

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido.....	iv
Índice de Tablas.....	vi
Índice de Ilustraciones.....	vii
Índice de Ecuaciones.....	viii
1. Introducción.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcances.....	3
2. Fundamentos y Conceptos.....	4
2.1. Flotación de Minerales.....	4
2.1.1. Introducción a la flotación.....	4
2.1.2. Reactivos.....	5
2.1.3. Contexto operacional.....	6
2.2. Burbujas y espuma de flotación.....	9
2.2.1. Espumantes.....	9
2.2.2. Estabilidad de espuma de flotación.....	10
2.2.3. Estructura de espuma de flotación.....	11
2.2.4. Calidad de Espuma.....	13
2.3. Procesamiento de imágenes digitales.....	14
2.3.1. Imágenes a color y escala de Grises.....	14
2.3.2. Algoritmos para mejora de imágenes.....	15
2.4. Análisis estadístico y geoestadístico de datos.....	19
2.4.1. Variograma y Mapa Variográfico.....	20
2.4.2. Textura y Análisis textural.....	24
2.4.3. Métricas de comparación de variables.....	25
3. Metodología.....	29
3.1. Pruebas de Flotación.....	30
3.1.1. Montaje Experimental.....	33
3.2. Desarrollo de algoritmos.....	38
3.2.1. Algoritmo de carga y transformación de Imágenes.....	39

3.2.2.	Algoritmos de caracterización de imagen	40
3.2.3.	Algoritmos de comparación.....	47
3.2.4.	Algoritmo de clasificación.....	49
3.3.	Clasificación de Imágenes y Ejecución de algoritmos	50
4.	Resultados	52
4.1.	Asignación de calidad a base de datos de espuma.....	52
4.1.1.	Estabilidad	52
4.1.2.	Tamaño de burbujas.....	54
4.1.3.	Distribución de Tamaños.....	55
4.1.4.	Pulpa Visible	56
4.1.5.	Carga de espuma.....	56
4.1.6.	Calidades finales.....	57
4.2.	Prueba de algoritmo de conteo de bordes en base de datos de espumas de laboratorio .	58
4.3.	Prueba de algoritmos en base de datos de espumas industriales	60
4.3.1.	Clasificación según categoría	60
4.3.2.	Clasificación según calidad	62
4.3.3.	Clasificación según calidad con entrenamiento.....	65
4.3.4.	Clasificación según calidad con entrenamiento usando fotos nuevas	66
5.	Análisis de resultados.....	68
5.1.	Calidades de las imágenes de espuma	68
5.2.	Análisis de etapas de clasificación.....	70
5.2.1.	Prueba de Algoritmo de Conteo de Bordes	70
5.2.2.	Prueba de clasificación por categoría	71
5.2.3.	Pruebas de clasificación por calidad.....	72
5.2.4.	Elección de métodos	76
5.2.5.	Pruebas de clasificación por calidad usando entrenamiento	78
5.3.	Observaciones acerca de la implementación de la herramienta y posibles propuestas ..	79
6.	Propuesta final.....	82
7.	Conclusión y Recomendaciones.....	85
8.	Bibliografía.....	87
9.	Anexos.....	89
9.1.	Anexo A.....	89
9.2.	Anexo B	98

Índice de Tablas

Tabla 1: Valores de parámetro J_b . Elaboración Propia.	36
Tabla 2: Cruces entre estabilidad y calidad de espuma. Elaboración Propia	53
Tabla 3: Cruces entre calidad de espuma y distribución de tamaños. Elaboración Propia.	55
Tabla 4: Cruces entre estructura y carga de mineral. Elaboración Propia.....	57
Tabla 5: Cruces entre calidad y distribución de tamaños. Elaboración Propia.	58
Tabla 6: Cruces entre calidad y estabilidad. Elaboración Propia.	58
Tabla 7: Cruces entre calidad y tamaño de burbujas. Elaboración Propia.	58
Tabla 8: Precisiones de Algoritmo de conteo de Bordes en Base de Datos Cuasi 2D. Elaboración Propia.....	59
Tabla 9: Precisiones de Algoritmo de conteo de Bordes en Base de Datos de la Columna de Flotación. Elaboración Propia.	59
Tabla 10: Precisión de Algoritmo de Variograma Compacto en Clasificación por categoría. Elaboración Propia.	60
Tabla 11: Precisión de Algoritmo de Variograma Completo en Clasificación por categoría. Elaboración Propia.	60
Tabla 12: Precisión de Algoritmo de distribución de Puntos en Patrón en Clasificación por categoría. Elaboración Propia.	61
Tabla 13: Precisión de Algoritmo de conteo de bordes en Clasificación por categoría, usando histograma total como caracterización. Elaboración Propia.	61
Tabla 14: Precisión de algoritmo de conteo de bordes en clasificación por categoría, usando datos como distribución gaussiana para caracterización. Elaboración propia.	62
Tabla 15: Precisión de algoritmo de variograma completo en clasificación por calidad. Elaboración propia.	62
Tabla 16: Precisión de algoritmo de variograma compacto en clasificación por calidad. Elaboración Propia.....	63
Tabla 17: Precisión de Algoritmo de distribución de puntos en patrón en clasificación por calidad. Elaboración Propia.	63
Tabla 18: Precisión de Algoritmo de conteo de bordes en Clasificación por Clase, usando histograma total como caracterización. Elaboración Propia.	64
Tabla 19: Precisión de Algoritmo de conteo de bordes en Clasificación por calidad, usando datos como distribución gaussiana para caracterización. Elaboración Propia.	64
Tabla 20: Matriz de confusión usando mapa variográfico. Elaboración propia.....	64
Tabla 21: Matriz de confusión usando mapa variográfico compacto. Elaboración propia.	64
Tabla 22: Matriz de confusión usando distribución de puntos en patrón. Elaboración propia.	65
Tabla 23: Matriz de confusión usando conteo de bordes e histograma de intensidades. Elaboración propia.....	65
Tabla 24: Matriz de confusión usando conteo de bordes y distribución de datos. Elaboración propia.	65
Tabla 25: Estudio del método de mapa variográfico compacto con entrenamiento. Elaboración propia.....	66
Tabla 26: Estudio del método de conteo de bordes con entrenamiento. Elaboración Propia.....	66

Tabla 27: Estudio del método de mapa variográfico compacto con entrenamiento en fotos nuevas. Elaboración propia.....	67
Tabla 28: Estudio del método de conteo de bordes con entrenamiento en fotos nuevas. Elaboración propia.....	67

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1: Circuito de Flotación Estándar. Elaboración propia.....	7
Ilustración 2: Cumulo de Burbujas en el centro de la celda. Elaboración propia.....	13
Ilustración 3: Aplicación de Filtro Mediana. Elaboración Propia.....	16
Ilustración 4: Aplicación de filtro mediana a Imagen de Espuma. Elaboración propia.....	16
Ilustración 5: a) Imagen de Espuma b) Histograma de Imagen c) Histograma relativo Acumulado. Elaboración propia.....	17
Ilustración 6: a) Ecualización de una imagen en escala de grises b) Ecualización de un histograma c) Ecualización de un histograma relativo acumulado. Elaboración Propia.....	17
Ilustración 7: Aplicación de Convolución de Imagen. (Giménez Palomares et al., 2016).....	18
Ilustración 8: a) Imagen en escala de grises b) Variograma horizontal c) Variograma vertical. Elaboración propia.....	21
Ilustración 9: a) Variograma de Variable continua b) Variograma de Variable Dispersa. Elaboración propia.....	21
Ilustración 10: Variograma con alcance y meseta. Elaboración propia.....	22
Ilustración 11: Mapa Variográfico. Elaboración propia.....	23
Ilustración 12: a) Imagen con anisotropía direccional b) Mapa variografico con anisotropía direccional. (Garrido, 2018).....	23
Ilustración 13: a) Imagen con anisotropía zonal b) Mapa variográfico con anisotropía zonal. (Garrido, 2018).....	23
Ilustración 14: a) Imagen sin anisotropía b) Mapa variográfico sin anisotropía. (Garrido, 2018)	24
Ilustración 15: Dos matrices de errores cuadráticos con simular valor de error cuadrático medio. Elaboración propia.....	26
Ilustración 16: Gráficos de distribuciones normales. Elaboración propia.....	27
Ilustración 17: a) Imagen obtenida de la celda Cuasi 2D. b) Imagen obtenida de la columna de flotación. (Díaz, 2017).....	31
Ilustración 18: a) Espuma de flotación de laboratorio (Díaz, 2017) b) Espuma de flotación industrial simulada. Elaboración propia.....	31
Ilustración 19: Diferencia en ángulo de cámara entre celda de laboratorio y celda industrial. Elaboración Propia.....	32
Ilustración 20: Base de celda de flotación y mecanismo rotatorio superior. Elaboración propia.	33
Ilustración 21: Celda de flotación sola y acoplada a la base. Elaboración Propia.....	34
Ilustración 22: Ejemplo de matriz de confusión. Elaboración propia.....	39
Ilustración 23: a) Imágenes de Espuma b) Mapas variográficos con Radio 40 c) Mapas variográficos con radio 80. Elaboración propia.....	41
Ilustración 24: Zoom a mapa Variográfico. Elaboración propia.....	42
Ilustración 25: a) Puntos a analizar b) Puntos a analizar superpuestos en mapa variográfico. Elaboración propia.....	42

Ilustración 26: a) Patrón de 90°. b) Patrón de 180°. c) Patrón de 360°. Elaboración Propia.	44
Ilustración 27: Método de conteo de bordes. Elaboración Propia.	45
Ilustración 28: a) Imagen de espuma de flotación. b) Imagen obtenida tras convolución 2D. c) Imagen obtenida por método de Prewitt. d) Imagen obtenida por método de Canny. Elaboración propia.	46
Ilustración 29: Matriz de similitud. Elaboración Propia.	47
Ilustración 30: Etapas para el desarrollo de la herramienta. Elaboración Propia.	50
Ilustración 31: Comparación de tamaños de burbujas. Elaboración Propia.	54
Ilustración 32: Espuma con burbujas grandes y medianas. Elaboración Propia,	54
Ilustración 33: a) Pulpa Visible en los costados de la espuma. b) Pulpa visible entre burbujas. Elaboración Propia.	56
Ilustración 34: Prototipo de interfaz de usuario desarrollada. elaboración propia.	83

Índice de Ecuaciones

Ecuación 1: Ecuación del Variograma.	20
Ecuación 2: Definición de Matriz de Error	25
Ecuación 3: Definición de Matriz de Error Cuadrático	25
Ecuación 4: Definición de Error Cuadrático Medio	26
Ecuación 5: Función de densidad normal	26
Ecuación 6: Vector de medias y matriz de covarianzas	27
Ecuación 7: Divergencia de Kullback-Leibler para distribuciones normales multivariantes	28
Ecuación 8: Divergencia de Kullback-Leibler para distribuciones normales univariantes	28
Ecuación 9: Probabilidad asociada a cada clase. Elaboración Propia.	83