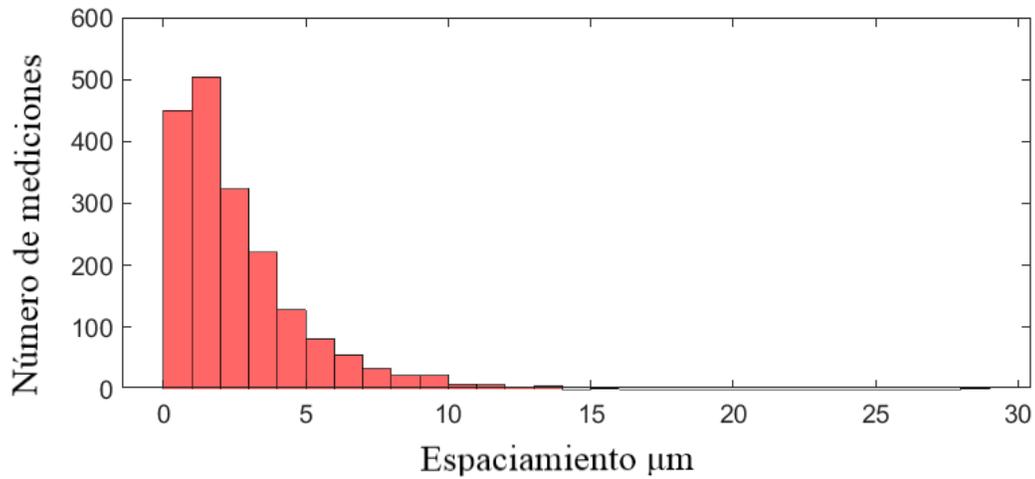
<b>Espaciamiento</b>	<b>Ferrita</b>	<b>Martensita</b>
Mínimo ( $\mu m$ )	0	0
Máximo ( $\mu m$ )	29	99.7
Promedio ( $\mu m$ )	2.5	12.1

*Nota.* El espaciamiento entre fases considera los bordes de grano de la microscopía; se mide estrictamente la distancia entre las fases de un mismo constituyente.

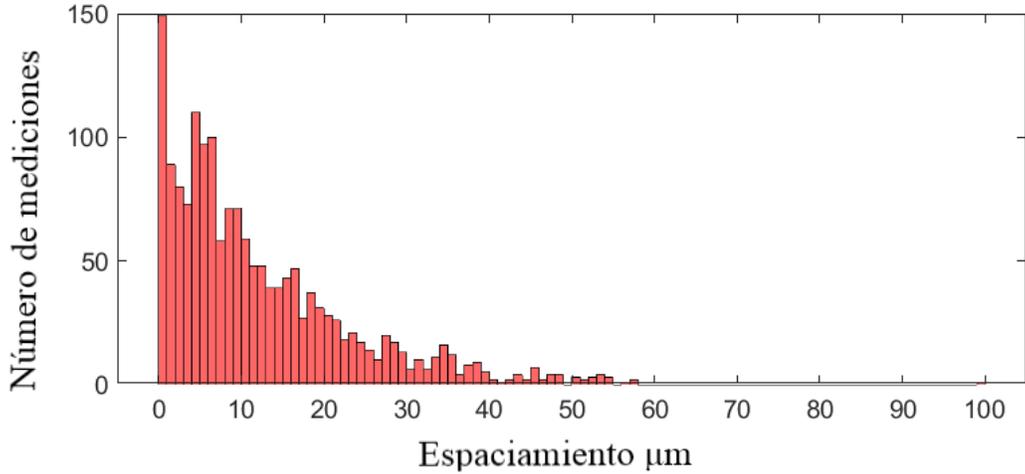
Los histogramas de medición en función del espaciamiento se muestran en la figura 160.

**Figura 160.**

*Histograma de espaciamiento entre fase*



(a)



(b)

**Nota.** (a) histogramas de datos del espaciamento entre la fase ferrita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $1 \mu m$  y  $2 \mu m$  y el promedio de los datos es de  $2.5 \mu m$ ; (b) histogramas de datos del espaciamento entre la fase martensita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $0 \mu m$  y  $1 \mu m$  y el promedio es de  $12.1 \mu m$ .

Los resultados de la medición de tamaño de grano (áreas) se muestran en la tabla 12.

**Tabla 12.**

*Tamaño de grano (área)*

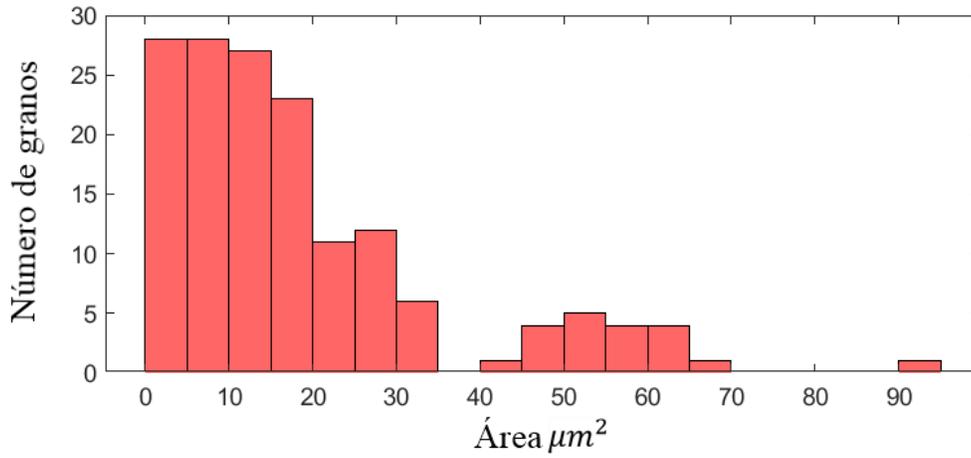
Área	Ferrita	Martensita
Mínima ( $\mu m^2$ )	0.61	0.02
Máxima ( $\mu m^2$ )	90.06	36.59
Promedio ( $\mu m^2$ )	18.75	5.89

**Nota.** El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de área.

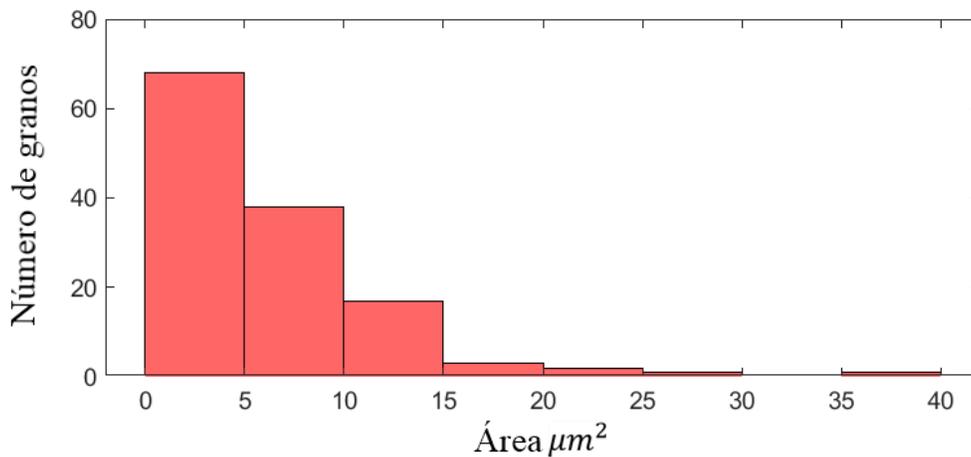
La figura 161 muestra los histogramas de distribución del tamaño de grano (área) para las fases ferrita y martensita

**Figura 161.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)*



(a)



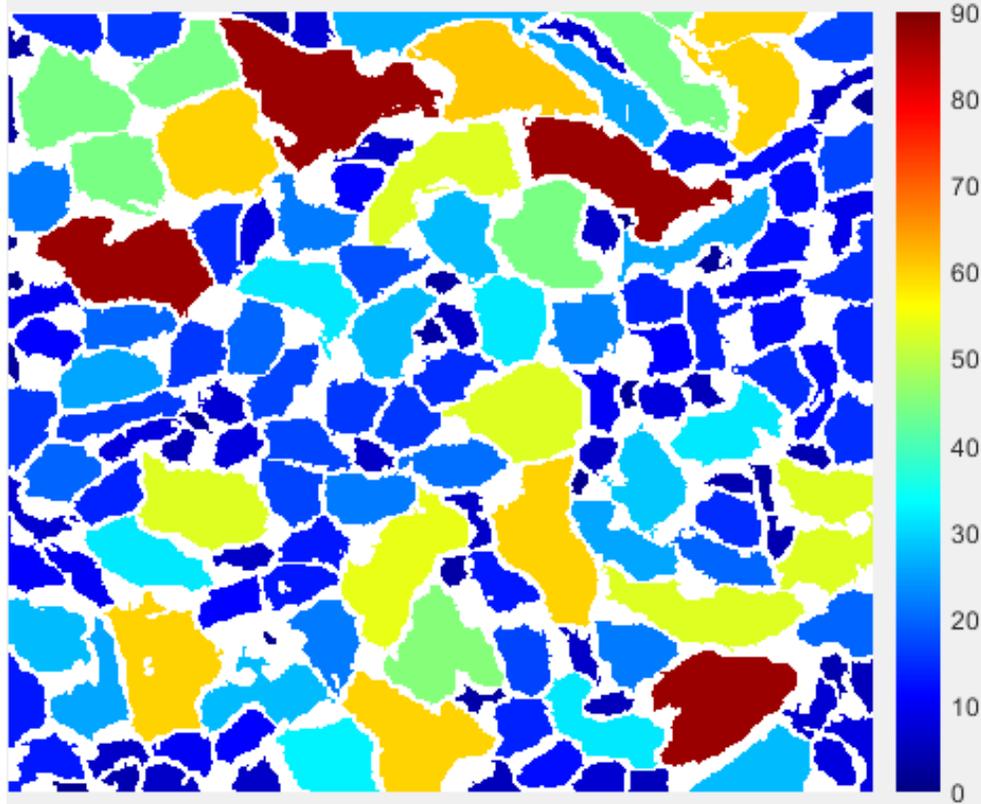
(b)

**Nota.** (a) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre  $0 \mu m^2$  y  $15 \mu m^2$ ; (b) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase martensita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre  $0 \mu m^2$  y  $5 \mu m^2$ .

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (áreas) se muestra en la figura 162.

**Figura 162.**

*Representación de áreas en  $\mu\text{m}^2$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre  $0 \mu\text{m}^2$  y  $20 \mu\text{m}^2$  siendo 4 elementos detectados los que poseen un valor de más de  $85 \mu\text{m}^2$ . Para la gráfica se definen 130 etiquetas de representación de color.

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13.**

*Tamaño de grano (Diámetro)*

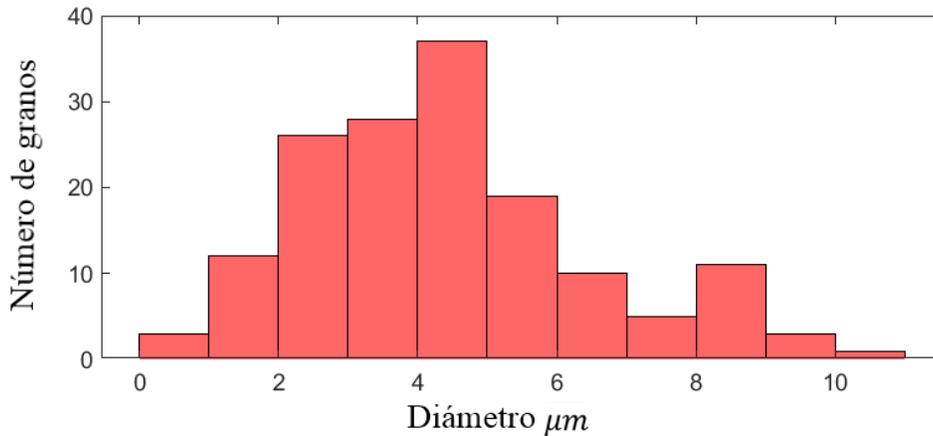
<b>Diámetro</b>	<b>Ferrita</b>	<b>Martensita</b>
Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	10.70	6.82
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	0.88	0.16
Promedio ( $\mu\text{m}$ )	4.44	2.44

*Nota.* El diámetro promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

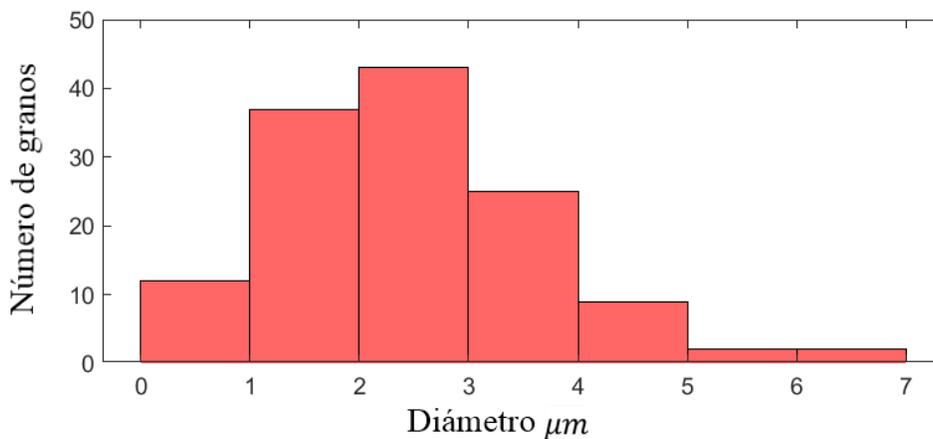
La figura 163 muestra los histogramas de distribución de datos del tamaño de grano (diámetro) para las fases ferrita y martensita.

**Figura 163.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)*



(a)



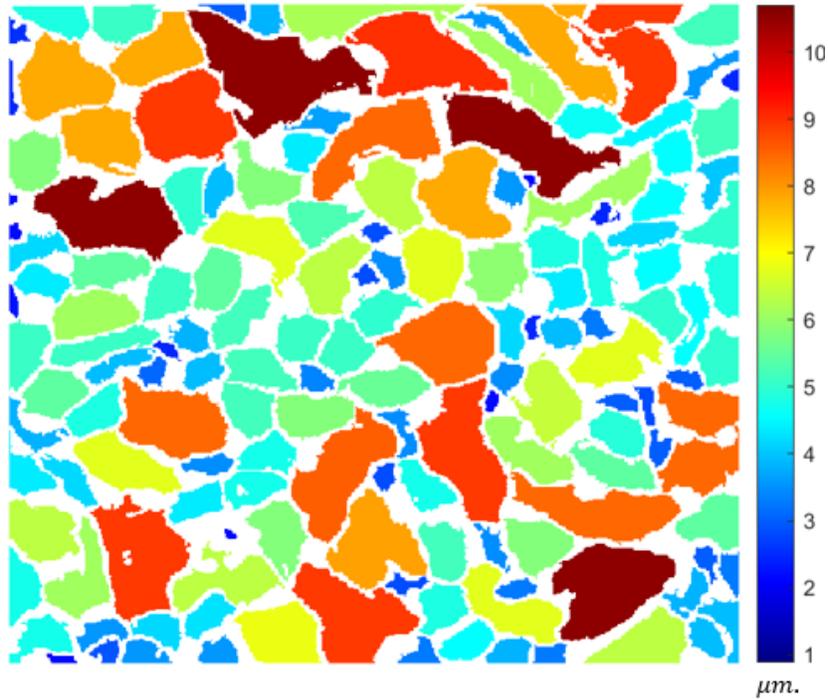
(b)

**Nota.** (a) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de diámetros se encuentra entre  $4 \mu\text{m}$  y  $5 \mu\text{m}$  (b) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase martensita; la mayor distribución de diámetros se encuentra entre  $2 \mu\text{m}$  y  $3 \mu\text{m}$ .

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetros) se muestra en la figura 164.

**Figura 164.**

*Representación de diámetros en  $\mu m$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre 1  $\mu m$  y 4  $\mu m$  siendo 4 elementos detectados aquellos que poseen un valor de más de 10  $\mu m$ .. Para la gráfica se definen 130 etiquetas de representación de color.

La tabla 14 muestra el porcentaje de desacierto para la medición del tamaño de grano (diámetro) en la cual el dato bibliográfico corresponde 4.44  $\mu m$ .

**Tabla 14.**

*Tamaño de grano y comparativa del resultado*

Tamaño de grano	Bibliografía	MATLAB®	% Desacierto
Ferrita ( $\mu m$ )	4.44	4.44	0.00%

*Nota.* El resultado obtenido por el software MATLAB® presenta un desacierto menor al 1% frente al dato bibliográfico consultado. Datos tomados de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

En conclusión, El análisis para el acero de doble fase (16.9% MVF) presenta un porcentaje de desacierto de 1.18% para la detección de la fase martensita y 0.72% para la detección de la fase ferrita donde la bibliografía muestra la inclusión de los bordes de grano dentro del porcentaje de ferrita (83.1%); el programa de MATLAB® detecta bordes de grano de ferrita equivalentes a 11.4% de la microestructura, y un volumen en fracción de 71.1% para este microconstituyente. La distribución de fases tomadas por fragmentos presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 64.13% y 75.42%, para la fase martensita un volumen en fracción de fragmentos entre 13.77% y 22.94% y finalmente para los bordes de grano entre 9.87% y 13.75% del volumen total de los fragmentos de la microscopía.

Para el espaciamiento entre fases se presenta un espaciamiento promedio entre los granos de la fase ferrita y martensita de  $2.5 \mu m$  y  $12.1 \mu m$  respectivamente; estos datos representan un espaciamiento de la fase martensita 4.84 veces más grande que el presente en la fase ferrita.

La medición del tamaño de grano muestra un resultado de  $4.44 \mu m$  con un porcentaje de desacierto de 0.00% para los granos de ferrita frente al valor bibliográfico de  $4.44 \mu m$ ; además, se presenta una mayor cantidad de granos entre 0 y  $5 \mu m$  siendo solo 4 elementos detectados con valores superiores a  $10 \mu m$ .

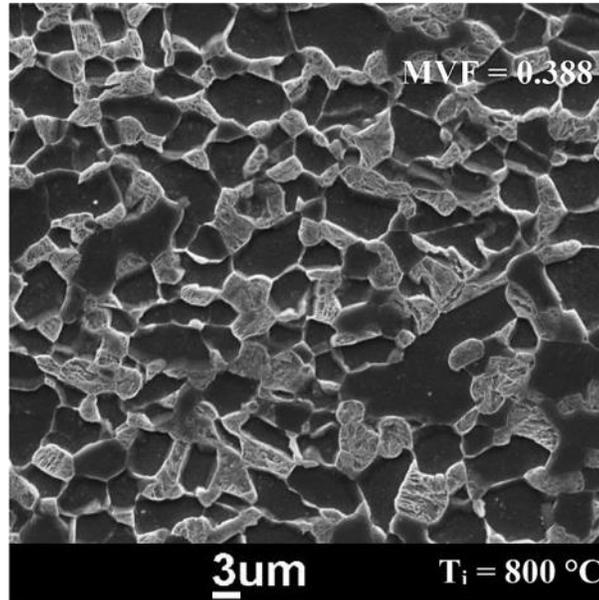
El uso de filtros para acentuar la morfología de fase evidencia que para el tratamiento de bordes de grano es fundamental el uso del enmascaramiento sin enfoque y manipulaciones del histograma que permitan enfatizar la fase oscura (ferrita) y mantener la fase clara (martensita) con la menor variación en su brillo; además, se usa el filtro laplaciano que detecta y destaca los bordes sin excesiva alteración de la morfología. La homogeneización de texturas mediante los filtros gaussiano y adaptativo permiten homogeneizar el ruido de la fase clara (martensita) y define la morfología de esta fase. El proceso de segmentación de la fase ferrita emplea la erosión morfológica para segmentar los bordes de grano y una eliminación de las áreas de 100 píxeles para el color blanco; para la fase martensita, se realiza una dilatación morfológica y una eliminación de áreas de 50 píxeles para el color negro con el objetivo de eliminar elementos de tamaño diminuto producto de los cambios de morfología y filtraciones.

#### 4.2 Acero de doble fase (38.8% MVF)

Se usa la microscopía de un acero de doble fase de 38.8% de volumen en fracción de martensita (MVF) [88] para la validación del programa de MATLAB®; la figura 165 muestra la microscopía del acero de doble fase.

#### Figura 165.

*Acero de doble fase de 38.8% de martensita*

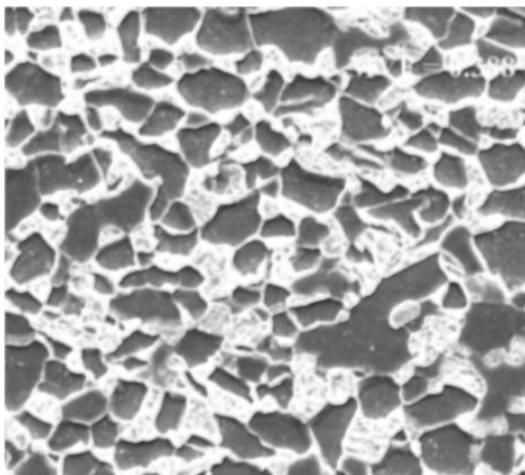


*Nota.* La microscopía corresponde a un acero de doble fase a una temperatura de recocido de 800°C y un tamaño de grano promedio de ferrita de 3.45  $\mu m$ . Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

La figura 166 muestra el resultado de la operación de filtrado para la representación de la fase ferrita y martensita.

**Figura 166.**

*Resultado de la filtración de fases*



*Nota.* Filtración de realce para la fase ferrita y bordes de grano; se destaca la definición de bordes en la microscopía y un incremento del brillo de la fase martensita.

La tabla 15 resume los valores de aplicación de las filtraciones para ambas fases.

**Tabla 15.**

*Datos de aplicación en la etapa de filtración*

<b>Aplicación de filtros</b>	<b>Valor</b>
Histograma (superior)	0
Histograma (inferior)	105.00
Enmascaramiento sin enfoque	1.91
Ecuación de histograma adaptativo	0
Filtro Gaussiano	1.38
Filtro Mediano	1
Filtro Mínimo	1
Filtro Máximo	1
Filtro Mínimo (NSEO)	0

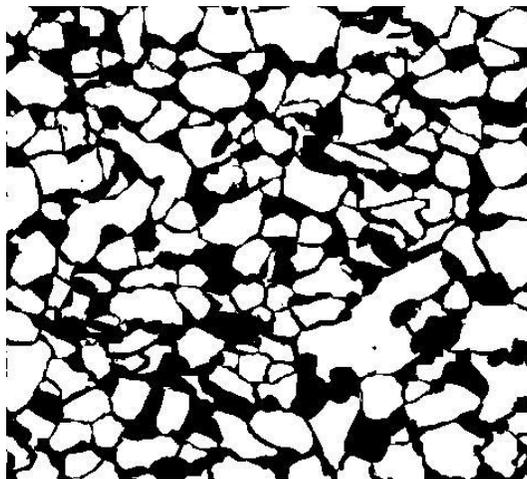
Aplicación de filtros	Ferrita
Filtro Laplaciano	0
Filtro Cajas 2D	1
Filtro Adaptativo	2

*Nota.* la tabla muestra los valores usados durante la etapa de filtración para la microscopía; la modificación del histograma define el contraste para tratar una fase u otra y los valores de los filtros en el dominio espacial detallan la morfología.

La segmentación de fases se muestra en la figura 167.

**Figura 167.**

*Resultado de la segmentación de fases*



*Nota.* Segmentación de fases ferrita (color blanco) y martensita (color negro)

La tabla 16 resume los valores de aplicación de las herramientas de segmentación para ambas fases.

**Tabla 16.**

*Datos de aplicación en la etapa de segmentación*

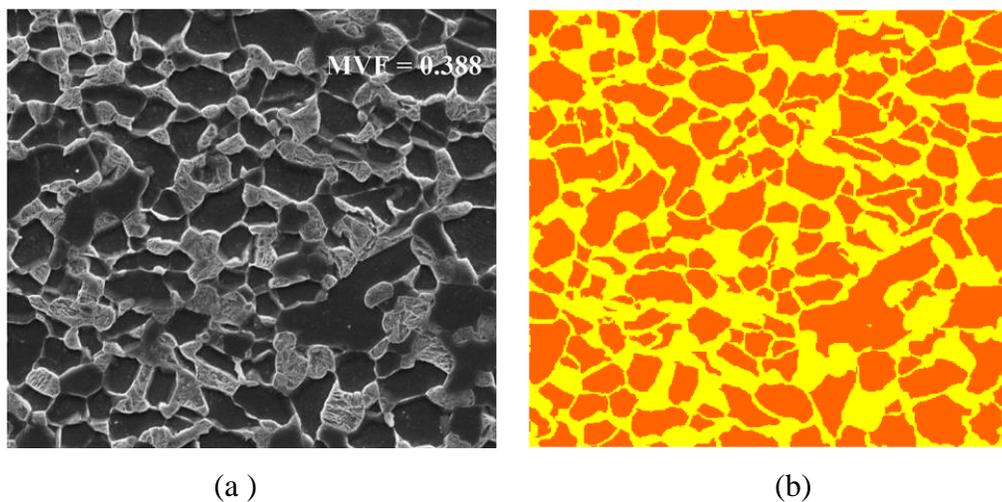
Aplicación de herramientas de segmentación	Especificación	Valor
Sensibilidad a la binarización	NaN	0.41
Binarización invertida	No invertida	NaN
Operación morfológica	E (Square)	1
Eliminación de áreas 1	Negro	0
Eliminación de áreas 2	Blanco	400

**Nota.** La tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de segmentación donde se realiza una operación morfológica de erosión (E) con valor 1 y un elemento estructurante *Square*, la eliminación de áreas se aplica en la fase blanca donde se eliminan impurezas y morfologías diminutas.

La imagen de representación de fases junto a la microscopía original se muestra en la figura 168

**Figura 168.**

*Representación de fases y bordes de grano*



**Nota.** (a) microscopía original; (b) representación de fases donde el color amarillo representa la fase martensita, el color naranja la fase ferrita. Para esta muestra no se realiza la segmentación de bordes de grano por la poca cantidad de bordes presentes en la imagen. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8

Los resultados de la medición del volumen en fracción se muestran en la tabla 17 en la cual se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente a la bibliografía de referencia.

**Tabla 17.**

*Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

Volumen en fracción	Bibliografía	MATLAB®	% Desacuerdo
Martensita (Fase 2)	38.80%	40.10%	3.35%
Ferrita (Fase 1)	61.20%	59.90%	2,12%

**Nota.** La medición del volumen en fracción para la fase martensita presenta un porcentaje de desacuerdo del 3.3% frente a la bibliografía consultada; la fase ferrita presenta un porcentaje de desacuerdo de 2.1%. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 18, los resultados muestran el análisis de la distribución en 9 fragmentos que conforman la totalidad de la imagen.

**Tabla 18.**

*Distribución de fase por fragmentos*

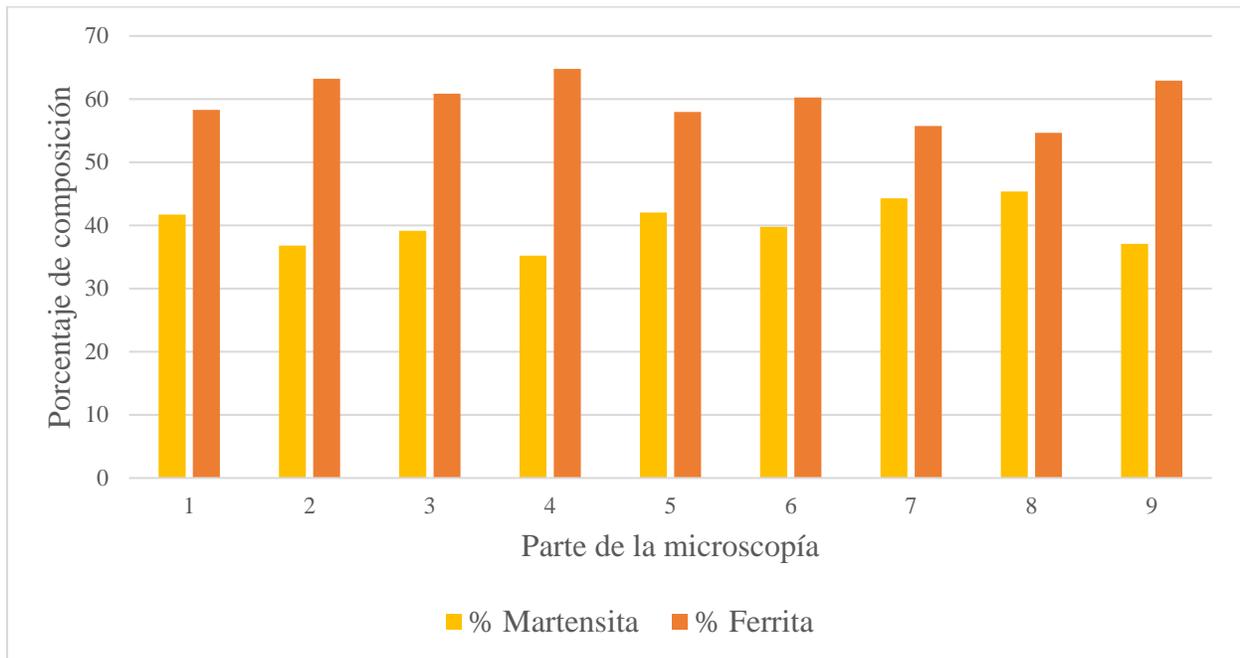
Fase	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 7	Parte 8	Parte 9
%F	58.29	63.21	60.86	64.78	57.97	60.24	55.73	54.65	62.93
%M	41.71	36.79	39.14	35.22	42.03	39.76	44.27	45.35	37.07

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F) y porcentaje de martensita (%M). La distribución de fase que presenta mayor y menor cantidad de martensita corresponde a la parte 8 (45.35%) y parte 4 (35.22%)

La figura 169 muestra un histograma de distribución de fases de las partes de la microscopía.

**Figura 169.**

*Histograma de datos de distribución de fases*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 18 donde la parte 4 presenta mayor porcentaje de ferrita (64.78%) y la parte 8 presenta mayor porcentaje de martensita con (45.35%)

Los resultados de la medición del espaciamiento entre fase se muestran en la tabla 19.

**Tabla 19.**

*Espaciamiento entre fases*

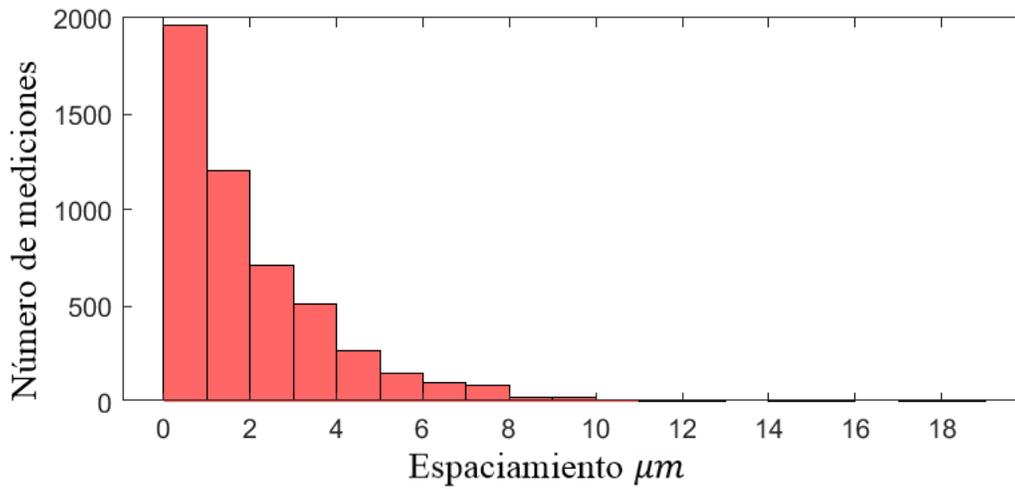
Espaciamiento	Ferrita	Martensita
Mínimo ( $\mu m$ )	0	0
Máximo ( $\mu m$ )	19.36	13.90
Promedio ( $\mu m$ )	2.12	3.15

**Nota.** El espaciamiento considera los bordes de grano de la microscopía; se mide estrictamente la distancia entre las fases de un mismo constituyente.

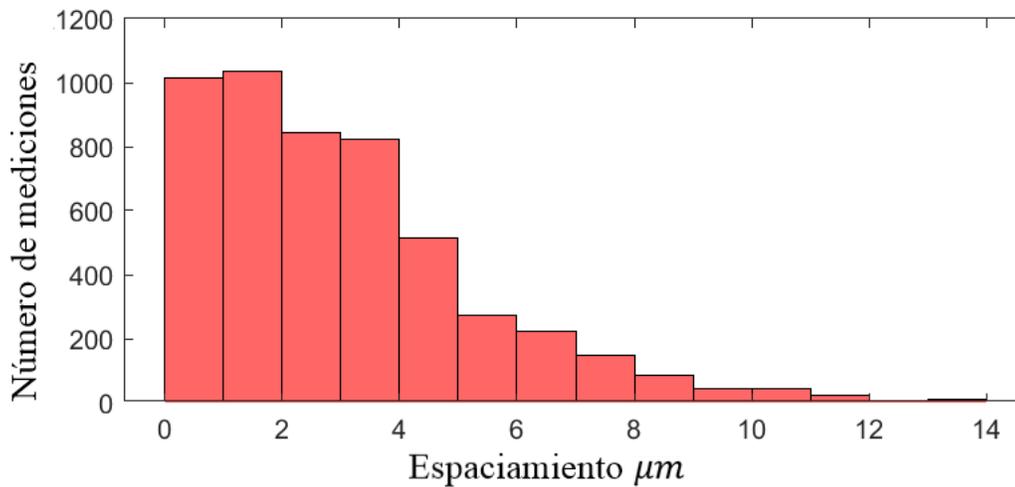
Los histogramas de medición en función del espaciamiento se muestran en la figura 170.

**Figura 170.**

*Histograma de espaciamento entre fase*



(a)



(b)

**Nota.** (a) histogramas de representación de datos del espaciamento entre la fase ferrita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre 0 y 1  $\mu m$  y el promedio es de 2.0  $\mu m$ ; (b) histogramas de representación del espaciamento entre la fase martensita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre 1 y 2  $\mu m$  y el promedio es de 3.0  $\mu m$ .

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Áreas) se muestran en la tabla 20.

**Tabla 20.**

*Tamaño de grano (área)*

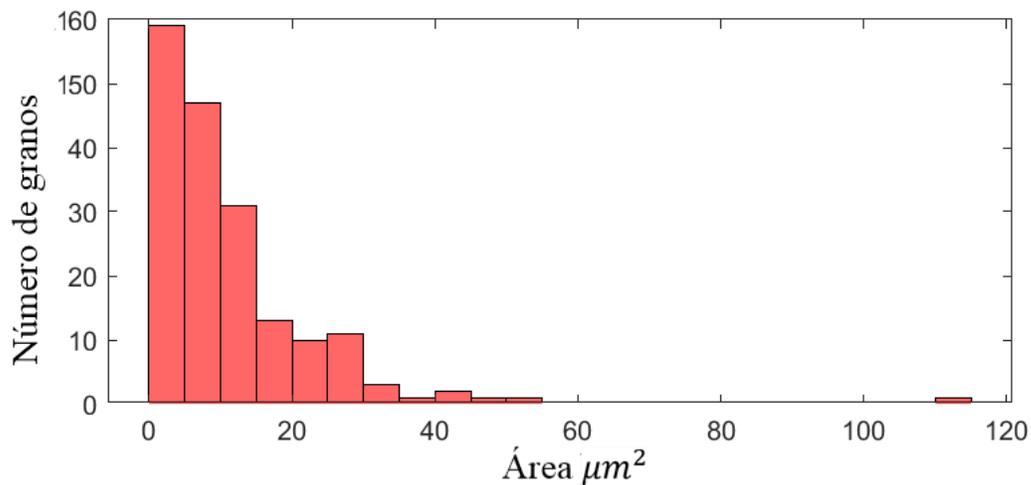
Área	Ferrita
Mínima ( $\mu m^2$ )	0.01
Máxima ( $\mu m^2$ )	110.60
Promedio ( $\mu m^2$ )	11.36

*Nota.* El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de área.

La figura 171 muestra el histograma de distribución del tamaño de grano (área) para la fase ferrita.

**Figura 171.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)*

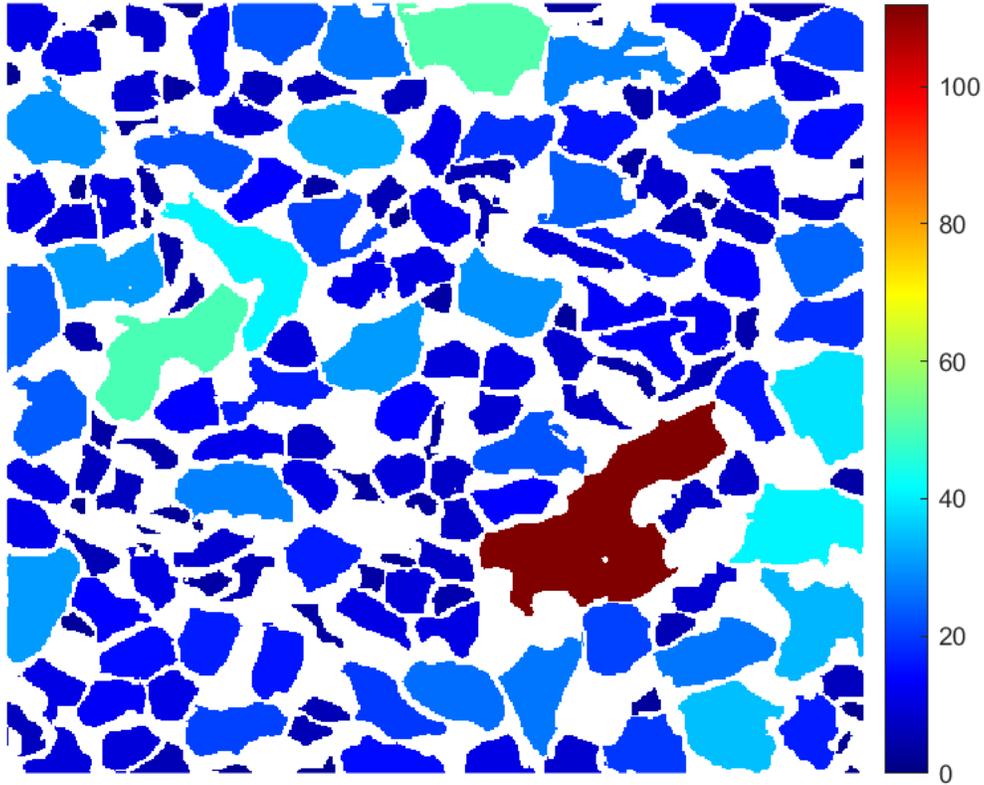


*Nota.* Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre 0  $\mu m^2$  y 5  $\mu m^2$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (áreas) se muestra en la figura 172.

**Figura 172.**

*Representación de áreas en  $\mu\text{m}^2$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre  $0 \mu\text{m}^2$  y  $20 \mu\text{m}^2$  siendo 1 elemento detectado el que posee un valor de más de  $70 \mu\text{m}^2$ . Para la gráfica se definen 130 etiquetas para la representación de color.

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) se muestran en la tabla 21.

**Tabla 21.**

*Tamaño de grano (Diámetro)*

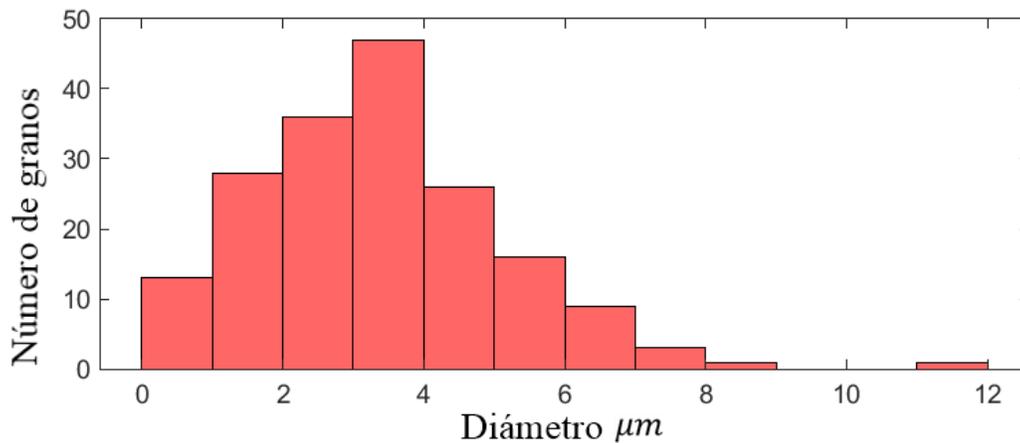
Diámetro	Ferrita
Mínimo ( $\mu m$ )	0.14
Máximo ( $\mu m$ )	11.86
Promedio ( $\mu m$ )	3.36

*Nota.* El diámetro promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

La figura 173 muestra el histograma de distribución del tamaño de grano (diámetro) para la fase ferrita

**Figura 173.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (Diámetro)*

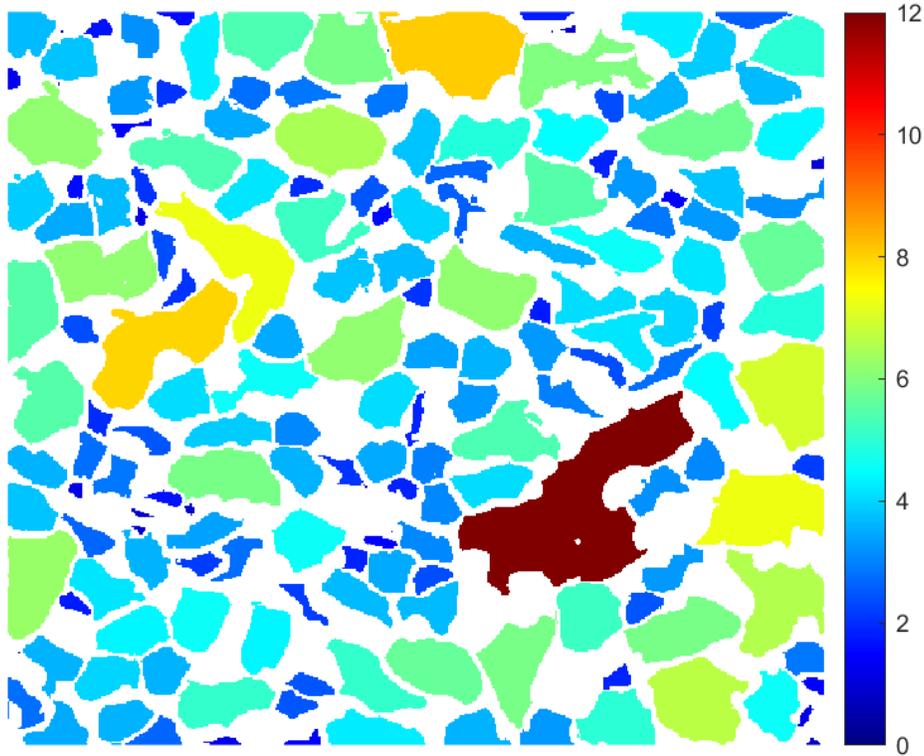


**Nota.** Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de diámetro se encuentra entre 3  $\mu m$  y 4  $\mu m$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetro) se muestra en la figura 174.

**Figura 174.**

*Representación del diámetro en  $\mu\text{m}$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre  $3 \mu\text{m}$  y  $5 \mu\text{m}$  siendo 1 elemento detectado el que posee un valor de más de  $11 \mu\text{m}$ . Para la gráfica se definen 130 etiquetas de representación de color.

La tabla 22 muestra el porcentaje de desacierto para la medición del tamaño de grano (diámetro) en la cual el dato bibliográfico corresponde  $3.45 \mu\text{m}$ .

**Tabla 22.**

*Tamaño de grano y comparativa del resultado*

Tamaño de grano	Bibliografía	MATLAB®	% Desacierto
Ferrita ( $\mu\text{m}$ )	3.45	3.36	2.43%

*Nota.* El resultado obtenido por el software MATLAB® presenta un error menor al 3% frente al dato bibliográfico consultado. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

En conclusión, el análisis para el acero de doble fase (38.8% MVF) presenta un porcentaje de desacierto de 3.3% para la detección de la fase martensita y 2.1% para la detección de la fase ferrita. La distribución de fases por fragmentos presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 54.65% y 62.93%, para la fase martensita un volumen en fracción por fragmento entre 45.35% y 35.22% .

Para el espaciamiento entre fases se presenta un espaciamiento promedio entre los granos de la fase ferrita de  $2.1 \mu m$  y para el espaciamiento promedio entre los granos de la fase martensita de  $3.5 \mu m$ ; estos datos representan un espaciamiento de la fase martensita 1.6 veces más grande que el presente en la fase ferrita.

La medición del tamaño de grano muestra un resultado de  $3.36 \mu m$  con un porcentaje de desacierto de 2.4% para los granos de ferrita frente al valor bibliográfico de  $3.45 \mu m$ ; además, se presenta una mayor cantidad de granos entre  $3 \mu m$  y  $4 \mu m$  siendo solo 1 elementos detectados con valores superiores a  $12 \mu m$ .

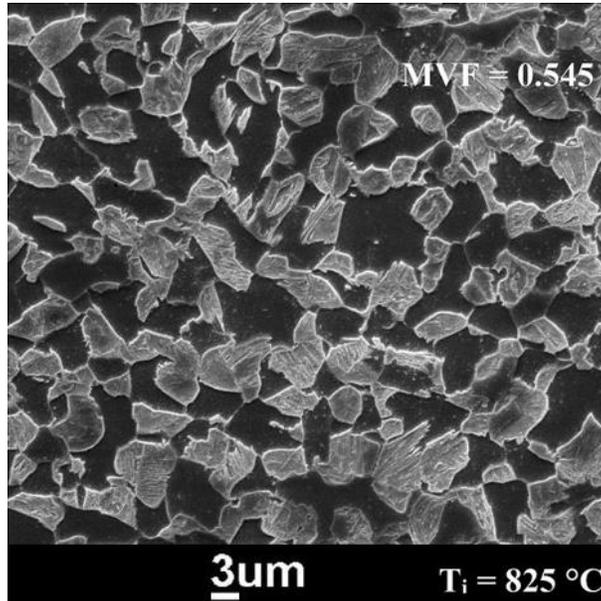
El uso de filtros para acentuar la morfología de fase evidencia que para el tratamiento de bordes de grano es fundamental el uso del enmascaramiento sin enfoque y manipulaciones del histograma que permitan realzar los bordes y aclarar la fase de mayor luz (martensita). La homogeneización de texturas mediante los filtros gaussiano y adaptativo permiten homogeneizar el ruido de la fase clara (martensita) además define la morfología de esta fase; estos procesos no requieren tratar de forma independiente las fases de la microestructura, los bordes de grano entre un mismo tipo de constituyente no son frecuentes en la reproducción. En el proceso de segmentación se realiza una erosión morfológica en su valor mínimo para pulir el contorno o bordes de la morfología sin gran modificación en esta y una eliminación de áreas de 400 píxeles para el color blanco con el objetivo de eliminar elementos no pertenecientes a la imagen original producto de los cambios de morfología y filtraciones.

### 4.3 Acero de doble fase (54.5% MVF)

Se emplea la microscopía de un acero de doble fase de 54.5% de volumen en fracción de martensita (MVF) [88] para la validación del programa de MATLAB®; la microscopía del acero se muestra en la figura 175.

**Figura 175.**

*Acero de doble fase de 54.5% de martensita*

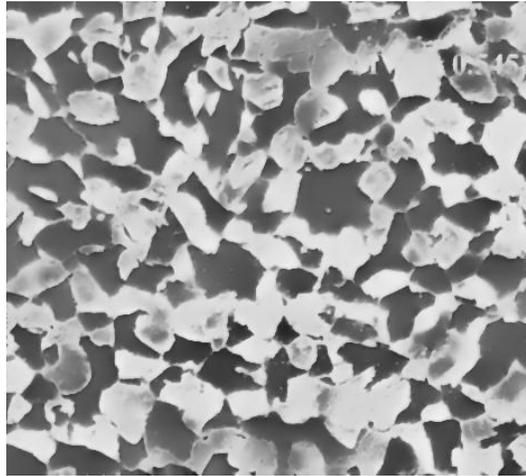


*Nota.* La microscopía corresponde a un acero de doble fase a una temperatura de recocido de 825°C y un tamaño de grano promedio de ferrita de 3.36  $\mu m$ . Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8

La figura 176 muestra el resultado de las filtraciones para la representación de la fase ferrita y martensita.

**Figura 176.**

*Resultado de la filtración de fases*



*Nota.* Filtración de realce para la fase ferrita y bordes de grano donde se destaca la definición de bordes en la microscopía y un incremento del brillo de la fase martensita

La tabla 23 resume los valores de aplicación de las filtraciones para ambas fases.

**Tabla 23.**

*Datos de aplicación en la etapa de filtración*

<b>Aplicación de filtros</b>	<b>Ferrita</b>
Histograma (superior)	0
Histograma (inferior)	97.50
Enmascaramiento sin enfoque	2.30
Ecuación de histograma adaptativo	1
Filtro Gaussiano	0.76
Filtro Mediano	1
Filtro Mínimo	1
Filtro Máximo	1
Filtro Mínimo (NSEO)	0

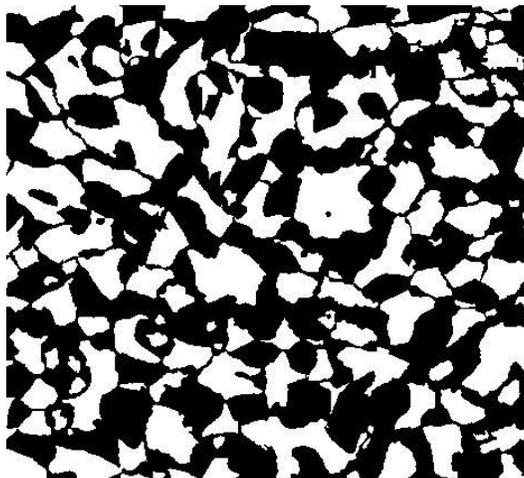
Aplicación de filtros	Ferrita
Filtro Laplaciano	0.51
Filtro Cajas 2D	1
Filtro Adaptativo	2

*Nota.* La tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de filtración donde la modificación del histograma define el contraste para tratar una fase u otra y los valores de los filtros en el dominio espacial detallan la morfología.

La segmentación de fases se muestra en la figura 167.

**Figura 177.**

*Resultado de la segmentación de fases*



*Nota.* Segmentación de fases ferrita (color blanco) y mrtensita (color negro)

La tabla 16 resume los valores de aplicación de las herramientas de segmentación para ambas fases.

**Tabla 24.**

*Datos de aplicación en la etapa de segmentación*

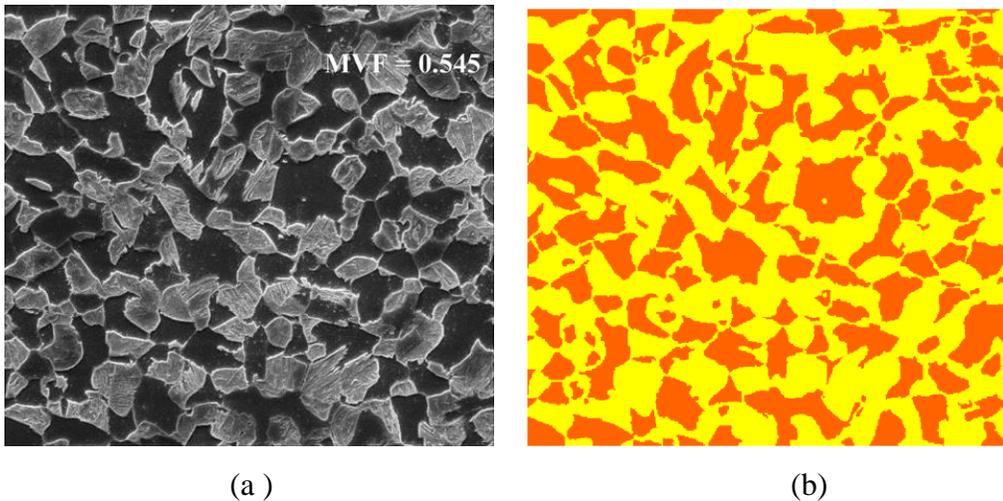
Aplicación de herramientas de segmentación	Especificación	Valor
Sensibilidad a la binarización	NaN	0.66
Binarización invertida	No invertida	NaN
Operación morfológica	NaN	NaN
Eliminación de áreas 1	Negro	20
Eliminación de áreas 2	Blanco	20

*Nota.* la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de segmentación; la eliminación de áreas se aplica en la fase blanca y negra para eliminar impurezas y morfologías diminutas.

La imagen de representación de fases junto a la microscopía original se muestra en la figura 178.

**Figura 178.**

*Representación de fases y bordes de grano*



*Nota.* (a) microscopía original; (b) representación de fases donde el color amarillo representa la fase martensita y el color naranja la fase ferrita. Para esta muestra no se realiza la segmentación de bordes de grano por la poca cantidad de bordes presentes en la imagen. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp. 8.

Los resultados de la medición del volumen en fracción se muestran en la tabla 25 en la cual se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente a la bibliografía de referencia.

**Tabla 25.**

*Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

<b>Volumen en fracción</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>MATLAB®</b>	<b>% Desacuerdo</b>
Martensita (Fase 2)	54.5%	55.70%	2.20%
Ferrita (Fase 1)	45.5%	44.20%	2.85%

**Nota.** La medición del volumen en fracción para la fase martensita presenta un porcentaje de desacuerdo del 2.2% frente a la bibliografía consultada y la fase ferrita presenta un porcentaje de desacuerdo de 2.8%. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkowski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 26. Los resultados muestran el análisis de la distribución en 9 fragmentos que conforman la totalidad de la imagen.

**Tabla 26.**

*Distribución de fase por fragmentos*

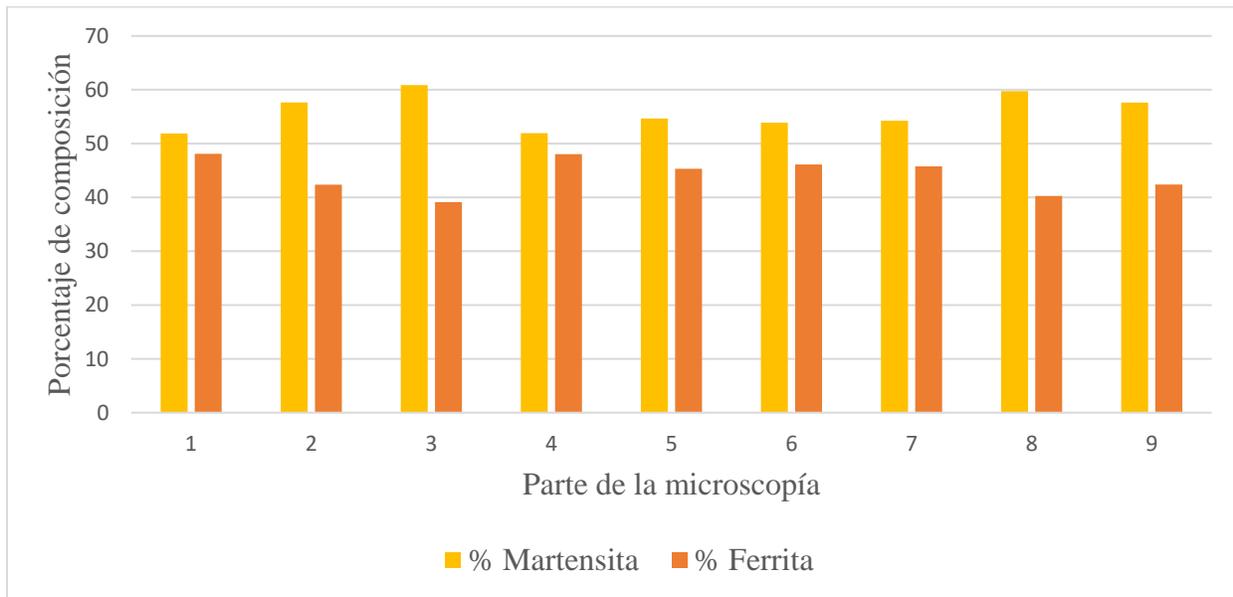
<b>Fase</b>	<b>Parte 1</b>	<b>Parte 2</b>	<b>Parte 3</b>	<b>Parte 4</b>	<b>Parte 5</b>	<b>Parte 6</b>	<b>Parte 7</b>	<b>Parte 8</b>	<b>Parte 9</b>
<b>%M</b>	51.89	57.64	60.88	51.95	54.67	53.89	54.24	59.74	57.62
<b>%F</b>	48.11	42.36	39.12	48.05	45.33	46.11	45.76	40.26	42.38

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F) y porcentaje de martensita (%M) La distribución de fase que presenta mayor y menor cantidad de martensita corresponde a la parte 3 (60.8%) y parte 1 (51.8%).

La figura 179 muestra un histograma de distribución de fases de las partes de la microscopía.

**Figura 179.**

*Histograma de datos de distribución de fases*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 18 donde la parte 1 presenta mayor porcentaje de ferrita con 48.11% y la parte 3 presenta mayor porcentaje de martensita con 60.87%

Los resultados de la medición del espaciamiento entre fase se muestran en la tabla 27.

**Tabla 27.**

*Espaciamiento entre fases*

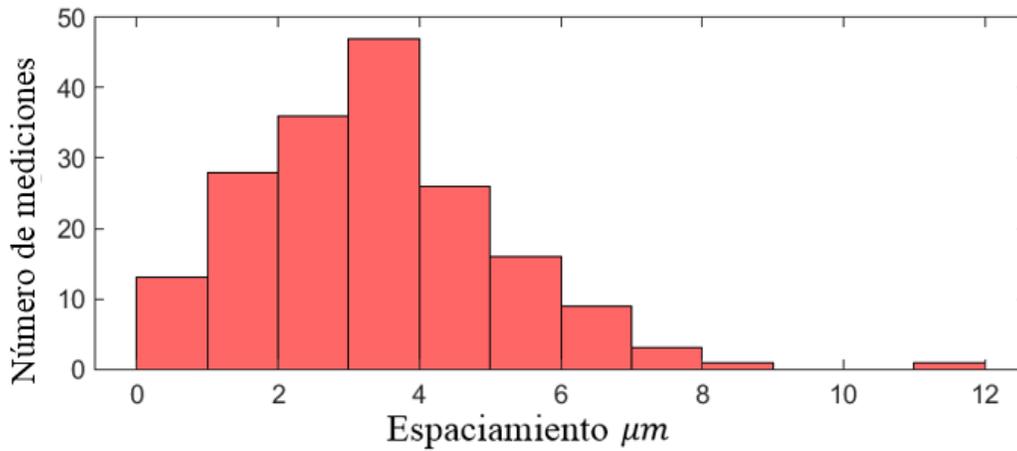
Espaciamiento	Ferrita	Martensita
Mínimo ( $\mu m$ )	0	0
Máximo ( $\mu m$ )	30.40	12.81
Promedio ( $\mu m$ )	3.29	2.63

**Nota.** El espaciamiento considera los bordes de grano de la microscopía; se mide estrictamente la distancia entre las fases de un mismo constituyente.

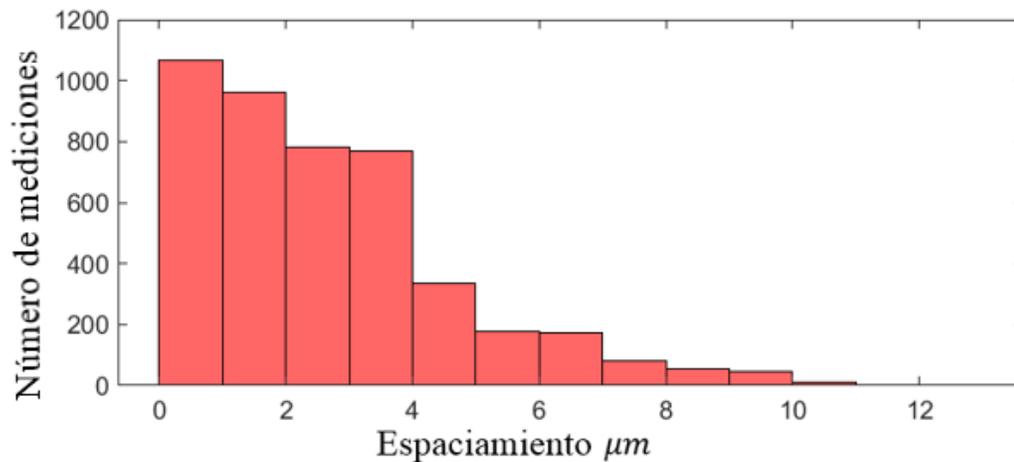
Los histogramas de medición en función del espaciamiento se muestran en la figura 180.

**Figura 180.**

*Histograma de espaciamento entre fase*



(a)



(b)

*Nota.* (a) histogramas de representación del espaciamento entre la fase ferrita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $3 \mu m$  y  $4 \mu m$  y el promedio es de  $2.2 \mu m$ ; (b) histogramas de representación del espaciamento entre la fase martensita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $0 \mu m$  y  $1 \mu m$  y el promedio es de  $2.6 \mu m$ .

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Áreas) se muestran en la tabla 28.

**Tabla 28.**

*Tamaño de grano (área)*

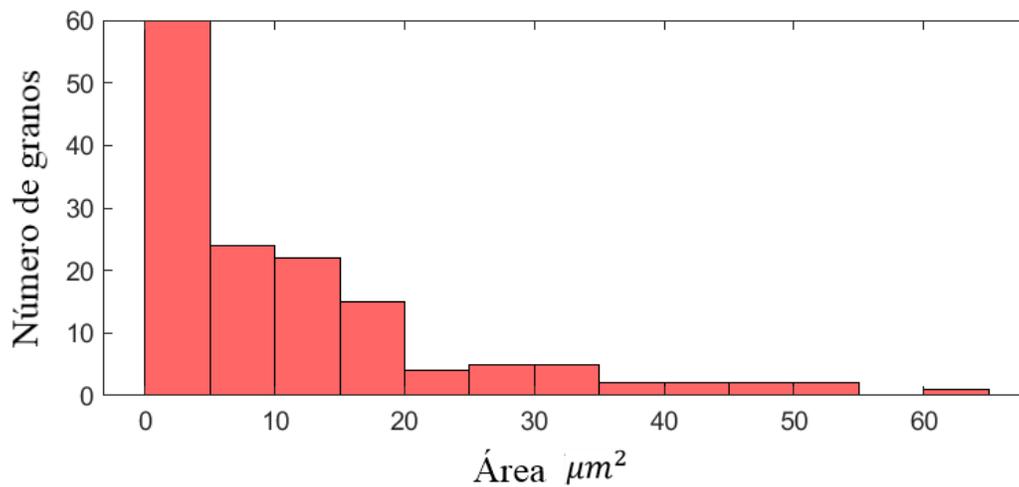
Área	Ferrita
Mínima ( $\mu m^2$ )	0.017
Máxima ( $\mu m^2$ )	110.60
Promedio ( $\mu m^2$ )	11.36

*Nota.* El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de área.

La figura 181 muestra el histograma de distribución del tamaño de grano (área) para la fase ferrita.

**Figura 181.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (área)*

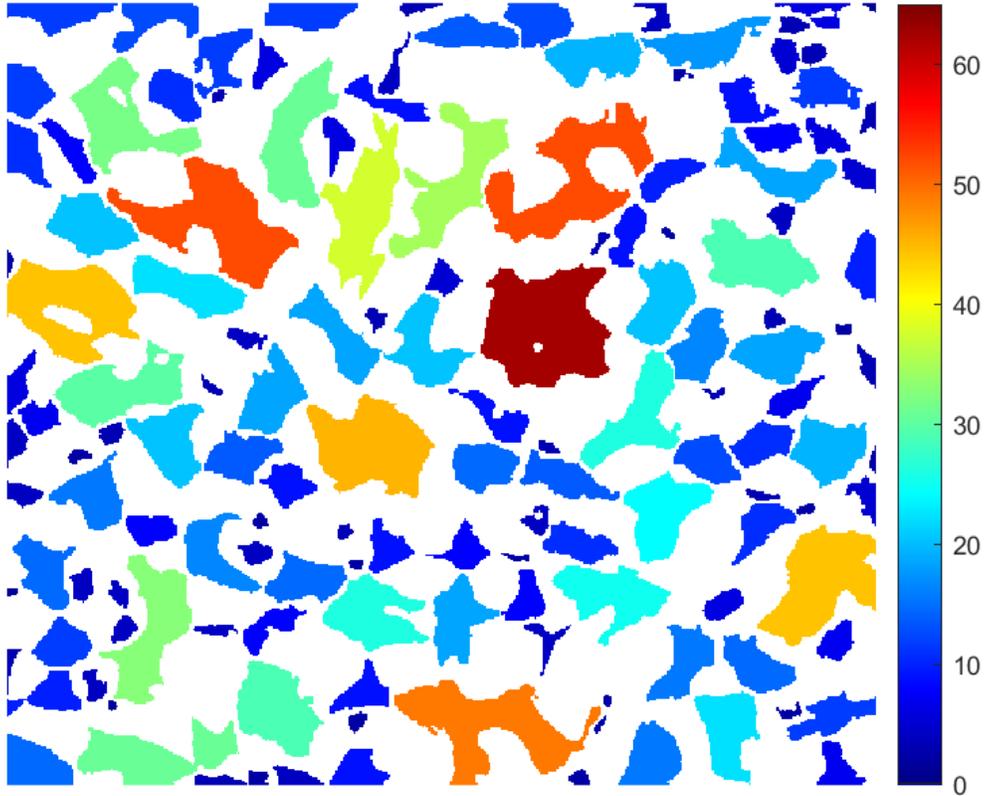


*Nota.* Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre 0  $\mu m^2$  y 5  $\mu m^2$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (áreas) se muestra en la figura 182.

**Figura 182.**

*Representación de áreas en  $\mu\text{m}^2$  de granos de ferrita*



*Nota.* se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre  $0 \mu\text{m}^2$  y  $10 \mu\text{m}^2$  siendo 1 elemento detectado el que poseen un valor de más de  $60 \mu\text{m}^2$ . Para la gráfica se definen 185 etiquetas.

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) se muestran en la tabla 29.

**Tabla 29.**

*Tamaño de grano (Diámetro)*

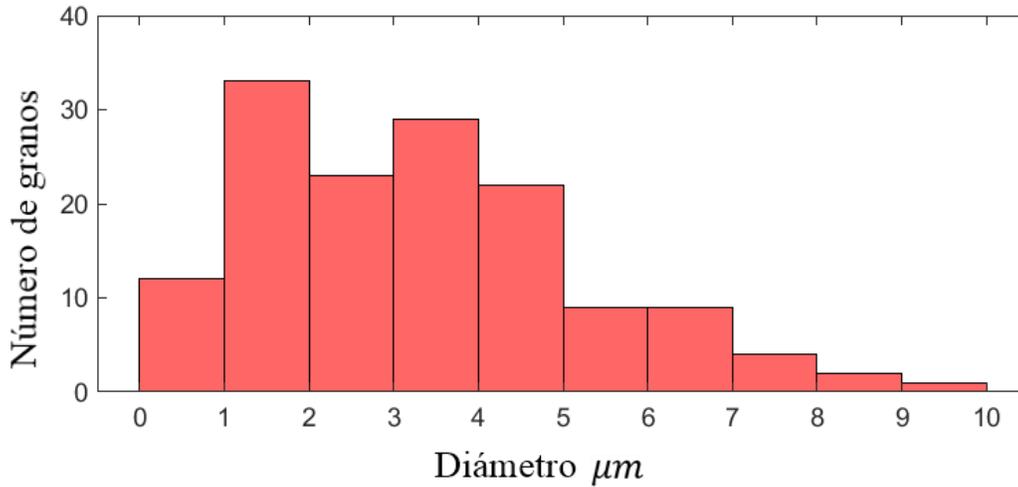
<b>Diámetro</b>	<b>Ferrita</b>
Mínimo ( $\mu\text{m}$ )	0.70
Máximo ( $\mu\text{m}$ )	9.04
Promedio ( $\mu\text{m}$ )	3.29

*Nota.* El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

La figura 183 muestra el histograma de distribución del tamaño de grano (diámetro) para la fase ferrita

**Figura 183.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (Diámetro)*

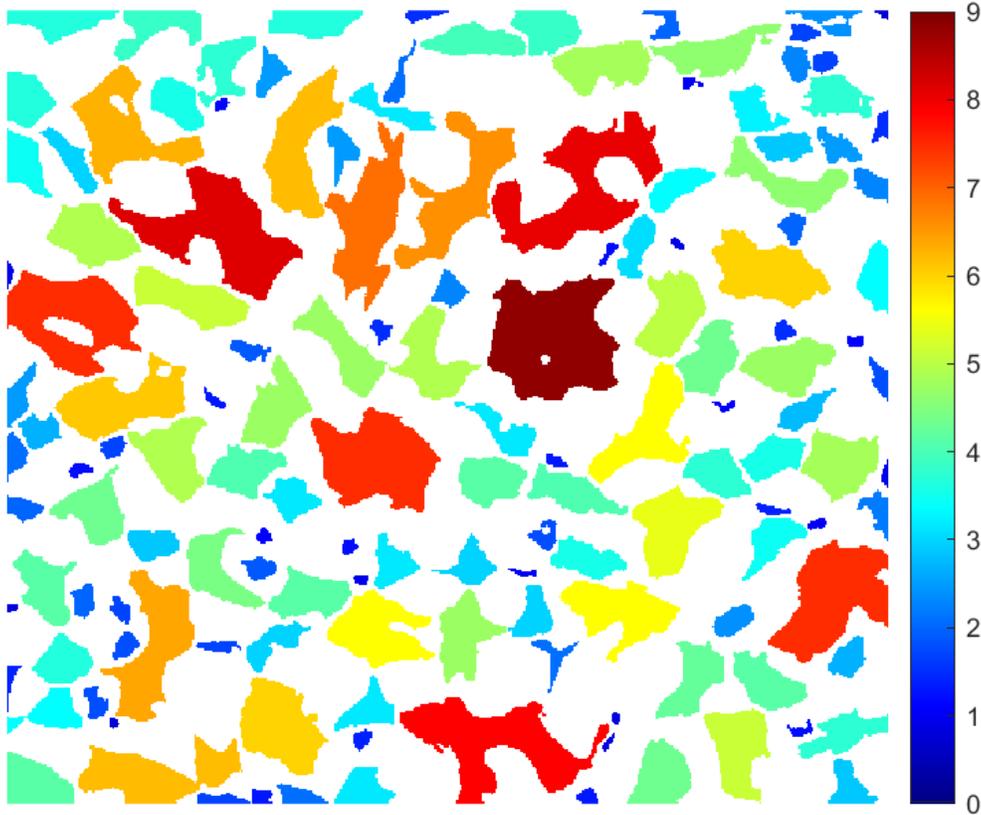


**Nota.** Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita donde la mayor distribución de diámetro se encuentra entre 1  $\mu m$  y 2  $\mu m$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetro) se muestra en la figura 184.

**Figura 184.**

*Representación del diámetro en  $\mu\text{m}$  de granos de ferrita*



*Nota.* se identifica que los grano se encuentran dispersos por toda la escala de medición siendo 1 elemento detectado el que poseen un valor de más de  $9 \mu\text{m}$ . Para la gráfica se definen 143 etiquetas.

La tabla 30 muestra el porcentaje de desacierto para la medición del tamaño de grano (diámetro) en la cual el dato bibliográfico corresponde  $3.36 \mu\text{m}$ .

**Tabla 30.**

*Tamaño de grano y comparativa del resultado*

Tamaño de grano	Bibliografía	MATLAB®	% Desacierto
Ferrita ( $\mu\text{m}$ )	3.36	3.2998	1.79%

*Nota.* El resultado obtenido por el software MATLAB® presenta un error menor al 2% frente al dato bibliográfico consultado. Tomado de: S. Mohamed, H. Palkiwski. Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction. pp.8.

En conclusión, el análisis para el acero de doble fase (54.5% MVF) presenta un porcentaje de desacierto de 2.2% para la detección de la fase martensita y 2.8% para la detección de la fase ferrita. La distribución de fases tomadas por fragmentos presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 48.1% y 39.1%, para la fase martensita un volumen en fracción por fragmentos entre 60.8% y 51.9%.

Para el espaciamiento entre fases se presenta un espaciamiento promedio entre los granos de la fase ferrita de  $3.2 \mu m$  y para el espaciamiento promedio entre los granos de la fase martensita de  $2.6 \mu m$ ; estos datos representan un espaciamiento de la fase martensita 1.2 veces más grande que el presente en la fase ferrita.

La medición del tamaño de grano muestra un resultado de  $3.29 \mu m$  con un porcentaje de desacierto de 1.7% para los granos de ferrita frente al valor bibliográfico de  $3.36 \mu m$ ; además, se presenta una mayor cantidad de granos entre  $1 \mu m$  y  $2 \mu m$  siendo solo 1 elemento detectado con valor superior a  $9 \mu m$ .

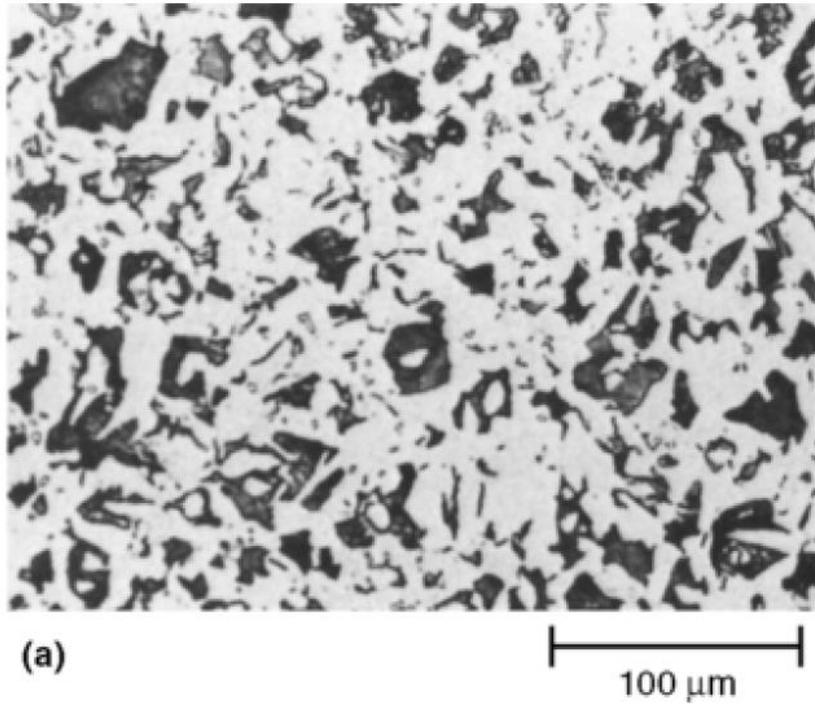
El uso de filtros para acentuar la morfología de fase evidencia que para el tratamiento de bordes de grano es fundamental el uso del enmascaramiento sin enfoque y manipulaciones del histograma que permitan realzar los bordes y aclarar la fase de mayor luz (martensita) La homogeneización de texturas mediante los filtros gaussiano y adaptativo permiten homogeneizar el ruido de la fase clara (martensita); además, se define la morfología de esta fase con el uso del filtro laplaciano que enfatiza los bordes de grano considerando los cambios de luz. Estos procesos no requieren tratar de forma independiente las fases de la microestructura, los bordes de grano entre un mismo tipo de constituyente no son frecuentes en la reproducción. El proceso de segmentación de la fase realiza una eliminación de áreas de 20 píxeles para el color blanco y negro con el objetivo de eliminar formas diminutas producto de los cambios de morfología y filtraciones; no se usan las operaciones erosión o dilatación por la separación entre fases que elimina bodes de un mismo constituyente.

#### 4.4 Acero hipoeutectoide

Se emplea la microscopía de un acero hipoeutectoide para la validación del programa de MATLAB® mostrado en la figura 185. [89]

**Figura 185.**

*Acero hipoeutectoide*

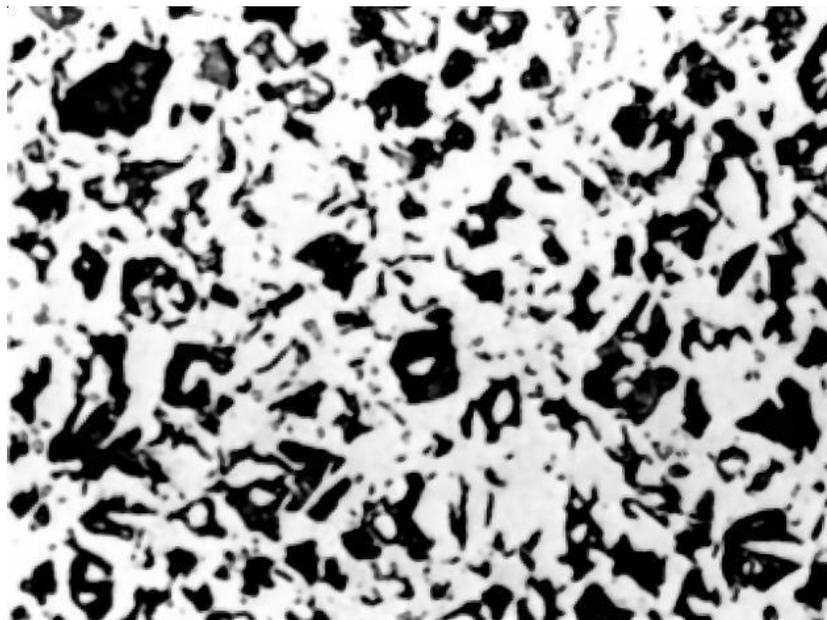


*Nota.* Acero hipoeutectoide. Tomado de: Brent, L. Metallography: An Introduction, Metallography and Microstructures. pp. 2-30.

La figura 186 muestra el resultado de las filtraciones para la representación de ambas fases.

**Figura 186.**

*Resultado de la filtración de fases*



*Nota.* Filtración de realce para la fase perlita con incremento del brillo de la fase ferrita.

La tabla 31 muestra los valores de aplicación de las filtraciones para la fase principal y secundaria.

**Tabla 31.**

*Datos de aplicación en la etapa de filtración*

<b>Aplicación de filtros</b>	<b>Valor</b>
Histograma (superior)	92.6110
Histograma (inferior)	229.925
Enmascaramiento sin enfoque	0
Ecualización de histograma adaptativo	0
Filtro Gaussiano	3
Filtro Mediano	1
Filtro Mínimo	1
Filtro Máximo	2
Filtro Mínimo (NSEO)	0

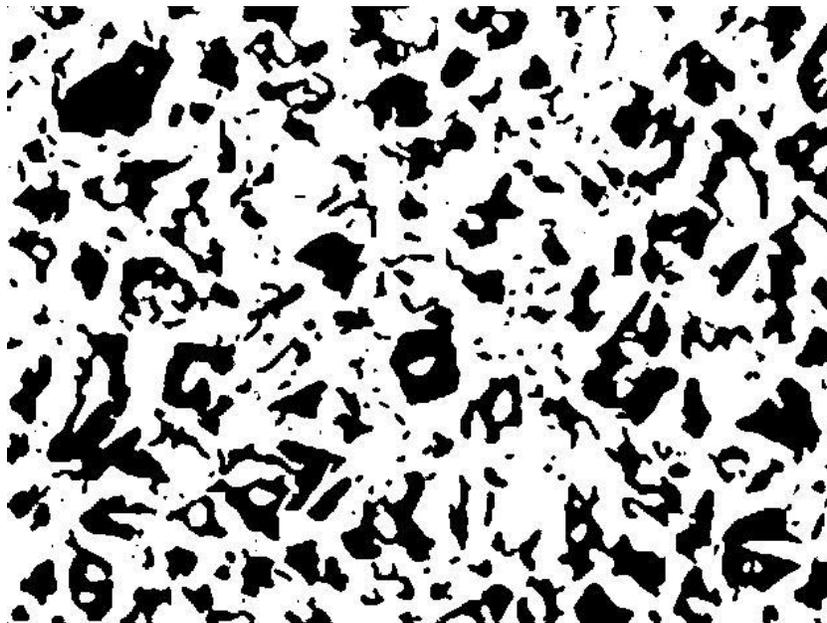
Aplicación de filtros	Valor
Filtro Laplaciano	0.07
Filtro Cajas 2D	1
Filtro Adaptativo	2

*Nota.* La tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de filtración; la modificación del histograma define el contraste para tratar una fase u otra y los valores de los filtros en el dominio espacial detallan la morfología.

La segmentación de fases se muestra en la figura 187.

**Figura 187.**

*Resultado de la segmentación de fases*



*Nota.* Segmentación de fases ferrita (color blanco) y perlita (color negro).

La tabla 32 muestra los valores de aplicación de las herramientas de segmentación para la fase principal y secundaria.

**Tabla 32.**

*Datos de aplicación en la etapa de segmentación*

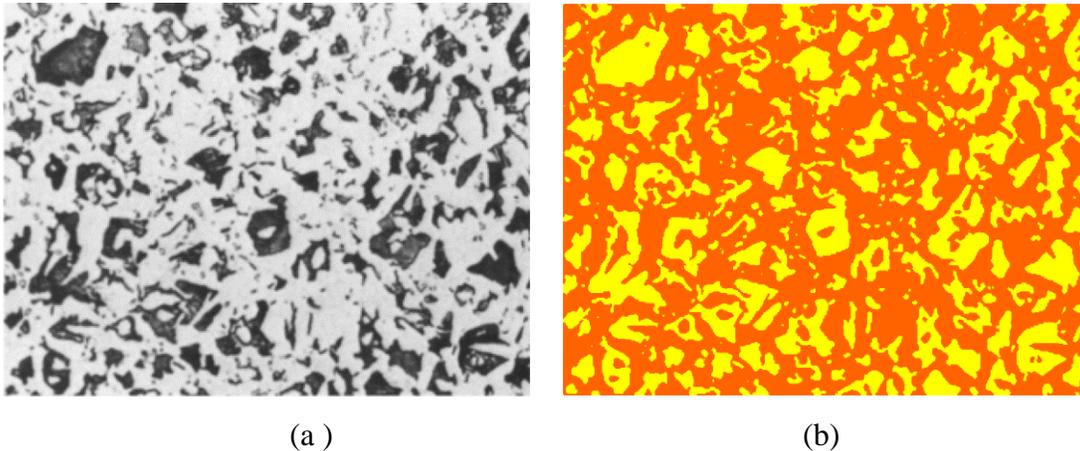
Aplicación de herramientas de segmentación	Especificación	Valor
Sensibilidad a la binarización	NaN	0.66
Binarización invertida	No invertida	NaN
Operación morfológica	NaN	NaN
Eliminación de áreas 1	Negro	0
Eliminación de áreas 2	Blanco	20

*Nota.* la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de segmentación donde la eliminación de áreas se aplica en la fase blanca para eliminar impurezas y morfologías diminutas.

La imagen de representación de fases junto a la microscopía original se muestra en la figura 188.

**Figura 188.**

*Representación de fases*



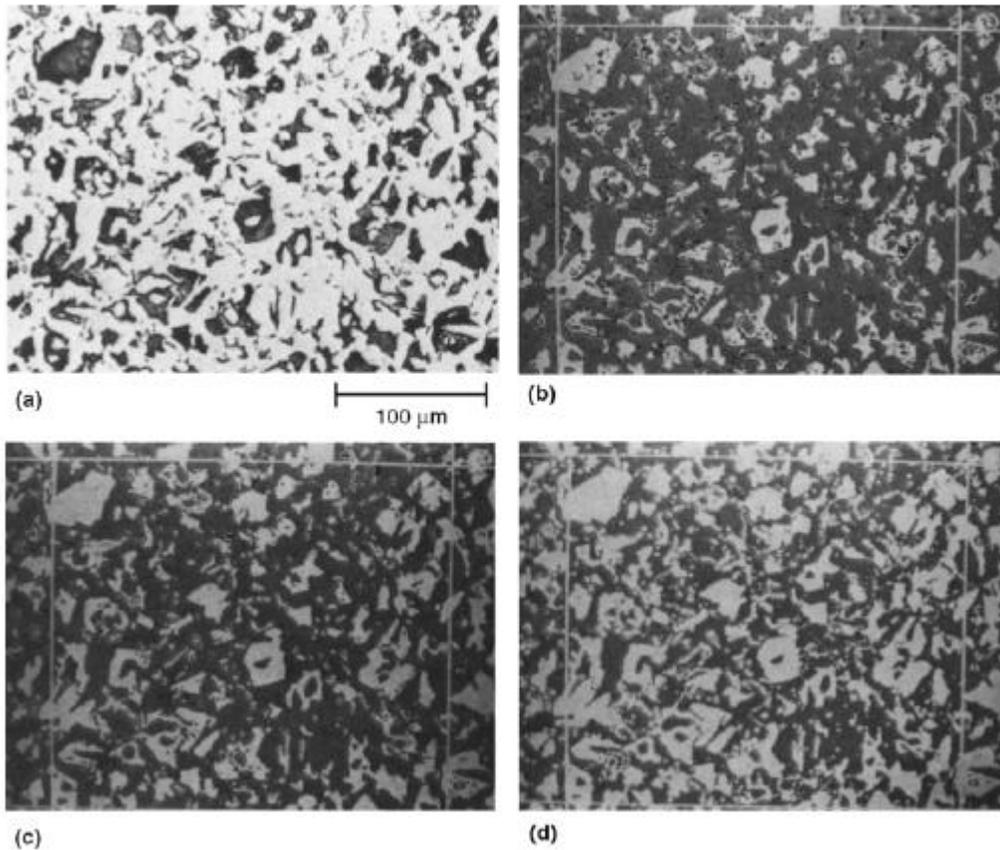
*Nota.* (a) microscopía original; (b) representación de fases donde el color amarillo representa la fase perlita y el color naranja la fase ferrita. Para esta muestra no se realiza la segmentación de bordes de grano por la poca cantidad de bordes presentes en la imagen. Tomado de: Brent, L. *Metallography: An Introduction, Metallography and Microstructures*. pp. 2-30.

La bibliografía expone tres resultados de mediciones realizadas para la microscopía; el análisis realizado mediante análisis de imágenes y el método de fracción de área ( $A_A$ ) obtuvo resultados

de perlita detectada correctamente, perlita subdetectada y perlita sobredetectada como muestra la figura 189.[89]

**Figura 189.**

*Detección de fases de un acero hipoeutectoide usando análisis de imágenes y el método de fracción de área ( $A_A$ )*



**Nota.** (a) imagen original; (b) perlita subdetectada ( $A_A = 28.1\%$ ); (c) perlita correctamente detectada ( $A_A = 34.05\%$ ); (d) perlita sobredetectada ( $A_A = 28.1\%$ )  
Tomado de: Brent, L. Metallography: An Introduction, Metallography and Microstructures. pp. 2-30.

Los resultados de la medición del volumen en fracción se muestran en la tabla 33; se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente a la bibliografía de referencia.

**Tabla 33.***Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

<b>Volumen en fracción</b>	<b>Bibliografía</b>	<b>MATLAB®</b>	<b>% Desacuerdo</b>	<b>% Desacuerdo Relativo</b>
Perlita subdetectada ( $A_A$ )	28.1%	34.09%	21.33%	17.47%
Perlita detectada correctamente ( $A_A$ )	34.05%	34.09%	0.13%	NaN
Perlita sobredetectada ( $A_A$ )	42.30%	34.09%	19.39%	24.22%

**Nota.** La medición del volumen en fracción de perlita presenta un desacuerdo de 0.13% frente el valor de perlita correctamente detectada ( $A_A$ ); además, el desacuerdo relativo entre la medición de perlita subdetectada ( $A_A$ ) y el resultado obtenido por MATLAB® corresponde a 21.33% el cual al ser comparado con el desacuerdo relativo entre la medición de perlita subdetectada ( $A_A$ ) y el el valor de perlita correctamente detectada ( $A_A$ ) se obtiene un valor de 17.47% presentando una diferencia menor al 4% Tomado de: Brent, L. Metallography: An Introduction, Metallography and Microstructures. pp. 2-30.

Los datos bibliográficos reflejan los valores de composición para la misma muestra considerando diferentes niveles de filtración; donde el resultado de perlita subdetectada (28.1%) corresponde a una muestra filtrada con su morfología llena de poros e imperfecciones asociadas a la preparación de la muestra, el resultado de perlita sobredetectada (42.30%) corresponde a una muestra sin poros e imperfecciones; sin embargo, el resultado es una morfología dilatada la cual no refleja la composición original por el crecimiento de la perlita dentro de la imagen. El valor de perlita correctamente detectada (34.05%) evidencia la homogeneidad de las texturas la cual se relaciona con el tratamiento de eliminación de ruido e imperfecciones de la muestra siendo el valor real de la composición del material.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 34.

**Tabla 34.**

*Distribución de fase por fragmentos*

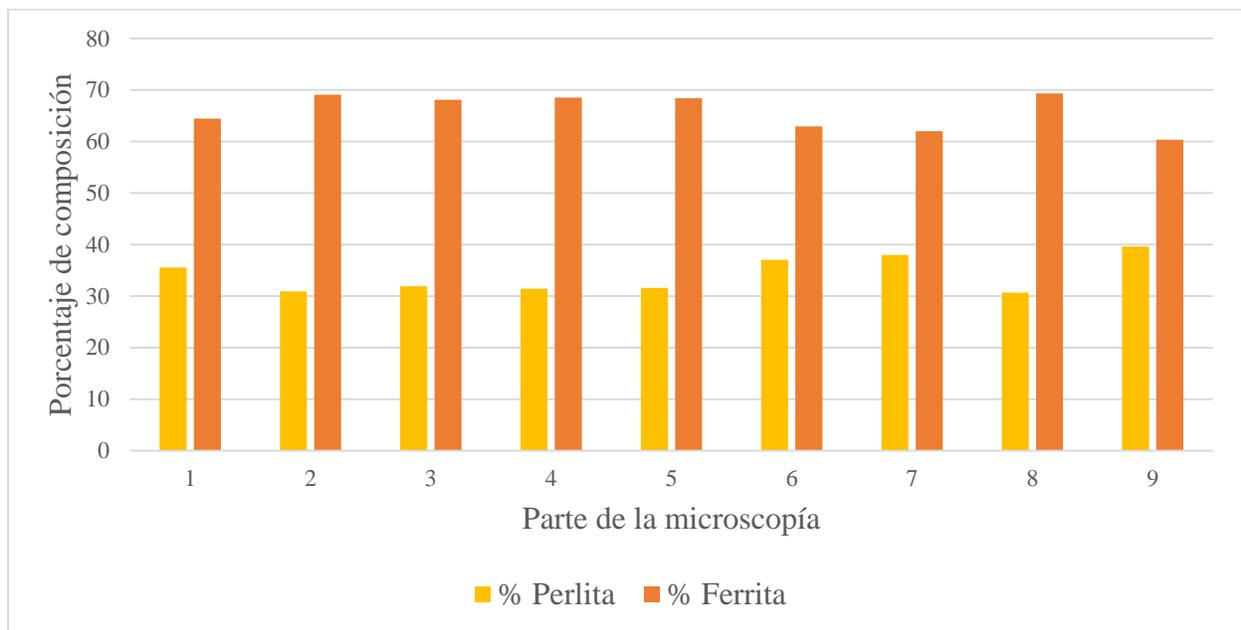
Fase	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 7	Parte 8	Parte 9
%P	35.55	30.93	31.92	31.46	31.59	37.05	38	30.67	39.64
%F	64.45	69.07	68.08	68.54	68.41	62.95	62	69.33	60.36

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F), porcentaje de perlita (%P). La distribución de fase que presenta mayor y menor cantidad de ferrita corresponde a la parte 9 (60.3%) y parte 8 (69.3%).

La figura 190 muestra un histograma de distribución de fases de las partes de la microscopía, los resultados muestran el análisis de la distribución en 9 fragmentos que conforman la totalidad de la imagen.

**Figura 190.**

*Histograma de datos de distribución de fases*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 34 donde la parte 8 presenta mayor porcentaje de ferrita con 69.33% y la parte 9 presenta mayor porcentaje de perlita con 39.64%

En conclusión, El análisis para el acero hipoeutectoide presenta un porcentaje de desacierto de 0.13% para la detección de la fase perlita y un desacierto relativo para la medición de perlita subdetectada y sobredetectada no mayor a 4%. La distribución de fases tomadas por fragmentos

presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 69.3% y 60.3%, para la fase perlita un volumen en fracción entre 39.6% y 30.6%.

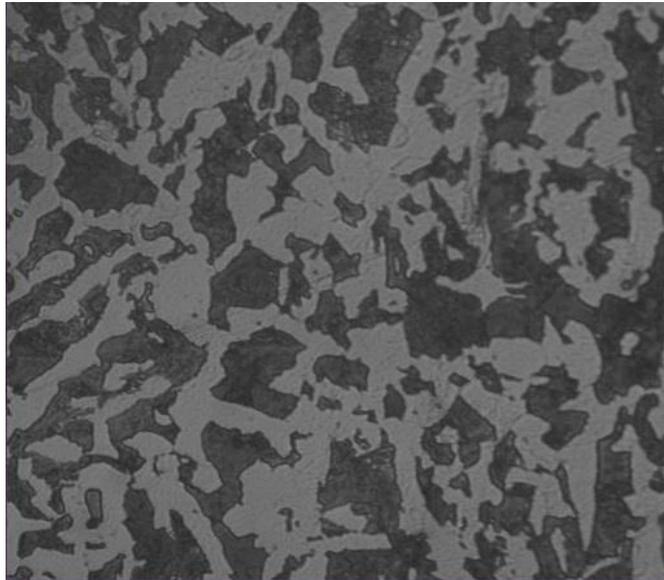
El uso de filtros para acentuar la morfología de fase evidencia la manipulaciones del histograma que permitan realzar aclarar la fase de mayor luz (ferrita) buscando un mayor contraste entre fases; la homogeneización de texturas mediante los filtros gaussiano, máximo y adaptativo permiten homogeneizar el ruido de la fase clara (ferrita); además, se eleva el contraste entre ambos constituyentes. Estos procesos no requieren tratar de forma independiente las fases de la microestructura, los bordes de grano entre un mismo tipo de constituyente no son frecuentes en la reproducción. El proceso de segmentación de la fase realiza una eliminación de áreas de 20 píxeles para el color blanco con el objetivo de eliminar formas diminutas producto de las filtraciones; no se usan las operaciones erosión o dilatación por la separación entre fases que elimina bordes de un mismo constituyente.

#### 4.5 Acero hipoeutectoide

Se usa la microscopía de un acero hipoeutectoide para la validación del programa de MATLAB® mostrado en la figura 191.[90]

##### **Figura 191.**

*Acero hipoeutectoide*

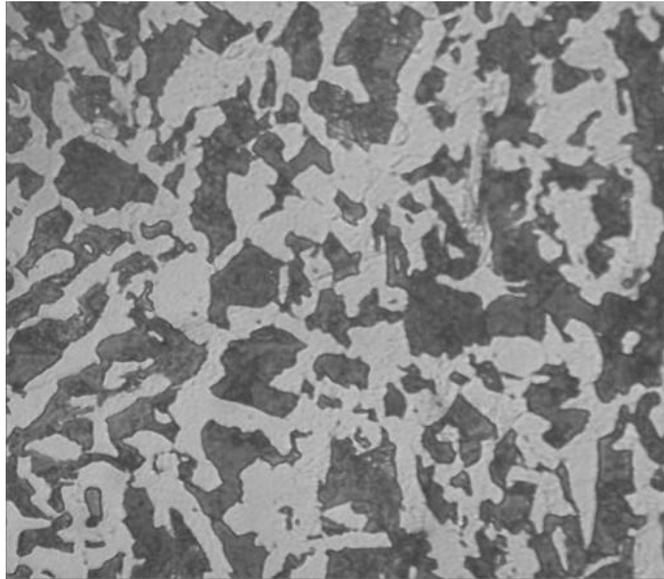


*Nota.* Acero hipoeutectoide. Tomado de: O. Rodríguez. Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico. pp 1-26.

La figura 192 muestra el resultado de las filtraciones para la representación de ambas fases.

**Figura 192.**

*Resultado de la filtración de fases*



*Nota.* filtración de imagen de realce para la fase perlita y un incremento del brillo de la fase ferrita.

La tabla 35 muestra los valores de aplicación de las filtraciones para la fase principal y secundaria.

**Tabla 35.**

*Datos de aplicación en la etapa de filtración*

<b>Aplicación de filtros</b>	<b>Valor</b>
Histograma (superior)	0
Histograma (inferior)	167.1
Enmascaramiento sin enfoque	0.45
Ecuación de histograma adaptativo	0
Filtro Gaussiano	0.18
Filtro Mediano	2
Filtro Mínimo	1
Filtro Máximo	1
Filtro Mínimo (NSEO)	0

Aplicación de filtros	Ferrita
Filtro Laplaciano	0
Filtro Cajas 2D	1
Filtro Adaptativo	2

*Nota.* la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de filtración donde la modificación del histograma define el contraste para tratar una fase u otra y los valores de los filtros en el dominio espacial detallan la morfología.

La segmentación de fases se muestra en la figura 193.

**Figura 193.**

*Resultado de la segmentación de fases*



*Nota.* Segmentación de fases ferrita (color blanco) y mrtensita (color negro)

La tabla 36 muestra los valores de aplicación de las herramientas de segmentación para la fase principal y secundaria.

**Tabla 36.**

*Datos de aplicación en la etapa de segmentación*

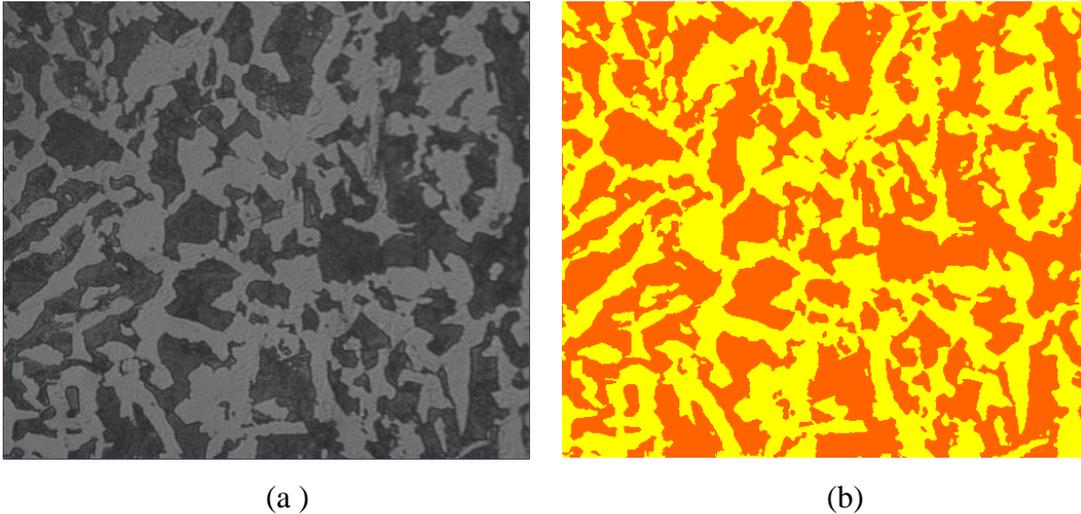
Aplicación de herramientas de segmentación	Especificación	Valor
Sensibilidad a la binarización	NaN	0.53
Binarización invertida	Invertida	NaN
Operación morfológica	NaN	NaN
Eliminación de áreas 1	Negro	40
Eliminación de áreas 2	Blanco	40

*Nota.* la tabla muestra los valores usados para la microscopía durante la etapa de segmentación donde la eliminación de áreas se aplica en la fase blanca y negra para eliminar impurezas y morfologías diminutas.

La imagen de representación de fases junto a la microscopía original se muestra en la figura 194.

**Figura 194.**

*Representación de fases*



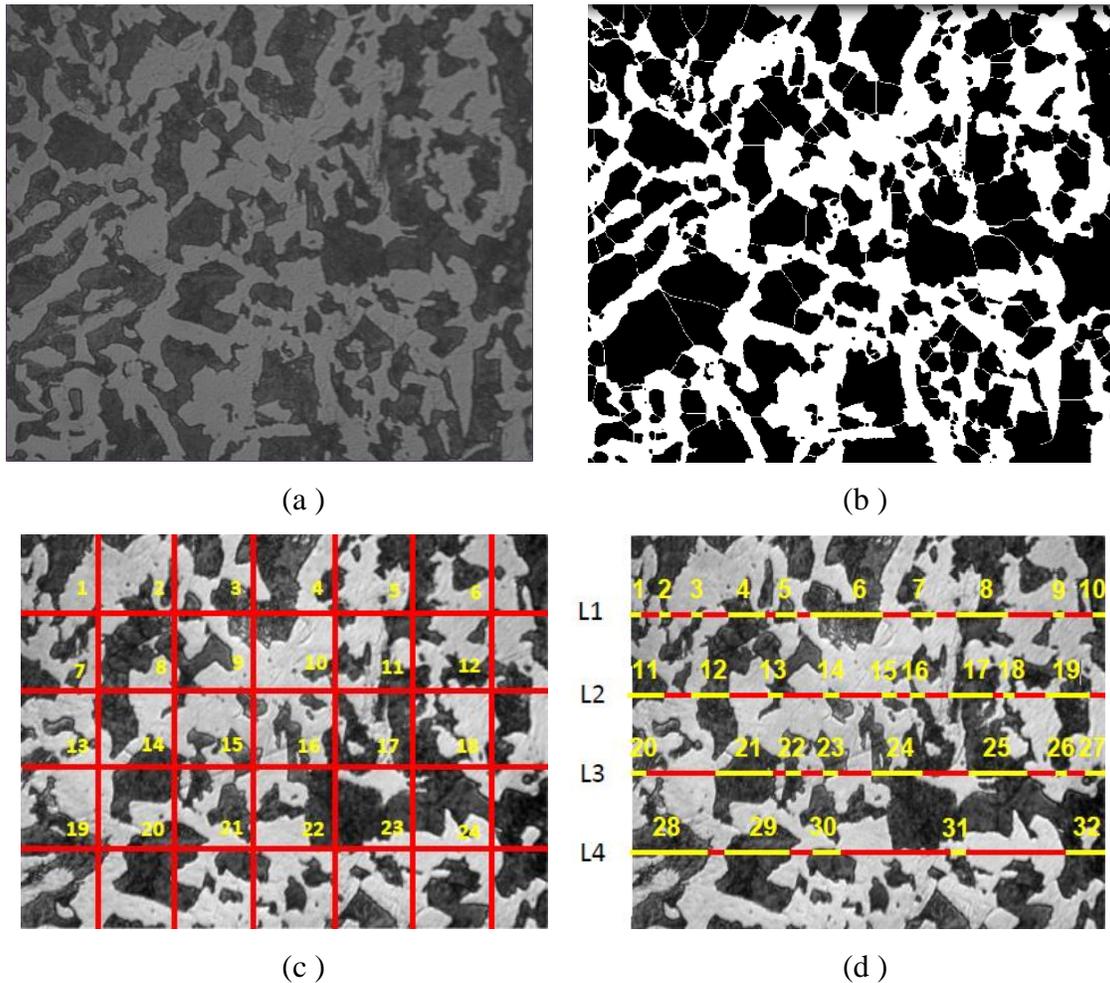
*Nota.* (a) microscopía original; (b) representación de fases donde el color naranja representa la fase perlita, el color amarillo la fase ferrita. Tomado de: O. Rodríguez. Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico. pp 1-26.

La bibliografía expone tres resultados de mediciones realizadas para la microscopía donde se emplean las mediciones estereológicas de fracción puntual ( $P_p$ ), fracción lineal ( $L_L$ ) y fracción de

área ( $A_A$ ) usando el software imageJ [90], [91]. La figura 195 muestra las mediciones realizadas en la bibliografía de referencia.

**Figura 195.**

*Medición del volumen en fracción de fases de un acero hipoeutectoide*



**Nota.** (a) imagen original; (b) medición del volumen en fracción por fracción de área ( $A_A = 48.4\%$ ); (c) medición del volumen en fracción por fracción puntual ( $P_p = 54\%$ ); (d) medición del volumen en fracción por fracción lineal ( $L_L = 50\%$ ). Tomado de: O. Rodríguez. Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico. pp 1-26.

Los resultados de la medición del volumen en fracción se muestran en la tabla 37; se realiza una comparación de los resultados obtenidos frente a la bibliografía de referencia.

**Tabla 37.***Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

Volumen en fracción	Bibliografía	MATLAB®	% Desacuerdo
Fracción de área ( $A_A$ )	48.4%	52.04%	7.52%
Fracción puntual ( $P_P$ )	54.0%	52.04%	3.65%
Fracción lineal ( $L_L$ )	50.0%	52.04%	4.08%

**Nota.** Comparación de resultados. Los tres métodos de medición expuestos en la bibliografía se comparan con el resultado obtenido por el software MATLAB® (52.04%). Tomado de: O. Rodríguez. Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico. pp 1-26.

En conclusión, El análisis para el acero hipoeutectoide se presenta un porcentaje de desacuerdo de 7.52% para la medición del fase perlita; se asocia el porcentaje de desacuerdo de la muestra medida por fracción de área ( $A_A$ ) al uso de filtraciones del autor de referencia, se puede notar como la morfología tratada muestra elementos no coincidentes con la imagen original (ver figura 195); además, el uso de la segmentación por cuenca hidrográfica segmenta morfologías que a diferencia de la reproducción original se encuentran unidas.

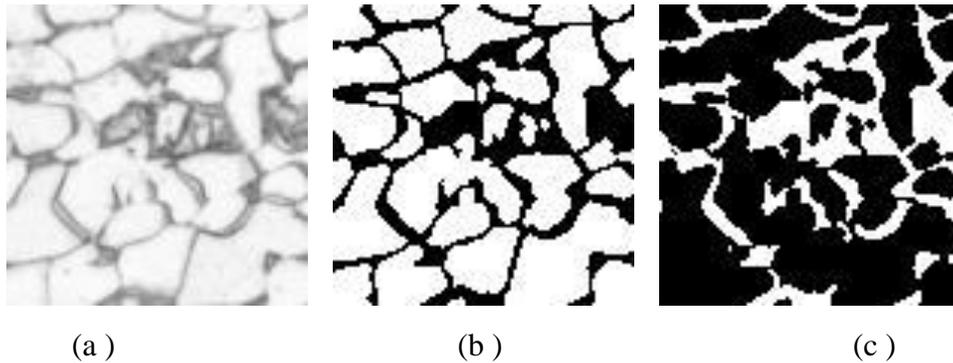
El uso de filtros para acentuar la morfología de fase evidencia la manipulaciones del histograma que permitan realzar aclarar la fase de mayor luz (ferrita) buscando un mayor contraste entre fases; la homogeneización de texturas mediante los filtros gaussiano y mínimo NSEO permiten homogeneizar el ruido de la fase clara (ferrita); además, permiten elevar el contraste entre ambos constituyentes. Estos procesos no requieren tratar de forma independiente las fases de la microestructura, los bordes de grano entre un mismo tipo de constituyente no son frecuentes en la reproducción. El proceso de segmentación de la fase realiza una eliminación de áreas de 23 píxeles para el color blanco y negro con el objetivo de eliminar formas diminutas producto de las filtraciones. No se usan las operaciones erosión o dilatación debido a la separación entre fases que se destaca por la ausencia en gran medida de bordes de grano.

#### 4.6 Acero de doble fase (fragmento de muestra 1)

Se usa un fragmento de 100x100 (píxeles) para la cuantificación del volumen en fracción correspondiente a las investigaciones del ingeniero Diego Fernando Avendaño para realizar la comparación del resultado obtenido frente a la medición estereológica por fracción de área ( $A_A$ ). La figura 190 muestra el fragmento usado y la segmentación de fases realizada.

**Figura 196.**

*Fragmento de imagen y segmentación de fases*

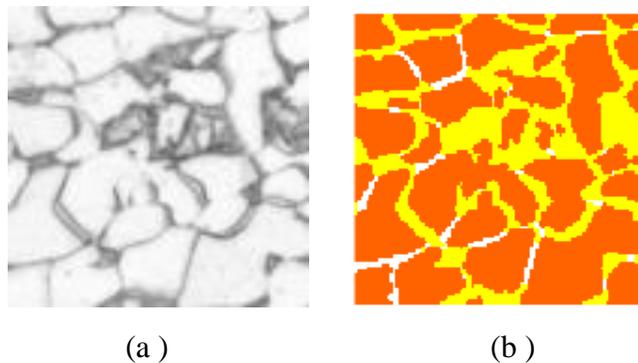


*Nota.* (a) fragmento original; (b) segmentación de la primera fase; (c) segmentación de la segunda fase. La obtención del fragmento se realiza mediante la ventana de fragmentación y fusión empleando la herramienta “fragmentación libre”

La representación de fases se muestra en la figura 197.

**Figura 197.**

*Representación de fases*

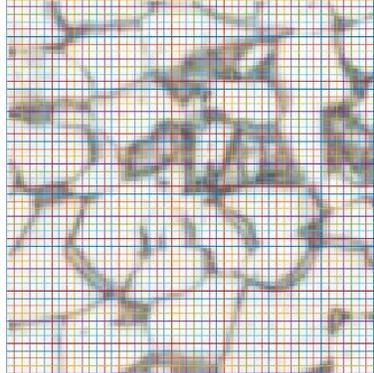


*Nota.* representación de fases donde el color naranja representa la fase ferrita (68.6%), el color amarillo la fase martensita (27.7%) y el color blanco los bordes de grano (3.7%).

Para la medición de fracción de área ( $A_A$ ) mediante técnicas de estereología, se define una malla de 2500 elementos (50x50) sobre el fragmento de la microscopía original; esto se ilustra en la figura 198.

**Figura 198.**

*Malla de medición*

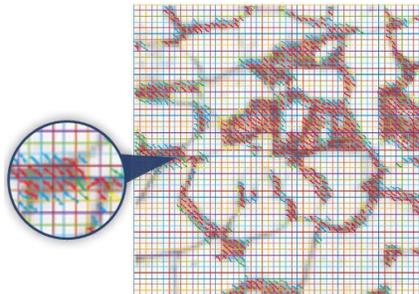


**Nota.** La malla de medición se realiza en el software MATLAB® mediante la función *meshgrid*; [92] esta malla se usa para el conteo de elementos pertenecientes a la fase de interés (martensita).

El conteo de elementos se realiza de forma manual; se considera si el cuadrado ocupado se encuentra ocupado en su totalidad, si está a  $\frac{3}{4}$  de ocupación,  $\frac{1}{2}$  de ocupación o  $\frac{1}{4}$  de ocupación; la muestra de elementos identificados se realiza en la figura 199.

**Figura 199.**

*Conteo de elementos sobre la malla de medición*



**Nota.** los trazos sobre la malla de color rojo representan ocupación total de la fase martensita, el color azul  $\frac{3}{4}$  de ocupación, el color verde  $\frac{1}{2}$  de ocupación y finalmente el color amarillo  $\frac{1}{4}$  de ocupación.

La tabla 38 muestra el resultado del conteo y cuantificación del volumen en fracción de la fase martensita considerando el 100% de la imagen como 2500 elementos (50x50).

**Tabla 38.**

*Datos del volumen en fracción para la fase martensita*

Ocupación	Cuadros ocupados	Total	Composición
1	521	521	20.84%
3/4	147	110.25	4.41%
1/2	73	36.5	1.46%
1/4	44	11	0.44%
		<b>1821.25</b>	<b>27.15%</b>

*Nota.* La columna “Total” representa la multiplicación de la ocupación por la respectiva cantidad de cuadros ocupados siendo para la totalidad de ocupación 521 elementos,  $\frac{3}{4}$  de ocupación 147 elementos,  $\frac{1}{2}$  de ocupación 73 elementos y finalmente 44 elementos para  $\frac{1}{4}$  de ocupación. El resultado de la medición es de 1821.25 elementos (sumatoria) con un porcentaje de composición equivalente a 27.1% para la fase martensita.

La comparación de resultados se muestra en la tabla 39.

**Tabla 39.**

*Volumen en fracción y comparativa entre resultados*

Volumen en fracción	Estereología	MATLAB®	% Desacuerdo
Martensita	27.1%	27.7%	2.21%

*Nota.* La medición del volumen en fracción para la fase martensita presenta un porcentaje de desacuerdo del 2.2% frente a la medición estereológica por fracción de área ( $A_A$ ), se usa este tipo medición por su exactitud a pesar de ser un procesos que requiere mucho tiempo frente a otras metodologías.

En conclusión, para el análisis del fragmento del acero de doble fase se presenta un porcentaje de desacuerdo de 2.2% para la detección de martensita frente a la medición estereológica; la medición presenta un desacuerdo muy bajo evidenciando la eficiencia del programa; además, se destaca la eficacia en la toma de resultados por su rapidez en comparación con las medición estereológica. Como comparación y asociación al desacuerdo de la medición se concluye que la malla definida para el conteo puede ser refinada con más elementos, esto presume una mejora en

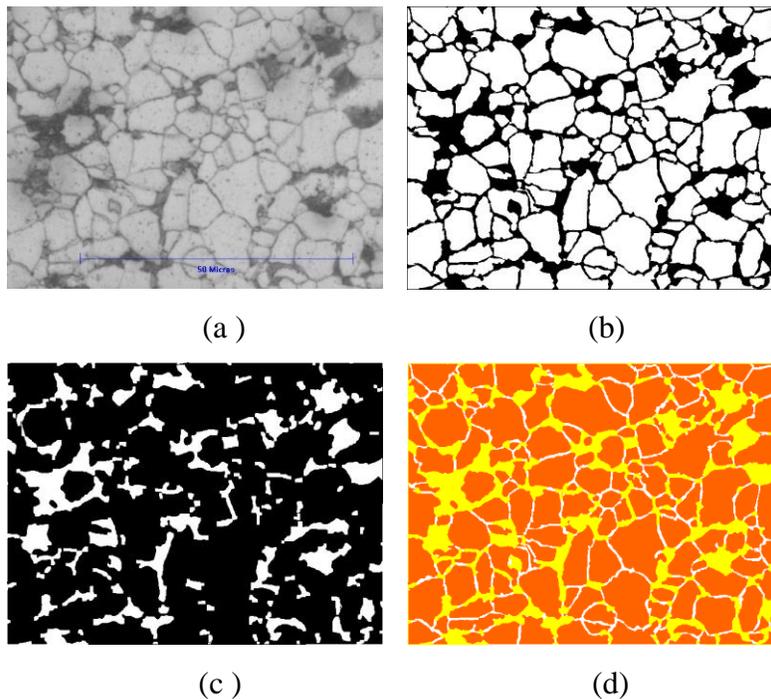
la obtención del resultado; sin embargo, requerirá mayor tiempo al realizar el conteo de elementos y la posibilidad de cometer errores en este proceso se incrementa.

#### 4.7 Fragmento de acero de doble fase (muestra 1)

Se usa la microscopía de un acero de doble fase correspondiente a las investigaciones del ingeniero Diego Fernando Avendaño para realizar la comparación del resultado obtenido del programa del software MATLAB® frente a la medición estereológica del tamaño de grano. La figura 200 muestra la microscopía usada y la segmentación de fases realizada.

**Figura 200.**

*Acero de doble fase en estado de entrega y segmentación de fases*



**Nota.** (a) microscopía original, acero de doble fase ( $C = 0.066$ ,  $N = 0.0022$ ,  $Mn = 1.219$ ,  $Cr = 0.135$ ,  $Si = 0.988$ ,  $P = 0.011$ ,  $S = 0.007$ ); (b) Segmentación de granos de fase ferrita; (c) Segmentación de granos de fase martensita; (d) Representación de fases y bordes de grano donde el color naranja representa la fase ferrita, el color amarillo la fase martensita y el color blanco los bordes de grano.

La tabla 40 muestra los resultados de la medición del volumen en fracción de la microestructura.

**Tabla 40.**

*Resultados de composición*

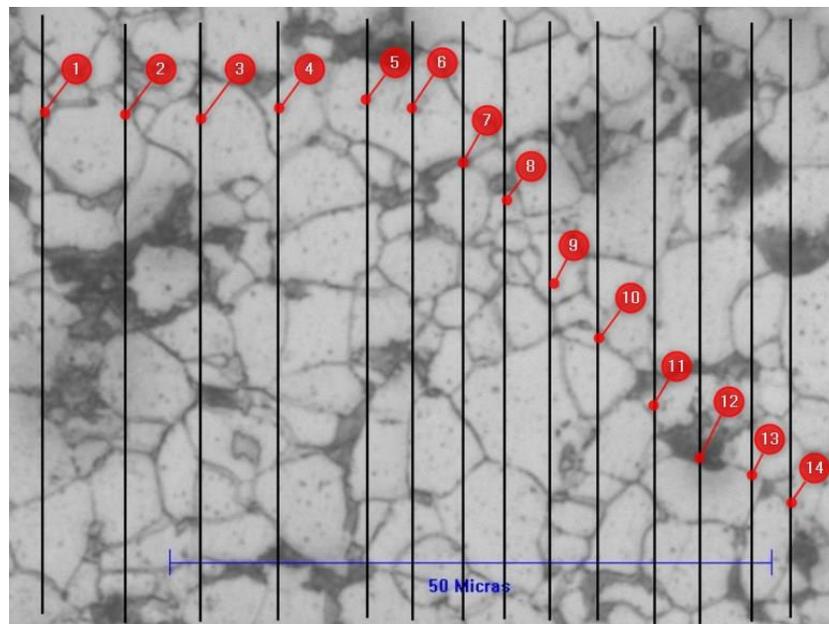
Volumen en fracción	Bibliografía
Martensita	20.19%
Ferrita	72.60%
Bordes de grano	7.21%

*Nota.* La medición del volumen en fracción de la fase ferrita corresponde a 72.6%; este dato es usado para la medición del tamaño de grano.

La medición del tamaño de grano se realiza mediante los métodos estereológicos según la norma ASTM E112 [5] y el método de los interceptos para microscopías de dos constituyentes; se realiza la medición de 14 líneas de prueba horizontales para la toma de datos como ilustra la figura 201.

**Figura 201.**

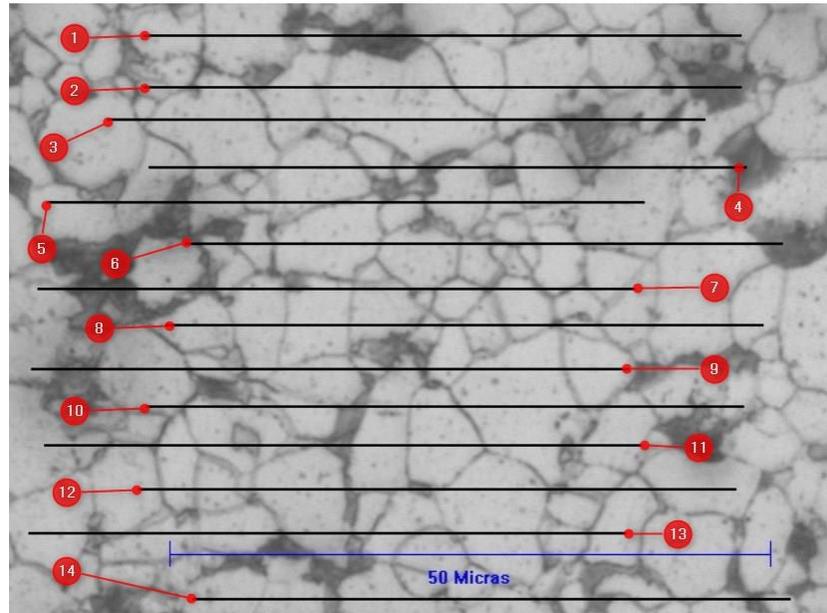
*Líneas de prueba usadas para la medición del tamaño de grano*



(a)

## Figura 201. Continuación

*Líneas de prueba usadas para la medición del tamaño de grano*



(b)

**Nota.** (a) líneas de prueba para la medición del tamaño de grano en sentido vertical; (b) líneas de prueba para la medición del tamaño de grano en sentido horizontal. Las 14 líneas horizontales y verticales poseen una longitud de  $50 \mu m$ ; esta medida es tomada de la escala de la microscopía.

Se realiza la medición de la longitud de grano para determinar el promedio de las 28 mediciones; estas mediciones se muestran en la tabla 41.

**Tabla 41.***Medición de granos interceptados en la muestra.*

Medición de líneas horizontales				Medición de líneas verticales			
Línea de prueba	Longitud de línea ( $\mu m$ )	Granos interceptados	Diámetro ( $\mu m$ )	Línea de prueba	Longitud de línea ( $\mu m$ )	Granos interceptados	Diámetro ( $\mu m$ )
1	50	8	4.54	1	50	13	2.79
2	50	9	4.03	2	50	9	4.03
3	50	8	4.54	3	50	10	3.63
4	50	11	3.30	4	50	11	3.30
5	50	10	3.63	5	50	10	3.63
6	50	10	3.63	6	50	10	3.63
7	50	12	3.03	7	50	11	3.30
8	50	12	3.03	8	50	11	3.30
9	50	9	4.03	9	50	12	3.03
10	50	9	4.03	10	50	12	3.03
11	50	9	4.03	11	50	12	3.03
12	50	11	3.30	12	50	8	4.54
13	50	11	3.30	13	50	11	3.30
14	50	8	4.54	14	50	9	4.03
<b>Promedio (mm)</b>			<b>0.00378</b>	<b>Promedio (mm)</b>			<b>0.00347</b>

**Nota.** la cuantificación del diámetro se realiza con la expresión:  $l_{\alpha} = \frac{(V_V) * (L/M)}{N_{\alpha}}$  y se cuantifica el promedio de las dos mediciones que corresponde a 0.00363 mm

La cuantificación del tamaño de grano se según la norma ASTM E112 se expresa mediante la siguiente ecuación.[5]

$$G = [-6.644 (\log l_{\alpha}) - 3.288]$$

Donde:

$$l_{\alpha} = 0.00363 \text{ mm}$$

Por lo tanto:

$$G = [-6.644 (\log (0.00363)) - 3.288]$$

$$G = 12.9223$$

Al ser definido el tamaño de grano ASTM se realiza una interpolación entre los datos de la tabla 1 tomando los valores  $G = 12.5$  y  $G = 13$  como datos de interpolación para determinar el tamaño de grano según la norma ASTM-E112; Los resultados se muestran en la tabla 42.

**Tabla 42.**

*Definición del tamaño de grano de ferrita según la norma ASTM*

<b>G</b>	<b>Diámetro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>
12.50	4.70
12.92	4.10
13	4

*Nota.* Se realiza una interpolación de datos para obtener el valor correspondiente a 12.9223 del tamaño de grano ASTM

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) usando el programa de MATLAB® se muestran en la tabla 43.

**Tabla 43.**

*Tamaño de grano de ferrita (Diámetro)*

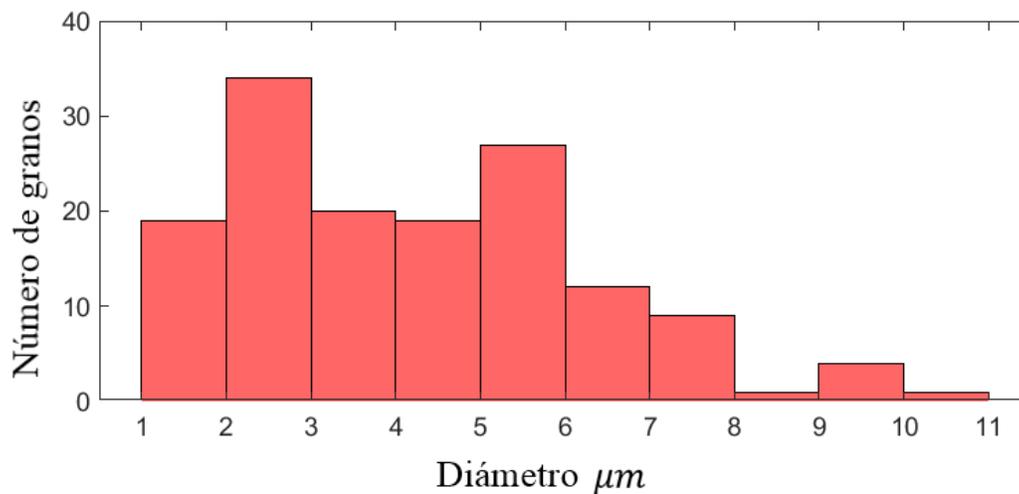
Diámetro	Ferrita
Mínimo ( $\mu m$ )	11.86
Máximo ( $\mu m$ )	0.14
Promedio ( $\mu m$ )	3.29

*Nota.* El diámetro promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

La figura 202 muestra el histograma de distribución del tamaño de grano (diámetro) para la fase ferrita

**Figura 202.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (Diámetro)*

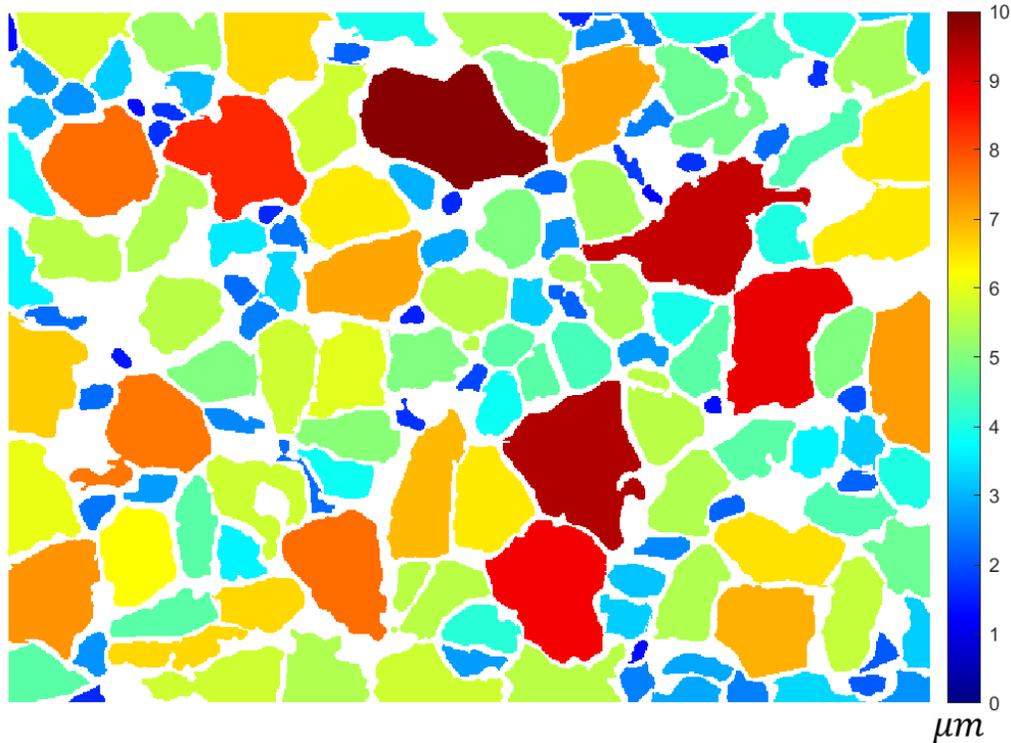


*Nota.* Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de diámetro se encuentra entre 2  $\mu m$  y 3  $\mu m$ .

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetro) se muestra en la figura 203.

**Figura 203.**

*Representación del diámetro en  $\mu\text{m}$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que los granos se encuentran dispersos por toda la escala de medición siendo 5 elementos detectados los que poseen un valor de más de  $8 \mu\text{m}$ . Para la gráfica se definen 120 etiquetas para la representación de color.

La tabla 44 muestra el porcentaje de error para la medición del tamaño de grano (diámetro). El dato medido a partir de estereología corresponde a  $4.108 \mu\text{m}$ .

**Tabla 44.**

*Tamaño de grano y comparativa del resultado*

Tamaño de grano	Estereología	MATLAB®	% Desacuerdo
Ferrita ( $\mu\text{m}$ )	4.10	4.29	4.6%

*Nota.* El resultado obtenido por el software MATLAB® presenta un desacuerdo menor al 5% frente al dato cuantificado.

En conclusión, para el análisis del acero de doble fase se presenta un porcentaje de desacuerdo de 4.6% para la medición del tamaño de grano mediante el programa de MATLAB® frente a la

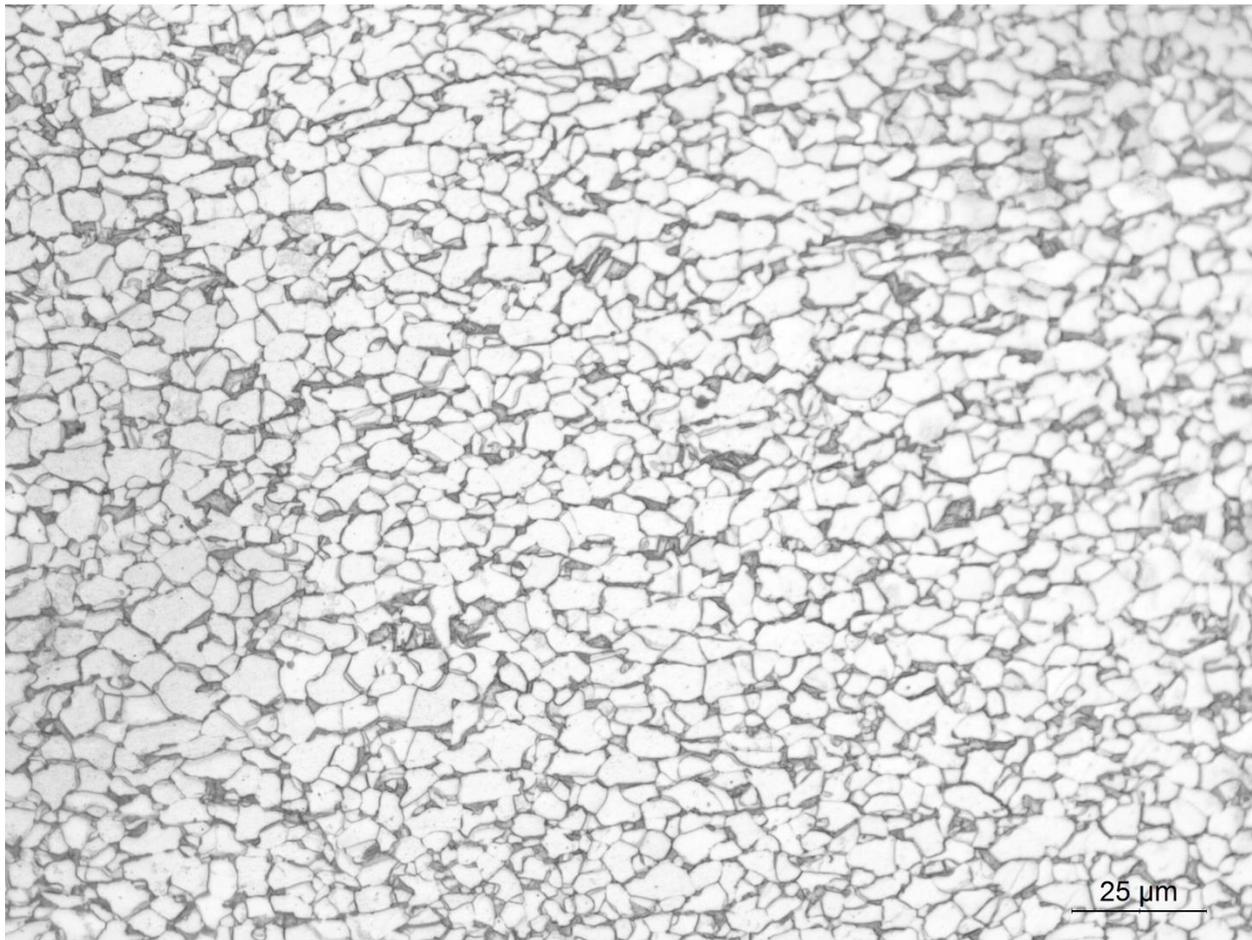
medición estereológica. La medición presenta un error muy bajo evidenciando la eficiencia del programa; además, se destaca la eficacia en la toma de la medición que usa la cuantificación del tamaño por elemento y su rapidez en comparación con las mediciones estereológicas que usan promedios para esta estimación.

#### 4.8 Acero de doble fase (Imagen completa de muestra 1)

Se usa la microscopía de un acero de doble fase correspondiente a las investigaciones del ingeniero Diego Fernando Avendaño; la figura 204 muestra la microscopía del acero en estado de entrega.

#### Figura 204.

*Acero de doble fase en estado de entrega*

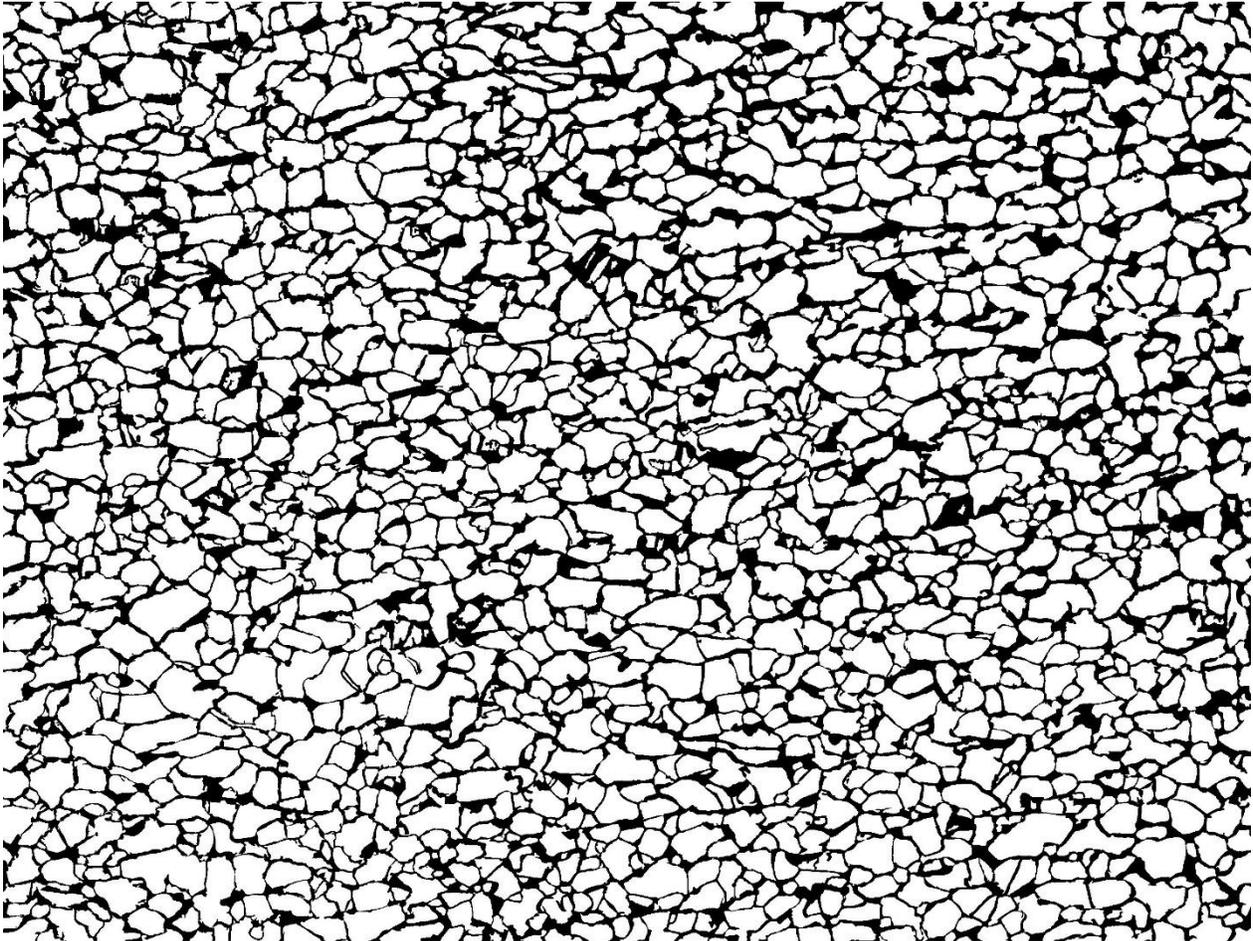


**Nota.** El acero de doble fase fase ( $C = 0.066$ ,  $N = 0.0022$ ,  $Mn = 1.219$ ,  $Cr = 0.135$ ,  $Si = 0.988$ ,  $P = 0.011$ ,  $S = 0.007$ ) presenta una morfología detallada con bordes de grano definidos y un acabado superficial con poco ruido.

La figura 205 muestra el resultado de la segmentación de la fase ferrita.

**Figura 205.**

*Segmentación de la fase ferrita*

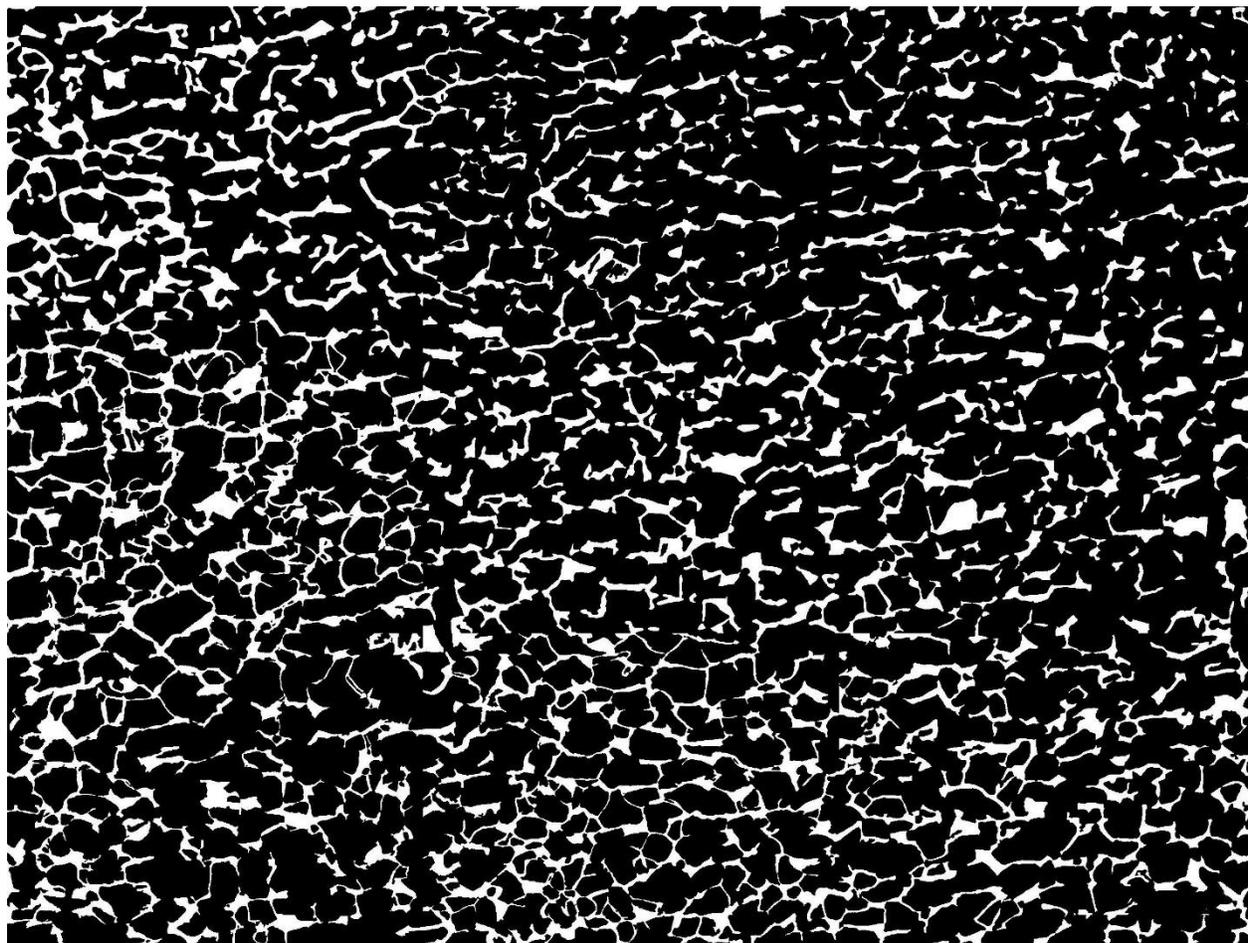


*Nota.* La segmentación se realiza mediante la fragmentación de la imagen original en 9 partes usando la ventana de “fragmentación y fusión” donde posteriormente se filtra y segmenta cada parte de la microscopía con el objetivo de enfatizar la fase ferrita y finalmente unir las partes segmentadas en la reproducción mostrada en la figura.

La figura 206 muestra el resultado de la segmentación de la fase martensita.

**Figura 206.**

*Segmentación de la fase martensita*

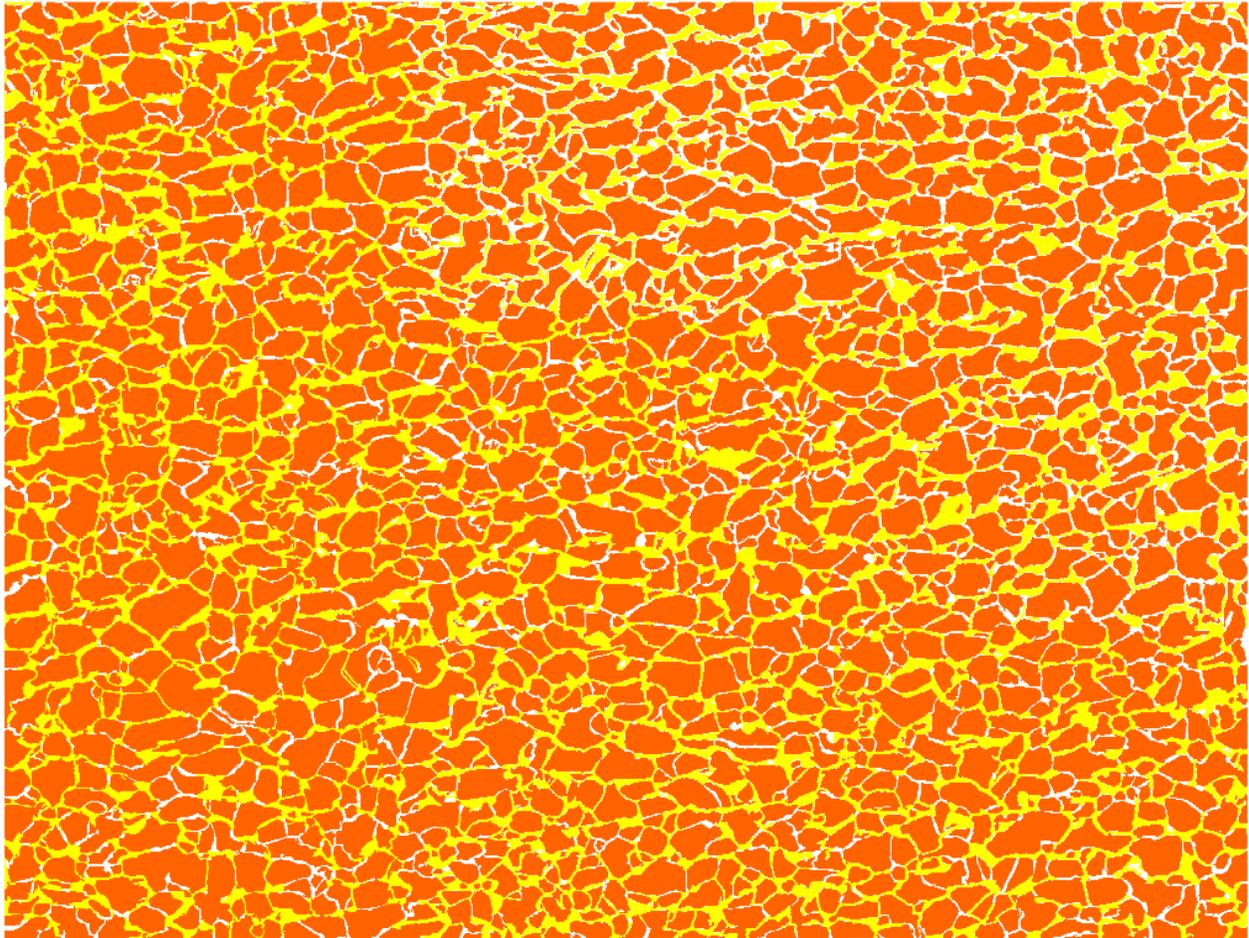


*Nota.* La segmentación se realiza mediante la fragmentación de la imagen original en 9 partes usando la ventana de “fragmentación y fusión” donde posteriormente se filtra y segmenta cada parte de la microscopía con el objetivo de enfatizar la fase martensita y finalmente unir las partes segmentadas en la reproducción mostrada en la figura.

La imagen de representación de fases de la microscopía se muestra en la figura 207.

**Figura 207.**

*Representación de fases y bordes de grano*



**Nota.** La figura muestra la fase ferrita con un color naranja de representación, la fase martensita de color amarillo y los espacios blancos representan bordes de grano.

La tabla 45 muestra los resultados de la medición del volumen en fracción de la microestructura:

**Tabla 45.***Resultados de composición*

Volumen en fracción	MATLAB®
Martensita	19.05%
Ferrita	69.98%
Bordes de grano	10.97%

**Nota.** Los resultados del programa evidencian la gran cantidad de bordes de grano presentes en la microestructura.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 46.

**Tabla 46.***Distribución de fase por fragmentos*

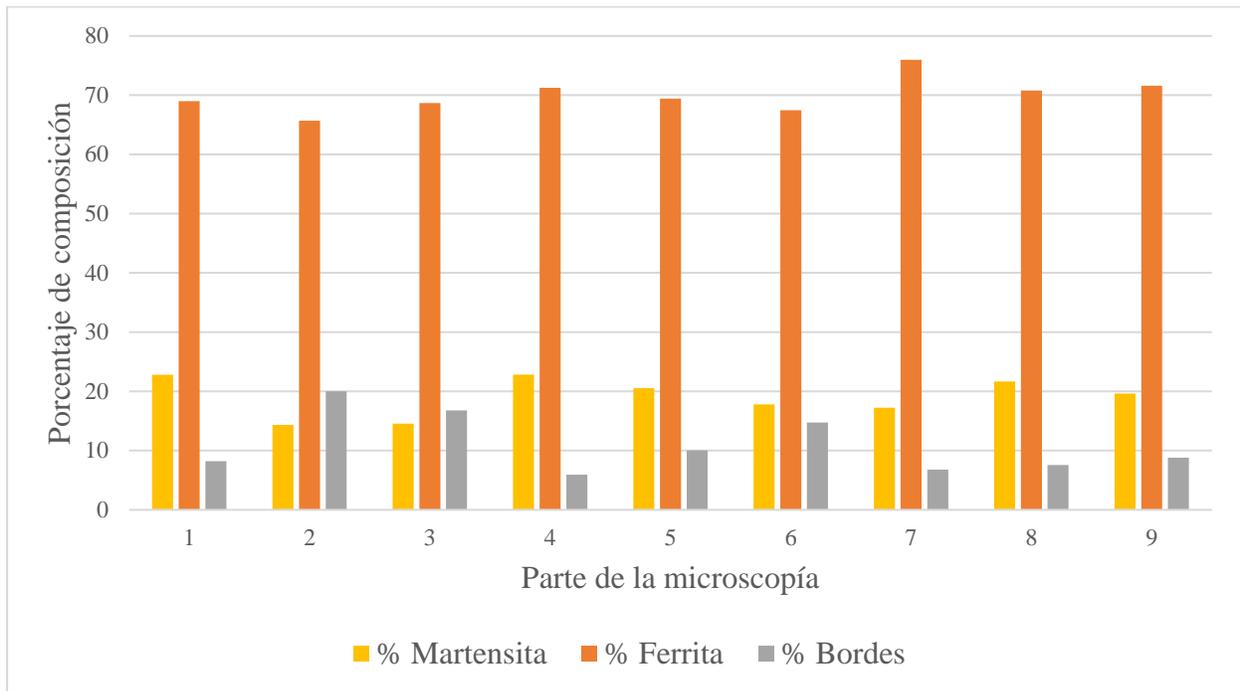
Fase	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 7	Parte 8	Parte 9
%M	22.8	14.33	14.56	22.82	20.53	17.79	17.23	21.66	19.63
%F	68.99	65.68	68.66	71.24	69.43	67.46	75.97	70.78	71.58
%B	8.21	19.99	16.78	5.94	10.04	14.75	6.8	7.56	8.79

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F), porcentaje de martensita (%M) y porcentaje de bordes de grano (%B). La distribución de fase que presenta menor y mayor cantidad de martensita corresponde a la parte 2 (14.33%) y parte 4 (22.82%).

La figura 179 muestra un histograma de distribución de fases y bordes de grano de las partes de la microscopía.

**Figura 208.**

*Histograma de distribución de fases y bordes de grano*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 46 donde la parte 2 presenta mayor porcentaje de bordes de grano con 19.9%, la parte 7 presenta mayor porcentaje de ferrita con 75.9% y la parte 4 presenta mayor porcentaje de martensita con 22.8%

Los resultados de la medición del espaciamiento entre fase se muestran en la tabla 47.

**Tabla 47**

*Espaciamiento entre fases*

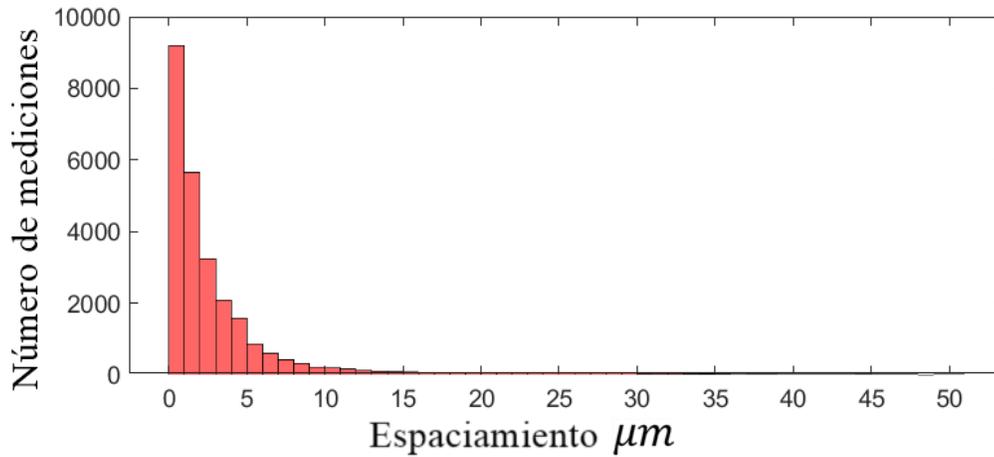
Espaciamiento	Ferrita	Martensita
Mínimo ( $\mu m$ )	0	0
Máximo ( $\mu m$ )	50.8	161.1
Promedio ( $\mu m$ )	3.2	14.3

**Nota.** El espaciamiento considera los bordes de grano de la microscopía; se mide estrictamente la distancia entre las fases de un mismo constituyente.

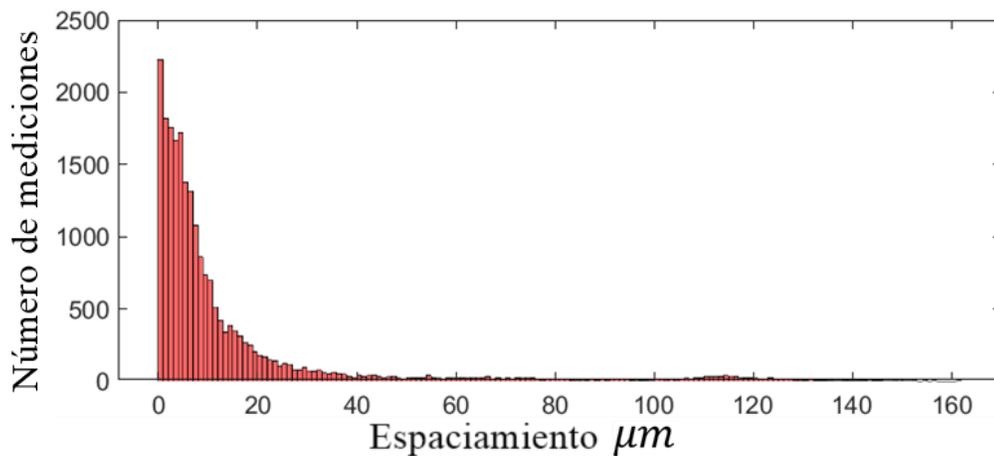
Los histogramas de medición en función del espaciamiento se muestran en la figura 209.

**Figura 209.**

*Histograma de espaciamento entre fase*



(a)



(b)

**Nota.** (a) histogramas de representación del espaciamento entre la fase ferrita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre 0  $\mu m$  y 1  $\mu m$  y el promedio es de 3.2  $\mu m$ ; (b) histogramas de representación del espaciamento entre la fase martensita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre 0  $\mu m$  y 1  $\mu m$  y el promedio es de 14.3  $\mu m$ .

Los resultados de la medición de tamaño de grano (áreas) de ferrita se muestran en la tabla 48.

**Tabla 48.**

*Tamaño de grano (área) de ferrita*

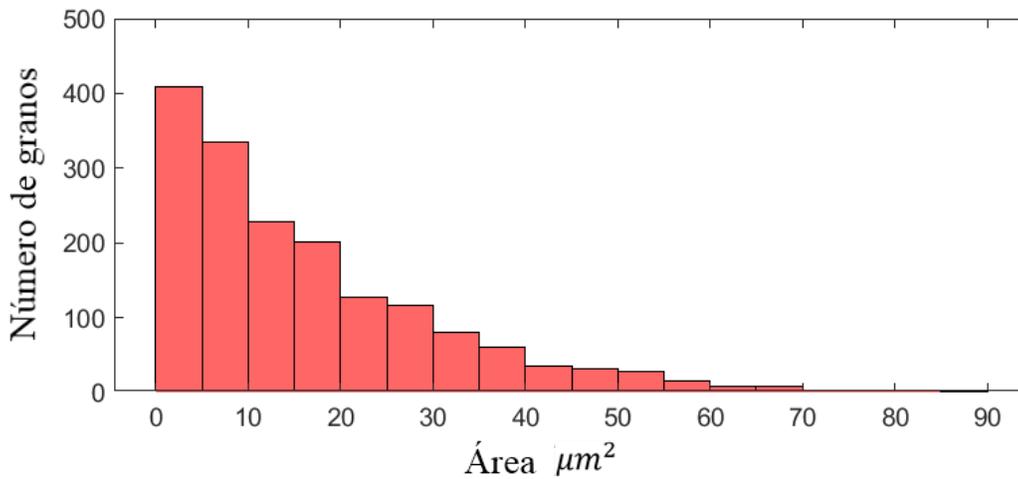
Área	Valor
Mínima ( $\mu\text{m}^2$ )	0.79
Máxima ( $\mu\text{m}^2$ )	86.62
Promedio ( $\mu\text{m}^2$ )	16.54

*Nota.* El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de área.

La figura 210 muestra los histogramas de distribución del tamaño de grano (área) para las fase ferrita

**Figura 210.**

*Histograma de distribución del tamaño de grano (área) de ferrita*

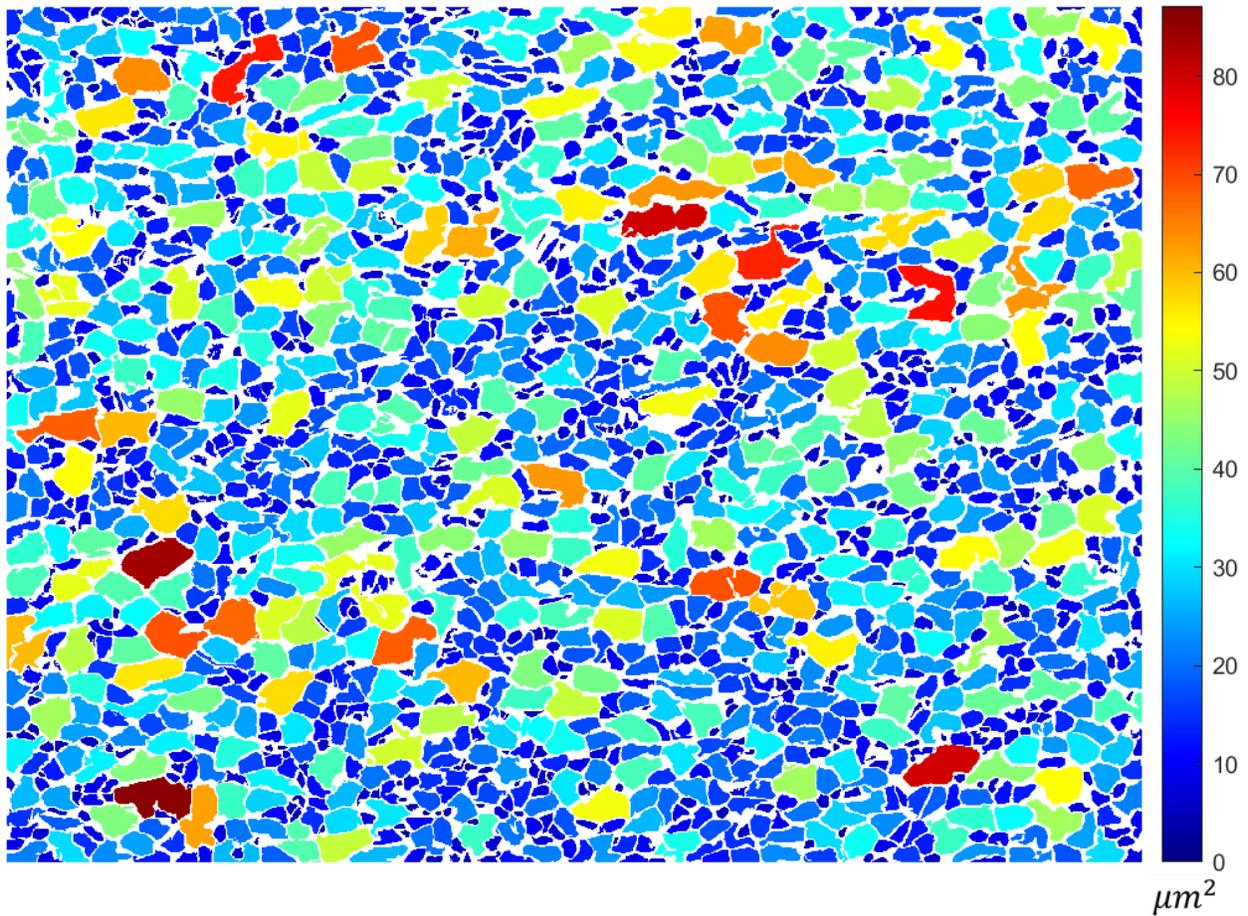


*Nota.* (a) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre  $0 \mu\text{m}^2$  y  $5 \mu\text{m}^2$ .

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (áreas) se muestra en la figura 211.

**Figura 211.**

*Representación de áreas en  $\mu\text{m}^2$  de granos de ferrita*



*Nota.* Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre 0  $\mu\text{m}^2$  y 40  $\mu\text{m}^2$  siendo 8 elementos detectados los que poseen un valor de más de 70  $\mu\text{m}^2$ . Para la gráfica se definen 1000 etiquetas de representación de color.

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) se muestran en la tabla 49.

**Tabla 49.**

*Tamaño de grano (Diámetro) de ferrita*

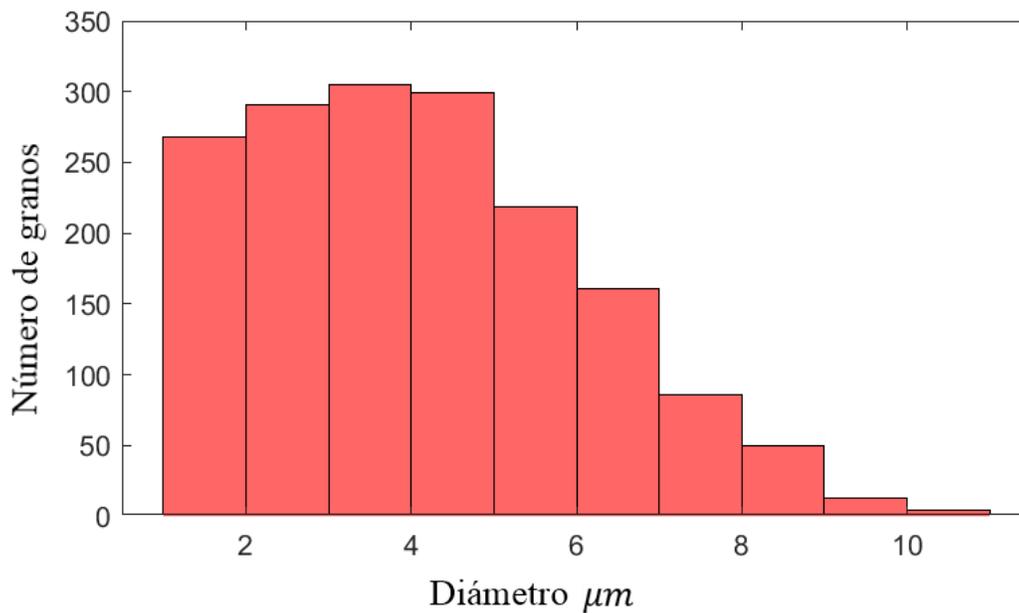
Diámetro	Ferrita
Mínimo ( $\mu m$ )	1.00
Máximo ( $\mu m$ )	10.70
Promedio ( $\mu m$ )	4.12

*Nota.* El diámetro promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

La figura 212 muestra los histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro) para la fase ferrita.

**Figura 212.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)*

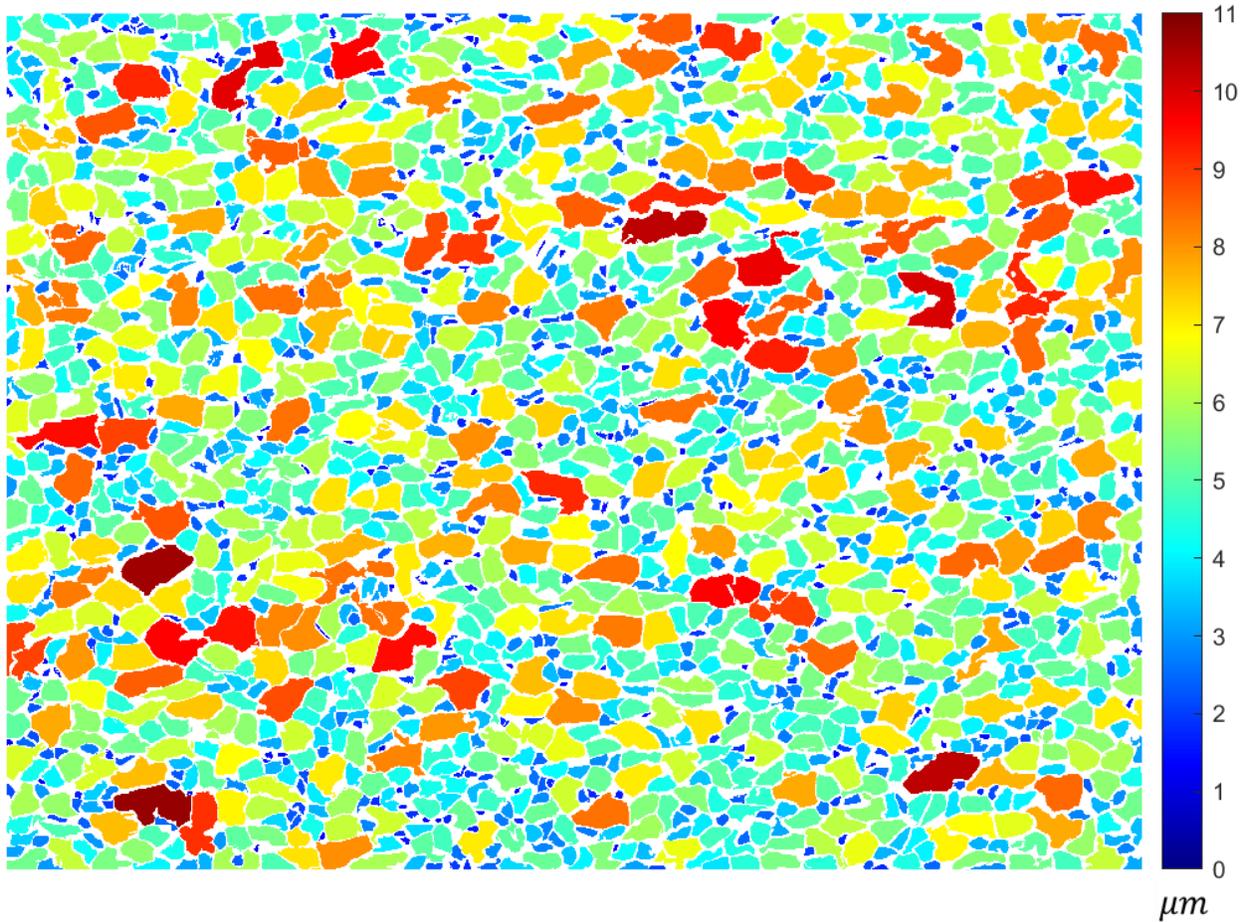


*Nota.* (a) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de diámetro se encuentra entre  $3 \mu m^2$  y  $5 \mu m^2$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetros) se muestra en la figura 213.

**Figura 213.**

*Representación de diámetros en  $\mu m$  de granos de ferrita*

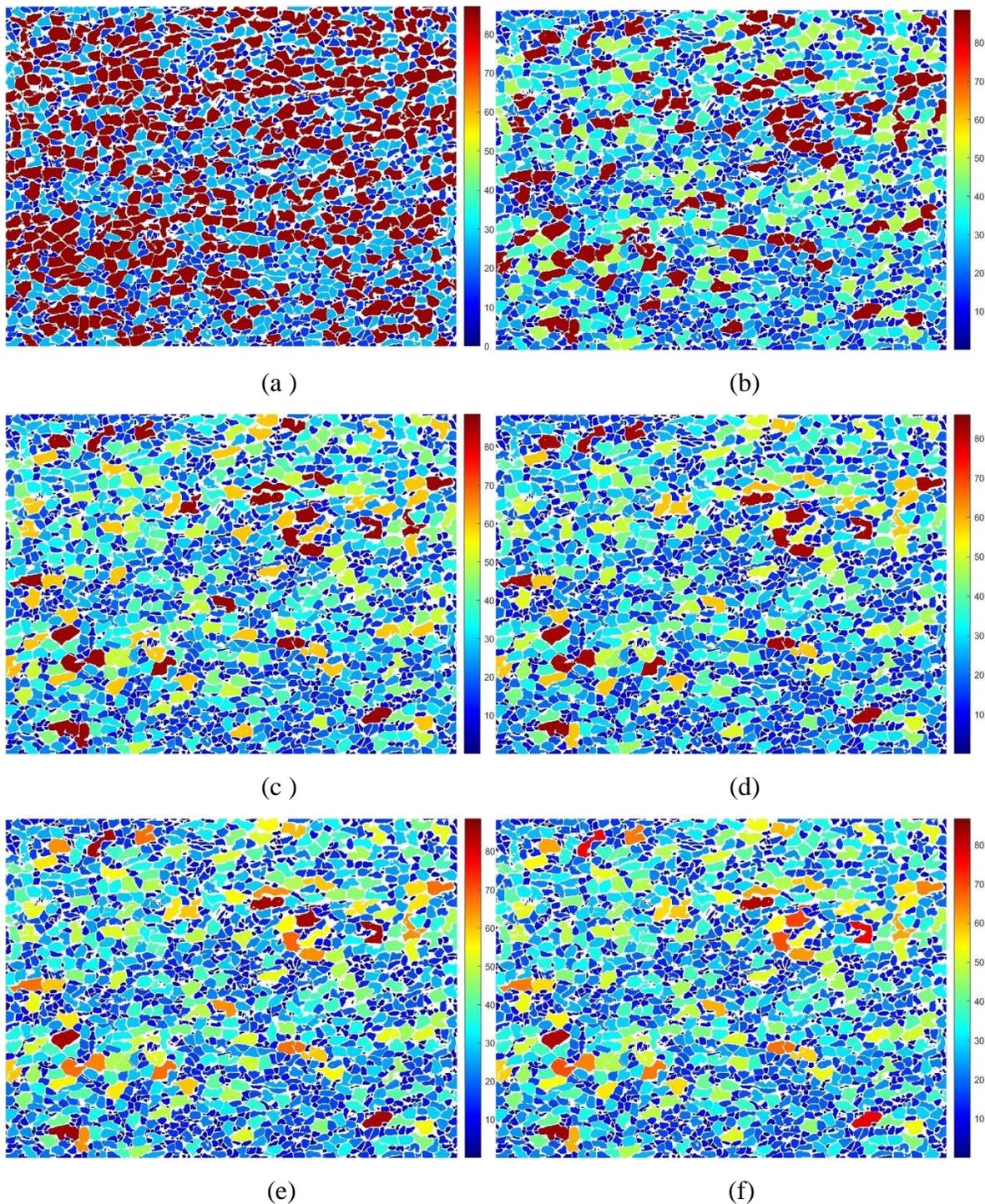


**Nota.** Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre 3 y 5  $\mu m$  siendo 18 elementos detectados que poseen un valor de más de 9  $\mu m$ . Para la gráfica se definen 1000 etiquetas de representación de color.

Las etiquetas son usadas para distribuir las mediciones obtenidas en grupos donde dependiendo del número de etiquetas definidas por el usuario, se obtendrán mejores estimaciones en la representación de la gráfica de color; los histogramas de valores de diámetro y área reflejan los datos de las mediciones y no los datos de las etiquetas, en la figura 214 se muestra diferentes valores de etiquetas para la muestra.

**Figura 214.**

*Resultados con diferentes valores de etiquetas.*

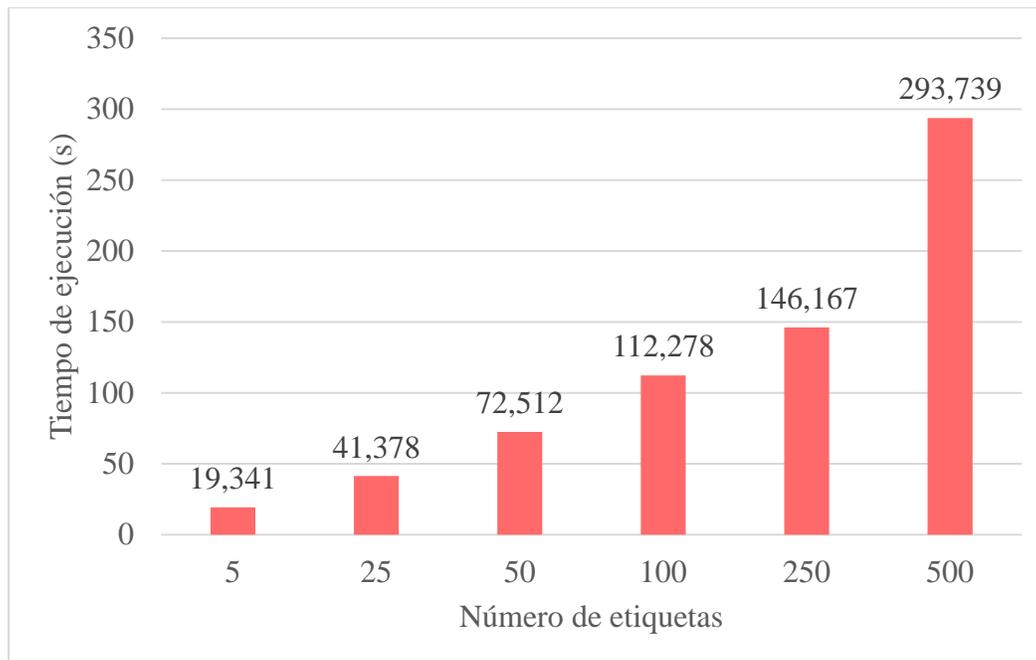


**Nota.** (a) 5 etiquetas; (b) 25 etiquetas; (c) 50 etiquetas; (d) 100 etiquetas; (e) 250 etiquetas; (f) 500 etiquetas. La figura evidencia la mejora en la estimación de la representación al usar mayor número de etiquetas.

El costo computacional medido en tiempo de ejecución (segundos) de los resultados de la figura 214 se muestran en la figura 215.

**Figura 215.**

*Tiempo de ejecución*



**Nota.** el tiempo de ejecución es directamente proporcional al número de etiquetas definido requiriendo mayor consumo de recursos computacionales al utilizar más etiquetas para definir la morfología de grano.

En conclusión, la distribución de fases tomadas por fragmentos presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 65.6% y 75.9%, para la fase martensita un volumen en fracción entre 14.5% y 22.8% y para los bordes de grano un porcentaje entre 5.9% 19.9% de la microscopía.

Para el espaciamiento entre fases se presenta un espaciamiento promedio entre los granos de la fase ferrita de 3.2  $\mu\text{m}$  y para el espaciamiento promedio entre los granos de la fase martensita de 14.3  $\mu\text{m}$ ; estos datos representan un espaciamiento de la fase martensita 4.4 veces más grande que el presente en la fase ferrita.

La medición del tamaño de grano muestra un resultado de  $4.12 \mu m$  para el promedio de granos de la fase ferrita; además, se presenta una mayor cantidad de granos entre 3 y  $4 \mu m$  siendo 18 elementos detectados con valores superiores a  $9 \mu m$ .

Con el objetivo de obtener un resultado muy aproximado de la medición de la microscopía se realiza una partición de la imagen usando la herramienta de fragmentación y fusión para fragmentar en 9 partes la imagen original; donde se realiza la filtración y segmentación por cada una de las partes con el fin de ser concatenadas y mostrar la distribución de fase y tamaño de grano del conjunto; este procedimiento une las imágenes binarias para representar la morfología.

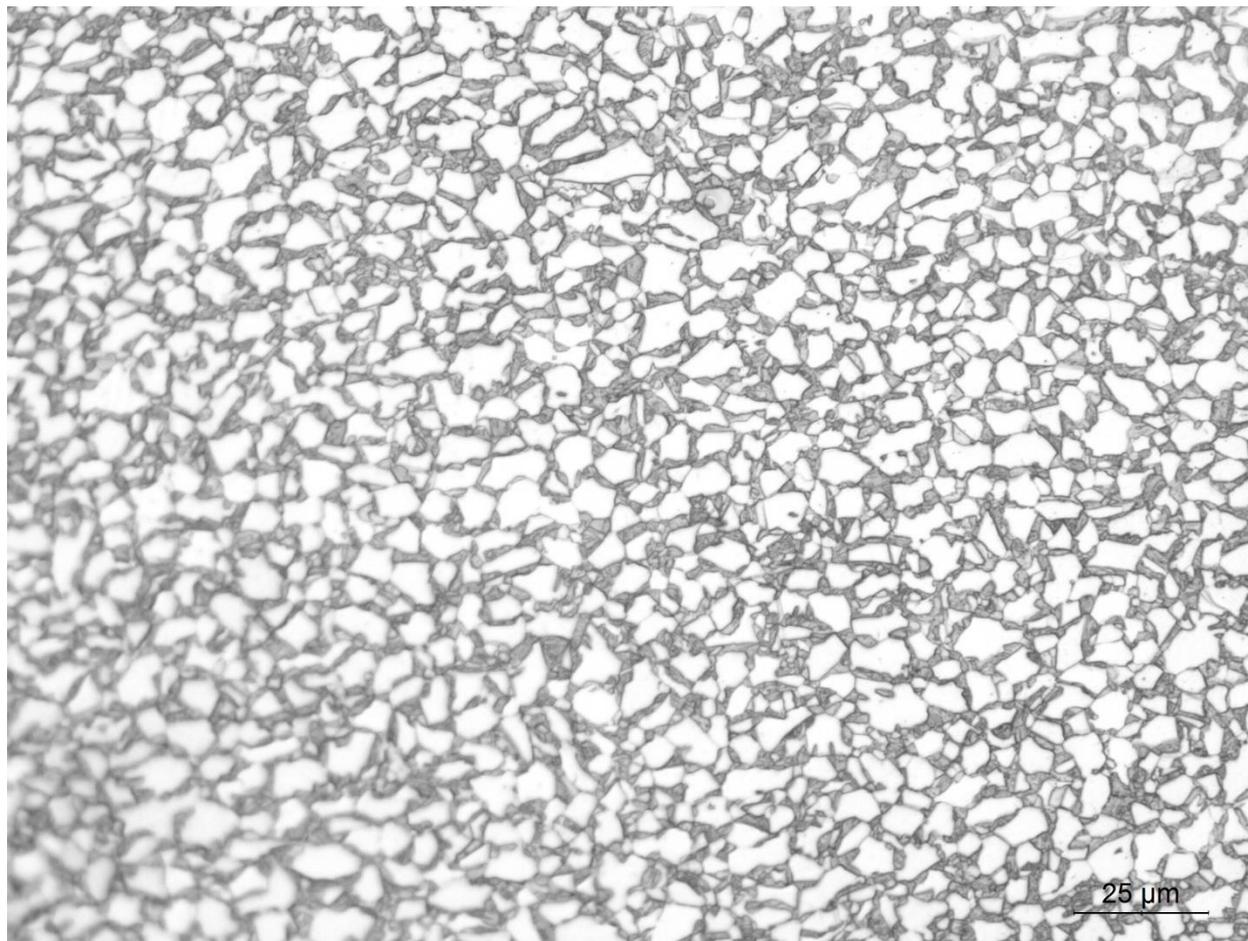
Se evidencia la mejora en las aproximaciones de la gráfica de color al implementar un mayor número de etiquetas; sin embargo, el costo computacional es directamente proporcional al número de etiquetas definido. El usuario debe definir correctamente la cantidad de etiquetas para representar adecuadamente la medición del tamaño de grano en la gráfica de color.

#### **4.9 Acero de doble fase (muestra 2)**

Se usa la microscopía de un acero de doble fase correspondiente a las investigaciones del ingeniero Diego Fernando Avendaño; la figura 216 muestra la microscopía del acero en estado de entrega.

**Figura 216.**

*Acero de doble fase después de la aplicación de tratamientos térmicos*

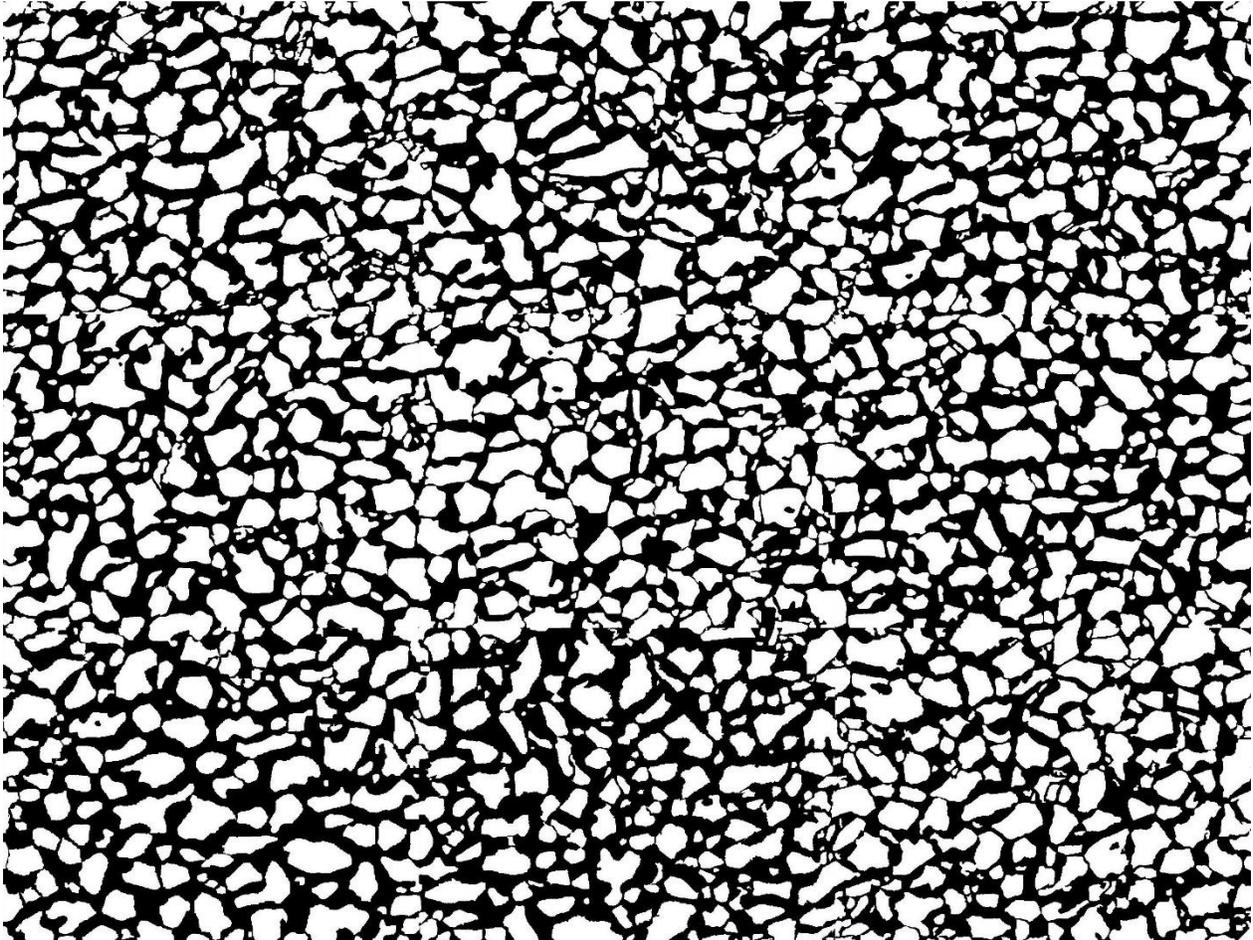


**Nota.** El acero de doble fase (C = 0.066, N = 0.0022, Mn = 1.219, Cr = 0.135, Si = 0.988, P = 0.011, S = 0.007) presenta una morfología detallada con bordes de grano definidos y un acabado superficial con poco ruido a excepción de la parte inferior izquierda, que presenta una distorsión del detalle.

La figura 205 muestra el resultado de la segmentación de la fase ferrita.

**Figura 217.**

*Segmentación de la fases*

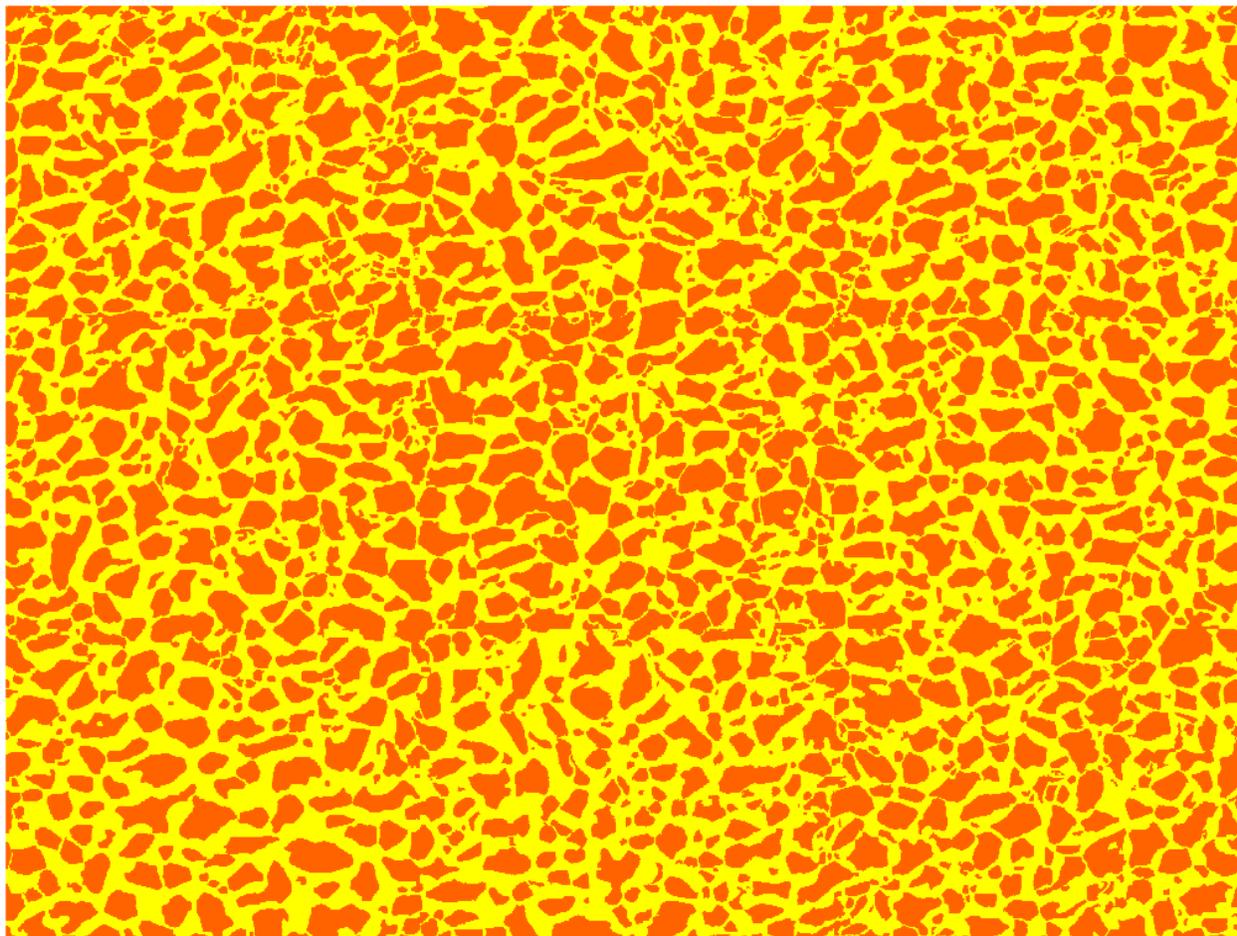


*Nota.* La segmentación se realiza mediante la fragmentación de la imagen original en 9 partes usando la ventana de “fragmentación y fusión” donde posteriormente se filtra y segmenta cada parte de la microscopía con el objetivo de enfatizar la fase ferrita y finalmente unir las partes segmentadas en la reproducción mostrada en la figura.

La imagen de representación de fases de la microscopía se muestra en la figura 207.

**Figura 218.**

*Representación de fases y bordes de grano*



**Nota.** La figura muestra la fase ferrita con un color naranja de representación y la fase martensita de color amarillo. Para esta muestra no se realiza la segmentación de bordes de grano por la poca cantidad de bordes presentes en la imagen

La tabla 50 muestra los resultados de la medición del volumen en fracción de la microestructura:

**Tabla 50.***Resultados de composición*

Volumen en fracción	MATLAB®
Martensita	52.93%
Ferrita	47.07%

**Nota.** La composición de martensita muestra un claro aumento respecto al acero en estado de entrega.

Los resultados de la distribución de fases de la microscopía se muestran en la tabla 46.

**Tabla 51.***Distribución de fase por fragmentos*

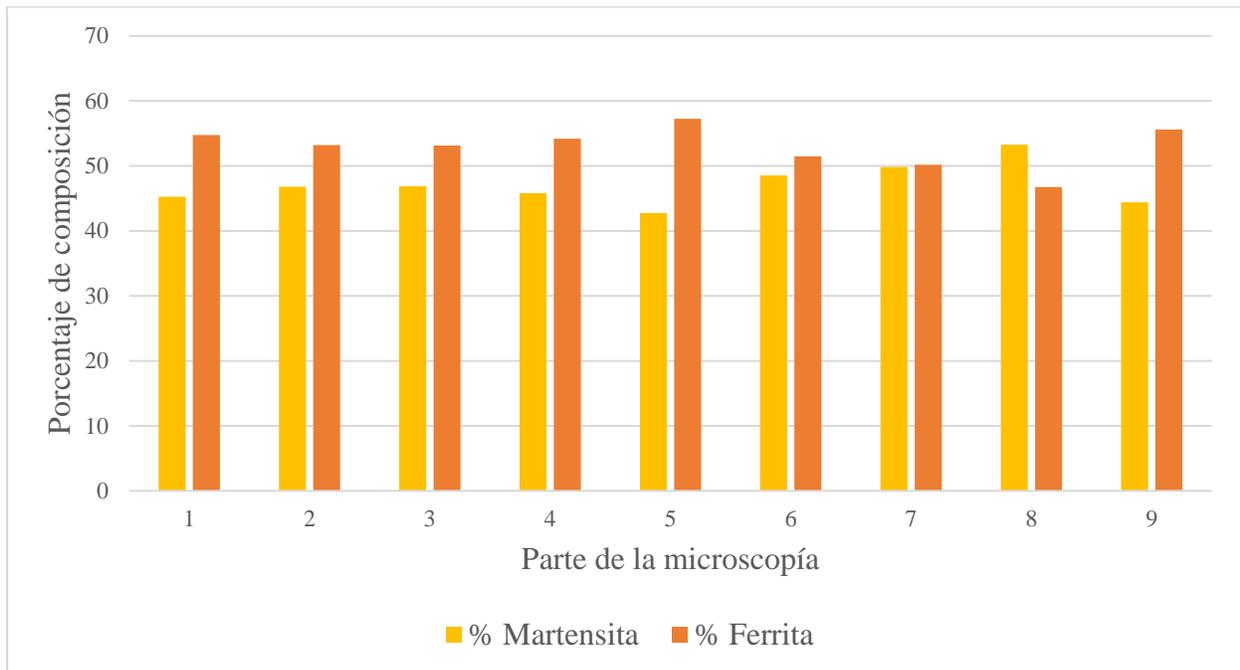
Fase	Parte 1	Parte 2	Parte 3	Parte 4	Parte 5	Parte 6	Parte 7	Parte 8	Parte 9
%M	45.24	46.8	46.87	45.81	42.75	48.54	49.82	53.25	44.39
%F	54.76	53.2	53.13	54.19	57.25	51.46	50.18	46.75	55.61

**Nota.** Porcentaje de ferrita (%F) y porcentaje de martensita (%M) La distribución de fase que presenta mayor y menor cantidad de martensita corresponde a la parte 3 (53.2%) y parte 5 (42.7% )

La figura 219 muestra un histograma de distribución de fases de las partes de la microscopía.

**Figura 219.**

*Histograma de distribución de fases y bordes de grano*



**Nota.** La figura muestra los datos de la tabla 51 donde la parte 5 presenta mayor porcentaje de ferrita con 57.2% y la parte 8 presenta mayor porcentaje de martensita con 53.2%

Los resultados de la medición del espaciamiento entre fase se muestran en la tabla 47.

**Tabla 52.**

*Espaciamiento entre fases*

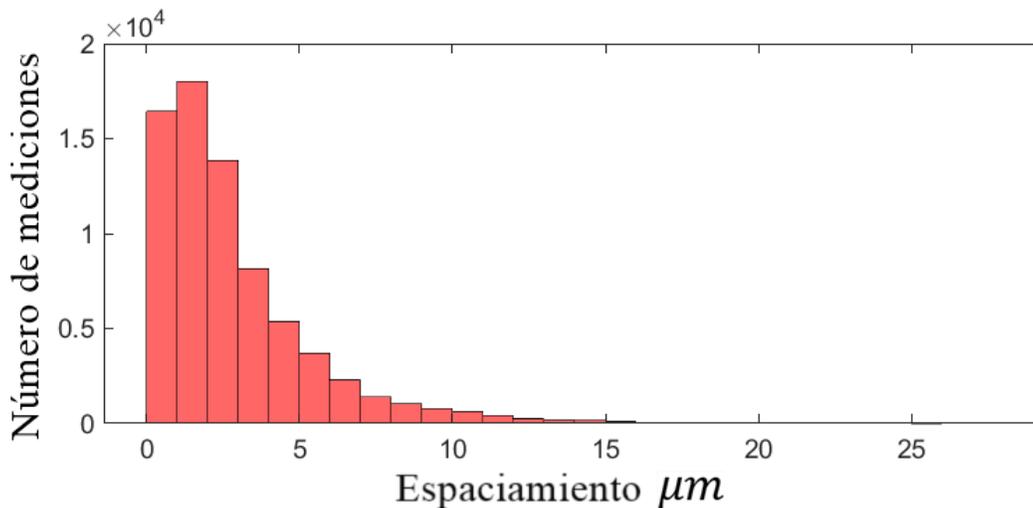
Espaciamiento	Ferrita	Martensita
Mínimo ( $\mu m$ )	0	0
Máximo ( $\mu m$ )	27.6	16.2
Promedio ( $\mu m$ )	2.8	3.2

**Nota.** El espaciamiento considera los bordes de grano de la microscopía; se mide estrictamente la distancia entre las fases de un mismo constituyente.

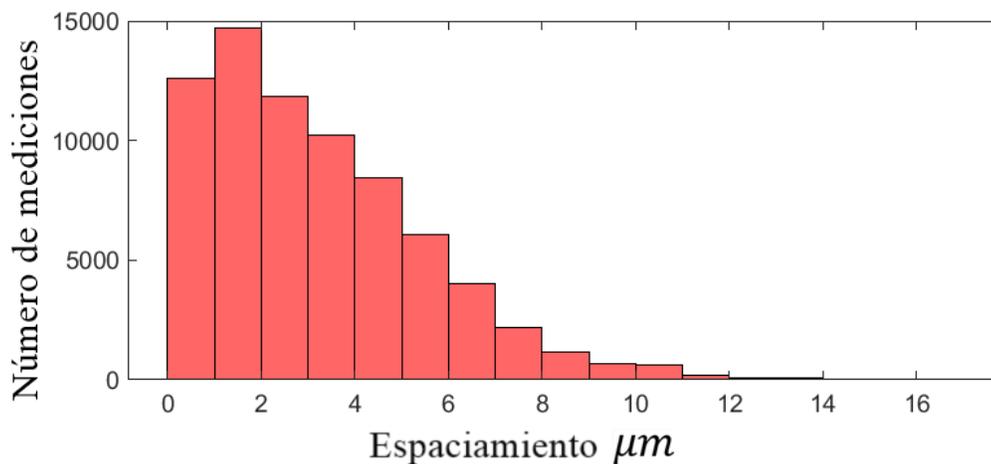
Los histogramas de medición en función del espaciamiento se muestran en la figura 220.

**Figura 220.**

*Histograma de espaciamiento entre fase*



(a)



(b)

**Nota.** (a) histogramas de representación del espaciamiento entre la fase ferrita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $1 \mu m$  y  $2 \mu m$  y el promedio es de  $2.8 \mu m$ ; (b) histogramas de representación del espaciamiento entre la fase martensita; el intervalo de mayor cantidad de mediciones tomadas se encuentra entre  $1 \mu m$  y  $2 \mu m$  y el promedio es de  $3.2 \mu m$ .

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Áreas) de ferrita se muestran en la tabla 53.

**Tabla 53.**

*Tamaño de grano (área) de ferrita*

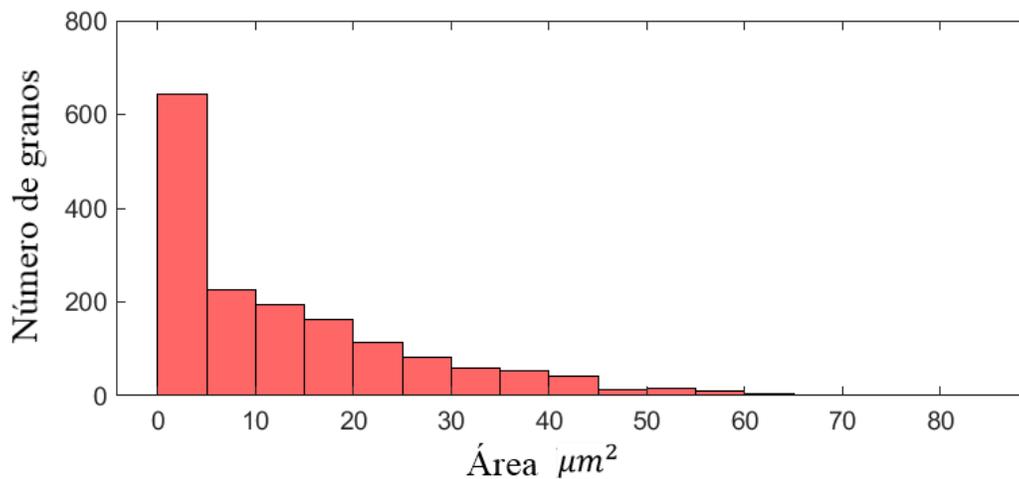
Área	Valor
Mínima ( $\mu\text{m}^2$ )	0
Máxima ( $\mu\text{m}^2$ )	80.12
Promedio ( $\mu\text{m}^2$ )	13.06

*Nota.* El área promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de área.

La figura 221 muestra los histogramas de distribución del tamaño de grano (área) para las fase ferrita.

**Figura 221.**

*Histograma de distribución del tamaño de grano (área) de ferrita*

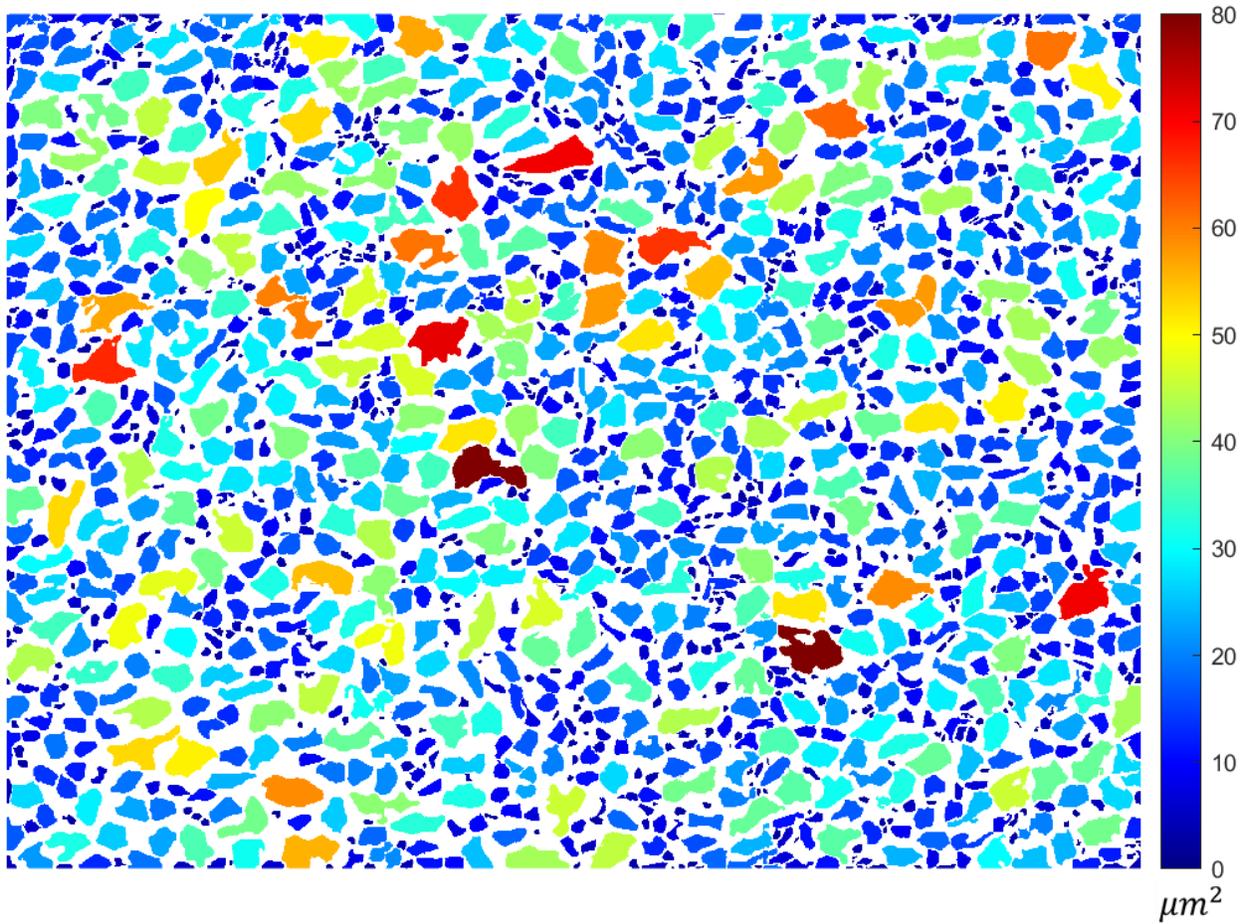


*Nota.* (a) histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de áreas se encuentra entre  $0 \mu\text{m}^2$  y  $5 \mu\text{m}^2$ .

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (áreas) se muestra en la figura 222.

**Figura 222.**

*Representación de áreas en  $\mu\text{m}^2$  de granos de ferrita*



**Nota.** Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre  $10 \mu\text{m}^2$  y  $40 \mu\text{m}^2$  siendo 6 elementos detectados los que poseen un valor de más de  $65 \mu\text{m}^2$ . Para la gráfica se definen 1000 etiquetas de representación de color.

Los resultados de la medición de tamaño de grano (Diámetro) se muestran en la tabla 54.

**Tabla 54.**

*Tamaño de grano (Diámetro) de ferrita*

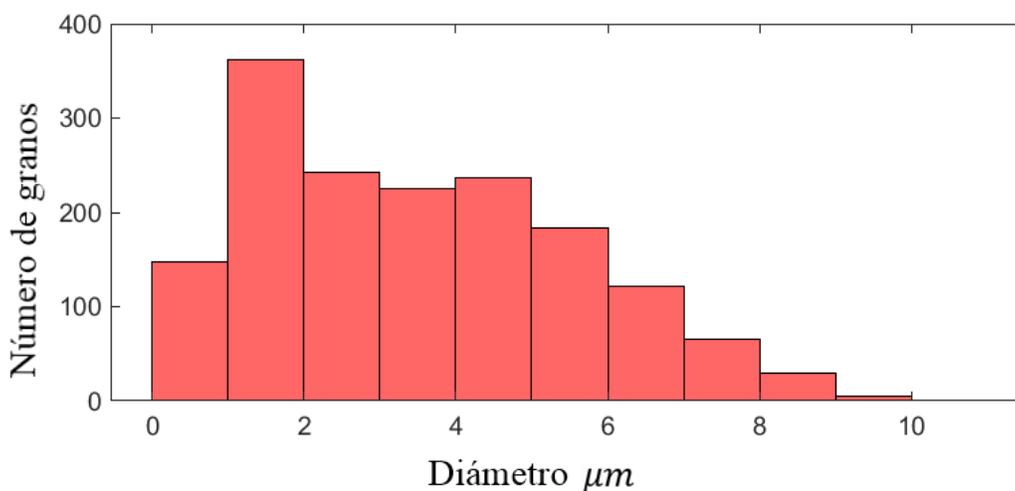
Diámetro	Ferrita
Mínimo ( $\mu m$ )	0.1
Máximo ( $\mu m$ )	10.10
Promedio ( $\mu m$ )	3.50

*Nota.* El diámetro promedio considera toda la distribución de granos medidos a partir de la propiedad de diámetro.

La figura 212 muestra los histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro) para la fase ferrita.

**Figura 223.**

*Histogramas de distribución del tamaño de grano (diámetro)*

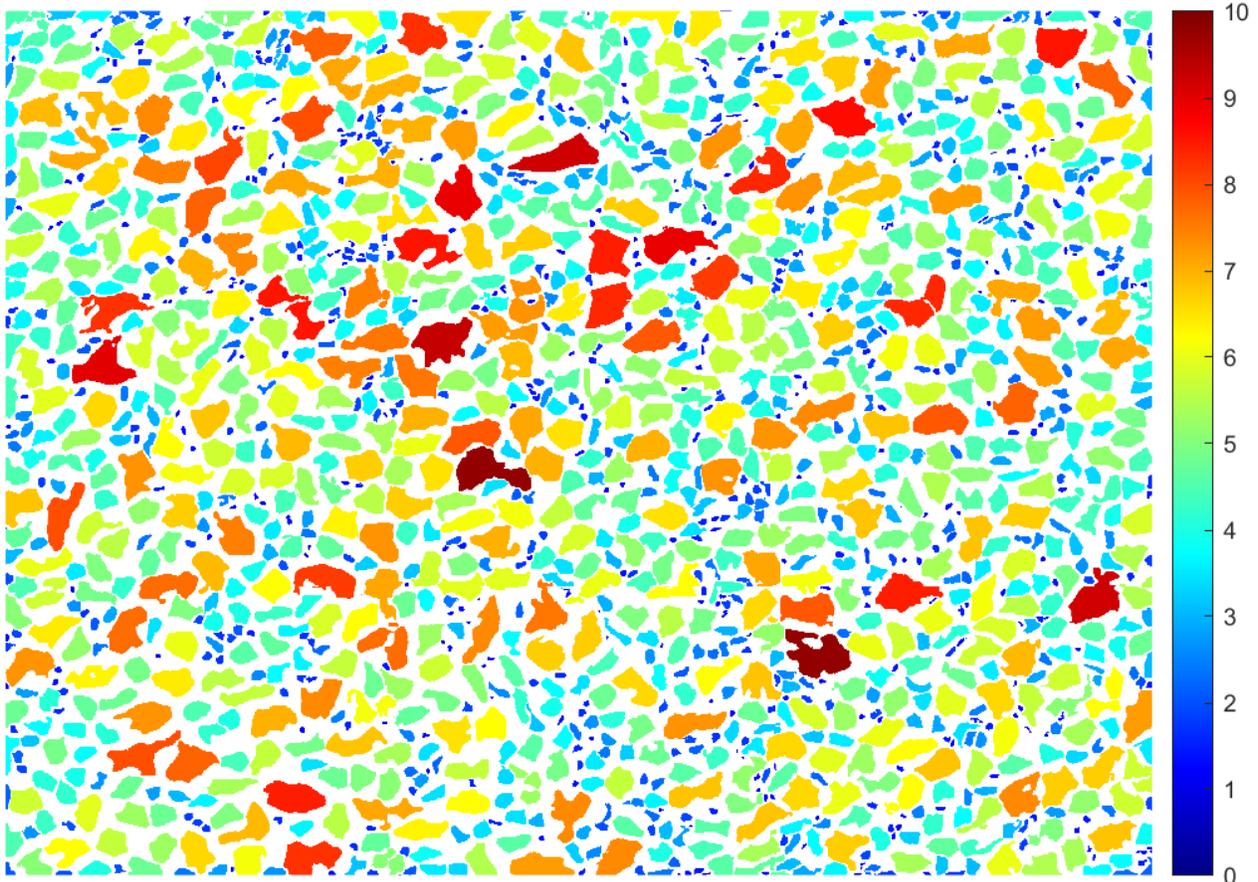


*Nota.* Histograma de distribución de datos del tamaño de grano para la fase ferrita; la mayor distribución de diámetro se encuentra entre 1  $\mu m^2$  y 2  $\mu m^2$

La gráfica de color que representa el tamaño de grano (diámetros) se muestra en la figura 213.

**Figura 224.**

*Representación de diámetros en  $\mu\text{m}$  de granos de ferrita*



**Nota.** Se identifica que la mayor cantidad de granos presentes en la microestructura poseen valores entre 3  $\mu\text{m}$  y 7  $\mu\text{m}$  siendo 32 elementos detectados que poseen un valor de más de 8  $\mu\text{m}$ . . Para la gráfica se definen 1000 etiquetas de representación de color.

Dependiendo del número de etiquetas definidas por el usuario se obtendrán mejores estimaciones en la representación de la gráfica de color; los histogramas de valores de diámetro y área reflejan los datos de las mediciones y no los datos de las etiquetas.

En conclusión, la distribución de fases tomadas por fragmentos presenta porcentajes para el volumen en fracción de ferrita entre 46.7% y 57.2% y para la fase martensita un volumen en fracción entre 42.7% y 53.2%.

Para el espaciamiento entre fases se presenta un espaciamiento promedio entre los granos de la fase ferrita de  $2.8 \mu m$  y para el espaciamiento promedio entre los granos de la fase martensita de  $3.2 \mu m$ ; estos datos representan un espaciamiento de la fase martensita 1.1 veces más grande que el presente en la fase ferrita.

La medición del tamaño de grano de la fase ferrita muestra un resultado de  $3.5 \mu m$  para el promedio de granos; además, se presenta una mayor cantidad de granos entre 3 y  $7 \mu m$  siendo 32 elementos detectados con valores superiores a  $8 \mu m$ .

Con el objetivo de obtener un resultado muy aproximado de la medición de la microscopía se realiza una partición de la imagen usando la herramienta de fragmentación y fusión para fragmentar en 9 partes la imagen original; donde se realiza la filtración y segmentación por cada una de las partes con el fin de ser concatenadas y mostrar la distribución de fase y tamaño de grano del conjunto; este procedimiento une las imágenes binarias para representar la morfología.

## 5. CONCLUSIONES

Los aceros de doble fase son un material de gran aplicabilidad para el sector industrial, sus propiedades microestructurales y mecánicas se asocia la endurecimiento por deformación por sus disimilitudes de fases que permite el apilamiento de dislocaciones donde se presenta un mayor esfuerzo último y mayor resistencia a la fatiga frente aceros convencionales y aceros compuestos de ferrita y bainita siendo su resistencia mecánica, ductilidad, resistencia a la fatiga y resistencia al impacto propiedades de gran interés para diversas aplicaciones industriales; además, por su bajo contenido de carbono, son fáciles de fabricar sin variación en su composición química.

El procesamiento digital de imágenes permite realizar la medición de propiedades estereológicas como el volumen en fracción de aceros de doble fase y su distribución en la microscopía; mostrando exactitudes por encima de 95% frente a la bibliografía consultada, y mediciones del tamaño de grano con exactitudes por encima del 97% lo que permite validar la eficiencia del proceso.

La modificación del histograma permite ajustar el contraste de las fases presentes; es la primera operación realizada y de mayor importancia durante el proceso de filtración.

Los filtros de eliminación de ruido en el dominio espacial permiten definir las fases presentes en el material, dependiendo del tipo de imagen y sus características se requerirá una configuración de filtros para acentuar la morfología que debe ser definida por el usuario; esto se debe a la variabilidad en la toma de las reproducciones que afectan la morfología como el contraste, la resolución, magnificación y parámetros de luz que requieren una etapa de procesamiento previa a la medición de datos para refinar los resultados.

La segmentación de imagen que permite mejores resultados por su amplia cantidad de operaciones y mediciones disponibles es la segmentación por binarización; permite medir la morfología usando las propiedades de región que responde muy bien a microestructuras de doble fase por la asignación de valores binarios a cada una de las fases de la representación.

El procesamiento digital de imágenes simplifica la labor de las mediciones estereológicas permitiendo obtener mediciones detalladas por cada elemento. Es un proceso eficiente frente a la estereología tradicional que requiere mayor tiempo y experiencia en la medición.

El uso de las herramientas del software MATLAB® (filtros del dominio espacial) permiten obtener resultados eficientes por la incorporación de funciones asociadas a la filtración que evitan el consumo de recursos e incremento del costo computacional.

La representación del diámetro y área mediante las gráficas de color requiere una selección adecuada de las etiquetas de representación; el número definido debe ser menor al número de elementos en la muestra para evitar un consumo de recursos innecesarios.

La morfología de grano es de suma importancia en la definición de fases presentes para la microestructura, ya que fases poco espaciadas con mayor número de granos y bordes de grano requerirán una filtración y segmentación de forma independiente mientras que las fases con menor cantidad de granos y bordes de grano solo requieren una filtración por ambas fases.

El entorno de desarrollo de interfaz gráfica de MATLAB® permite la aplicación de los filtros de forma intuitiva; el usuario manipula los elementos realizando una comparación del resultado de forma visual sin la necesidad de manipular las funciones o la codificación del lenguaje de programación.

Dividir la imagen original en fragmentos permite enfatizar las filtraciones y segmentaciones de fases al tratar cada imagen de forma independiente.

## **6. RECOMENDACIONES**

Aplicar la etapa de filtración usando filtros en el dominio de frecuencia para reproducir los resultados obtenidos con el uso de la filtración en el dominio espacial.

Medir otras propiedades estereológicas como el grado de orientación de laminación mediante análisis digital de imágenes.

Medir las grietas en la microestructura considerando el tamaño de grano y la composición mediante análisis digital de imágenes.

Modelar en tres dimensiones la microestructura, empleando el análisis bidimensional de morfología y composición.

Implementar análisis cristalográfico a partir de técnicas de difracción de electrones por retrodispersión y análisis digital de imágenes para determinar las propiedades a nivel granular.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] MATLAB ®, R2020a (9.8.0.1323502), [Versión de prueba], United States, The MathWorks, Inc. 2020.
- [2] X. Zhu, A. Shigang, D. Fang, B. Liu, and X. Lu, “A novel modeling approach of aluminum foam based on MATLAB image processing,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 82, pp. 451–456, 2014, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092702561300637X>.
- [3] J. Friedl, “Introduction to Stereological Principles,” in *Practical Guide to Image Analysis*, 1st ed., United States of America: ASM International, 2000, p. 30.
- [4] D. Brands, D. Balzani, L. Scheunemann, J. Schröder, D. Richter, and D. Raabe, “Computational modeling of dual-phase steels based on representative three-dimensional microstructures obtained from EBSD data,” *Arch. Appl. Mech.*, vol. 86, pp. 575–598, 2016, doi: 10.1007/s00419-015-1044-1.
- [5] ASTM International, *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. 1996, p. 2.
- [6] N. Fonstein, “Evolution of Strength of Automotive Steels to Meet Customer Challenges,” in *Advanced High Strength Sheet Steels Physical Metallurgy, Design Processing, and Properties.*, 1st ed., Switzerland: Springer International Publishing, 2015, pp. 1–15.
- [7] Y. Hou, S. Cai, T. Sapanathan, A. Dumon, and M. Rachik, “Micromechanical modeling of the effect of phase distribution topology on the plastic behavior of dual-phase steels,” *Comput. Mater. Sci.*, vol. 158, no. 15, 2019, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0927025618307481?via%3Dihub>.
- [8] D. Raabe, “Dual phase steels,” 2013. <http://www.dierk-raabe.com/dual-phase-steels/> (accessed Mar. 18, 2020).
- [9] N. Fonstein, “The Effect of Chemical Composition on Formation of Ferrite–Martensite Structures and Mechanical Properties of Dual-Phase Steels,” in *Advanced High Strength Sheet Steels Physical Metallurgy, Design Processing, and Properties.*, Switzerland: Springer International Publishing, 2015, pp. 139–181.
- [10] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, “Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales,” in *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3rd ed., J. Hernández, Ed. México:

- CIENGAGE Learning, 2013, pp. 3–22.
- [11] D. Busquets, *Mecanismos de Endurecimiento | 11/22 | UPV*. Universitat Politècnica de València – UPV: YouTube, 2011.
- [12] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, “*Soluciones solidad y diagrama de fase,*” in *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3rd ed., J. Hernández, Ed. México: CIENGAGE Learning, 2013, pp. 375–299.
- [13] A. Lavakumar, “*Physical metallurgy of ferrous alloys,*” in *Concepts in Physical Metallurgy*, 1st ed., California: Morgan & Claypool Publishers, 2017, pp. 8–15.
- [14] J. Maldonado, “*Aceros y sus aplicaciones,*” Universidad Autónoma de nuevo León, 1997.
- [15] MIPSAs, “Clasificación de aceros,” 2016. <https://www.mipsa.com.mx/dotnetnuke/Sabias-que/Clasificacion-del-acero> (accessed Apr. 18, 2020).
- [16] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, “*Propiedades mecánicas primera parte,*” in *Ciencia e ingeniería de los materiales*, 3rd ed., J. Hernández, Ed. México: CIENGAGE Learning, 2013, pp. 197–231.
- [17] A. Lavakumar, “*Mechanical properties of materials,*” in *Concepts in Physical Metallurgy*, 1st ed., California: Morgan & Claypool Publishers, 2017, pp. 5–1.
- [18] D. Askeland, P. Fulay, and W. Wright, “*Tratamientos térmicos de aceros,*” in *Ciencia e ingeniería de los materiales*, J. Hernández, Ed. México: CIENGAGE Learning, 2013, pp. 493–538.
- [19] A. Lavakumar, “*Tratamiento térmico,*” in *Concepts in Physical Metallurgy*, 1st ed., California: Morgan & Claypool Publishers, 2017, pp. 8–12.
- [20] G. Pérez, “*Estudio de la soldabilidad de aceros avanzados de alta resistencia (ahss): doble fase (dp) y de plasticidad inducida por transformación (trip).*,” *corporación mexicana de investigación en materiales*, 2009.
- [21] Bramfitt and Kot, “*Austenite Growth in the Intercritical Annealing of Ternary and Quaternary Dual-Phase Steels,*” 1981.
- [22] M. Avrami, “*Kinetics of Phase Change. II Transformation-Time Relations for Random Distribution of Nucleo,*” *J. Chem. Phys.*, vol. 8, 1940.
- [23] M. Meyers and K. Chawla, “*Martensitic Transformation,*” in *Mechanical Behavior of materials*, 1st ed., United States of America: Cambridge University Press, 2008, pp. 594–618.

- [24] E. Torres, J. Arbeláez, and D. Hincapié, “*Teoría cristalográfica de la transformación martensítica,*” *TecnoLógicas*, vol. 17, no. 33, pp. 77–90, 2013, doi: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/v17n33/v17n33a08.pdf>.
- [25] E. Torres, J. Arbeláez, and D. Hincapié, “*Aspectos Generales acerca de la Transformación Martensítica,*” *TecnoLógicas*, vol. 17, no. 31, pp. 151–170, 2013, doi: <http://www.scielo.org.co/pdf/teclo/n31/n31a09.pdf>.
- [26] C. Torres, “*transformación martensítica y efecto memoria en materiales micro y nanoestructurados,*” Instituto Balseiro Comisión Nacional de Energía Atómica Universidad Nacional de Cuyo, 2017.
- [27] L. Schermmann, S. Zaeferrer, D. Raabe, F. Friedel, and D. Mattissen, “*Alloying effects on microstructure formation of dual phase steels,*” *Acta Mater.*, vol. 95, pp. 386–398, 2015, [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1359645415003171>.
- [28] S. A. Etesami, M. H. Enayati, A. Taherizadeh, and B. Sadeghian, “*The Influence of Volume Fraction of Martensite and Ferrite Grain Size on Ultimate Tensile Strength and Maximum Uniform True Strain of Dual Phase Steel,*” *Trans. Indian Inst. Met.*, vol. 69, pp. 1605–1612, 2016, [Online]. Available: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12666-015-0739-x>.
- [29] Y. Hu, Z. Xiurong, R. Li, and Z. Zhang, “*Effect of initial microstructures on the properties of Ferrite-Martensite Dual-Phase pipeline steels with Strain-Based design,*” *Mater. Res. Express*, vol. 15, no. 2, 2012, [Online]. Available: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392012000200023](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392012000200023).
- [30] D. Avedaño, J. Granados, E. Espaejo, L. Mujica, and R. Rodríguez, “*Fracture Mechanisms in Dual-Phase Steel: Influence of Martensite Volume Fraction and Ferrite Grain Size,*” *J. Eng. Sci. Technol.*, vol. 11, no. 6, pp. 174–181, 2018, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/331392585\\_Fracture\\_Mechanisms\\_in\\_Dual-Phase\\_Steel\\_Influence\\_of\\_Martensite\\_Volume\\_Fraction\\_and\\_Ferrite\\_Grain\\_Size](https://www.researchgate.net/publication/331392585_Fracture_Mechanisms_in_Dual-Phase_Steel_Influence_of_Martensite_Volume_Fraction_and_Ferrite_Grain_Size).
- [31] S. Majumdar, S. Roy, and K. Ray, “*Fatigue performance of dual-phase steels for automotive wheel application,*” *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, p. 13, 2016, doi: 10.1111/ffe.12491.
- [32] C. M. Tamarelli, *Ahss 101 the evolving use of advanced high-strength steels for automotive applications*. Michigan: Steel Market Development Institute, 2000.
- [33] H. Lorussoa, A. Burgueño, D. Egidi, and H. Svobodaa, “*Application of dual phase steels in*

- wires for reinforcement of concrete structures,” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 1, pp. 118 – 125, 2012, [Online]. Available: [researchgate.net/publication/257743142\\_Application\\_of\\_Dual\\_Phase\\_Steels\\_in\\_Wires\\_for\\_Reinforcement\\_of\\_Concrete\\_Structures](https://researchgate.net/publication/257743142_Application_of_Dual_Phase_Steels_in_Wires_for_Reinforcement_of_Concrete_Structures).
- [34] O. Pérez, S. Arrellano, and H. Rodríguez, “Revisión de los métodos estereológicos y su aplicación en biología celular.,” *Patol. Rev Latinoam*, vol. 50, no. 2, pp. 63–71, 2012, [Online]. Available: <https://www.medigraphic.com/pdfs/patrevlat/rlp-2012/rlp122b.pdf>.
- [35] G. Vander Voort, “Introduction to Stereological Principles,” 2011. <https://vacaero.com/information-resources/metallography-with-george-vander-voort/1137-introduction-to-stereological-principles.html> (accessed Apr. 20, 2020).
- [36] J. Frield, “Characterization of Particle Dispersion,” in *Practical Guide to Image Analysis*, 1st ed., United States of America: ASM International, 2000, pp. 129–144.
- [37] ASTM International, *Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Countt.* 2019, pp. 1–7.
- [38] J. Frield, “Grain-Structure Measurements,” in *Practical Guide to Image Analysis*, 1st ed., United States of America: ASM International, 2000, p. 26.
- [39] ASTM International, *Standard Practice for Determining the Inclusion or Second-Phase Constituent Content of Metals by Automatic Image Analysis.* 2003, pp. 1–8.
- [40] J. Frield, “Principles of Image Analysis,” in *Practical Guide to Image Analysis*, 1st ed., United States of America: ASM International, 2000, pp. 75–101.
- [41] Y.-J. Zhang, “Introduction to Image Analysis,” in *Image Engineering, Volume II: Image Analysis*, 1st ed., Beijing: DE GRUYTER, 2017, pp. 1–25.
- [42] FISICALAB, “El Microscopio optico,” 2005. <https://www.fisicalab.com/apartado/microscopio>.
- [43] M. J. Burge and W. Burger, *Digital Image Processing*, 2nd ed. New York: Springer International Publishing, 2016.
- [44] M. Mateu, Y. Sánchez, and R. Enrique, “fundamentos de la reducción de ruido en imágenes,” *Jóvenes Investig. científica*, vol. 3, no. 2, p. 2017, 2017, [Online]. Available: <http://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/download/2047/1542>.
- [45] D. Koch, “Real Estate Image Analysis,” *J. Real Estate Lit.*, vol. 27, no. 2, pp. 269–300,

- 2019, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/338955653\\_Real\\_Estate\\_Image\\_Analysis\\_A\\_Literature\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/338955653_Real_Estate_Image_Analysis_A_Literature_Review).
- [46] N. Triana, A. Jaramillo, R. Gutiérrez, and C. Rodríguez, “*Técnicas de umbralización para el procesamiento digital de imágenes de GEM-Foils*,” *Sci. Tech.*, vol. 2, no. 4, 2016, [Online]. Available: <https://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/13271>.
- [47] K. Zuiderveld, “*Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization*,” in *Graphic Gems IV*, P. Heckbert, Ed. Pensilvania: Academic Press, 1994, pp. 1–34.
- [48] THE MATHWORKS INC, “*imsharpen*,” 2013. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imsharpen.html>.
- [49] THE MATHWORKS INC, “*imgaussfilt*,” 2012. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imgaussfilt.html>.
- [50] R. Walpole, “*Algunas distribuciones continuas de probabilidad*,” in *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia*, 8th ed., México: PEARSON EDUCATION, 2012, p. 173.
- [51] R. Walpole, “*Introducción a la estadística y al análisis de datos*,” in *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencia*, 8th ed., México: PEARSON EDUCATION, 2012, pp. 5–20.
- [52] THE MATHWORKS INC, “*ordfilt2*,” 2014. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/ordfilt2.html>.
- [53] Y.-J. Zhang, “*Image segmentation*,” in *Image Engineering, Volume II: Image Analysis*, 1st ed., Beijing: DE GRUYTER, 2017, pp. 33–56.
- [54] V. Bodryshev, A. Babaytsev, and L. Rabinskiy, “*Investigation of processes of deformation of plastic materials with the help of digital image processing*,” *Periódico Tchê Química.*, vol. 16, no. 33, pp. 865–878, 2011, [Online]. Available: [www.periodico.tchequimica.com](http://www.periodico.tchequimica.com).
- [55] Y.-J. Zhang, “*Object Representation and Description*,” in *Image Engineering, Volume II: Image Analysis*, 1st ed., Beijing: DE GRUYTER, 2017, pp. 69–93.
- [56] J. Frield, “*Measurements*,” in *Practical Guide to Image Analysis*, 1st ed., United States of America: ASM International, 2000, pp. 102–128.
- [57] M. Arroyave, A. Restrepo, and F. Vargas, “*Incidencia de la Segmentación en la Obtención de Región de Interés en Imágenes de Palma de la Mano*,” *TecnoLógicas*, vol. 27, no. 15, pp.

- 1–10, 2011, [Online]. Available: [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0123-77992011000200008](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-77992011000200008).
- [58] G. Lorca, A. José, and P. Osvaldo, “*Segmentación de Imágenes Médicas Digitales mediante Técnicas de Clustering,*” *Rev. Aporte Santiaguino*, vol. 3, p. 2, 2010, [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/235420282\\_Segmentacion\\_de\\_Imagenes\\_Medicinas\\_Digitales\\_mediante\\_Tecnicas\\_de\\_Clustering](https://www.researchgate.net/publication/235420282_Segmentacion_de_Imagenes_Medicinas_Digitales_mediante_Tecnicas_de_Clustering).
- [59] D. Nameirakpam, M. Khumanthem, and J. Yambem, “*Image Segmentation Using K -means Clustering Algorithm and Subtractive Clustering Algorithm,*” *Procedia Mater. Sci.*, vol. 54, pp. 764 – 771, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.06.090>.
- [60] G. Stanley, “*Distancia entre dos puntos en el espacio,*” in *Álgebra lineal*, 9th ed., México: Mc Graw Hill Companies, 2012, p. 259.
- [61] THE MATHWORKS INC, “*BoundaryMask,*” 2019. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/boundarymask.html> .
- [62] M. Burge and W. Burger, “*Edges and Contours,*” in *Digital Image Processing*, 2nd ed., New York: Springer International Publishing, 2016, pp. 120–138.
- [63] THE MATHWORKS INC, “*locallapfilt,*” 2015. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/locallapfilt.html>.
- [64] THE MATHWORKS INC, “*Operaciones morfológicas,*” 2015. <https://la.mathworks.com/help/images/morphological-dilation-and-erosion.html>.
- [65] W. Burger and M. Burge, “*Morphological filters,*” in *Digital Image Processing*, 2nd ed., New York: Springer International Publishing, 2016, pp. 180–185.
- [66] THE MATHWORKS INC, “*regionprops,*” 2017. <https://www.mathworks.com/help/images/ref/regionprops.html>.
- [67] THE MATHWORKS INC, “*rgb2gry,*” 2014. <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/rgb2gray.html>.
- [68] THE MATHWORKS INC, “*uigetfile,*” 2012. <https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/uigetfile.html>.
- [69] THE MATHWORKS INC, “*imcrop,*” 2015. <https://la.mathworks.com/help/images/ref/imcrop.html>.
- [70] THE MATHWORKS INC, “*drawrectangle,*” 2015. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/rectangle.html>.

- [71] THE MATHWORKS INC, “*imadjust*,” 2010.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imadjust.html>.
- [72] THE MATHWORKS INC, “*K-means*,” 2017.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imsegkmeans.html>.
- [73] THE MATHWORKS INC, “*labeloverlay*,” 2017.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/labeloverlay.html>.
- [74] THE MATHWORKS INC, “*adapthisteq*,” 2013.  
<https://la.mathworks.com/help/images/ref/adapthisteq.html>.
- [75] THE MATHWORKS INC, “*imbinarize*,” 2019.  
<https://la.mathworks.com/help/images/ref/imbinarize.html>.
- [76] THE MATHWORKS INC, “*imcplment*,” 2018, [Online]. Available:  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imcomplement.html>.
- [77] THE MATHWORKS INC, “*strel*,” 2020.  
<https://es.mathworks.com/help/images/ref/strel.html>.
- [78] THE MATHWORKS INC, “*imopen*,” 2012.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imopen.html>.
- [79] THE MATHWORKS INC, “*imclose*,” 2012.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/imclose.html>.
- [80] THE MATHWORKS INC, “*bwareaopen*,” 2012.  
<https://es.mathworks.com/help/images/ref/bwareaopen.html>.
- [81] THE MATHWORKS INC, “*bwboundaries*,” 2012.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwboundaries.html>.
- [82] THE MATHWORKS INC, “*drawfreehand*,” 2019.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/drawfreehand.html>.
- [83] THE MATHWORKS INC, “*createMask*,” 2018.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/createmask.html>.
- [84] THE MATHWORKS INC, “*colormap*,” 2015.  
<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/colormap.html>.
- [85] THE MATHWORKS INC, “*Extract objects from binary image using properties*,” 2014.  
<https://www.mathworks.com/help/images/ref/bwpropfilt.html>.
- [86] THE MATHWORKS INC, “*Medición de objetos binarios en una imagen*,” 2017.

- <https://la.mathworks.com/help/images/label-and-measure-objects-in-a-binary-image.html>.
- [87] THE MATHWORKS INC, “*imhist*,” 2019.  
<https://es.mathworks.com/help/images/ref/imhist.html>.
- [88] M. Soliman and H. Palkowski, “*Tensile properties and bake hardening response of dual phase steels with varied martensite volume fraction*,” *Mater. Sci. Eng. A*, vol. 777, pp. 1–13, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139044>.
- [89] L. Brent, D. Aliya, D. Alman, A. Roland, S. Axdal, and W. Baldwin, “*Image Analysis*,” in *Metallography: An Introduction, Metallography and Microstructures*, G. Vander Voort, Ed. United States of America: ASM International, 2004, pp. 3–20.
- [90] O. Rodríguez, “*Estimación de propiedades mecánicas de aceros hipoeutectoides Utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes obtenidas a través de un microscopio óptico metalográfico*,” Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2012.
- [91] National Institutes of Health, “*ImageJ*.” 2019.
- [92] THE MATHWORKS INC, “*meshgrid*,” 2013.  
<https://la.mathworks.com/help/matlab/ref/meshgrid.html>.

## **ANEXOS**

ANEXO I. Interfaz de usuario (.ZIP)

ANEXO II. Guía de instalación e instructivo de manipulación (.PDF)