



Modelación matemática del proceso planta de beneficio Maria Dama para la expansión de 2000 a 3000 TPD en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.

Santiago López Velasquez

Informe de práctica presentado para optar al título de Ingeniero de Materiales

Semestre de Industria

Jairo Ruiz Córdoba, Magíster (MSc) en Ingeniería Metalúrgica

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería de Materiales
Medellín, Antioquia, Colombia

2025

Cita	López Velasquez [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] López Velasquez, “Modelación matemática del proceso planta de beneficio Maria Dama para la expansión de 2000 a 3000 TPD en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe Informe de práctica, Ingeniería de Materiales, Universidad de Antioquia Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos

Dedicatoria

Dedico este documento a todos mis momentos de felicidad y también a los obstáculos que hicieron frente en mi vida, ya que jamás he podido renunciar a la luz, a la felicidad de existir, a la vida libre en que he crecido. Pero, aunque esa nostalgia explique muchos de mis errores y de mis faltas, indudablemente ella me ha ayudado a comprender mi oficio y también a mantenerme decididamente, ciegamente, junto a todos esos hombres silenciosos, que no soportan en el mundo la vida que les toca vivir más que por el recuerdo de breves y libres momentos de felicidad, y por la esperanza de volverlos a vivir.

Agradecimientos

Para agradecer sobre la posibilidad de realizar este documento tendría que, mencionar a un sinnúmero de personas, pero resalto;

Mi familia que me ha acompañado a lo largo de mi vida y he recibido su apoyo en todas las decisiones que he tomado;

Los docentes que pertenecen al programa de ingeniería de materiales por enseñarme y, además, permitirme crecer como persona;

Las instalaciones de la universidad de Antioquia por acogerme a lo largo de los años y tener grandes recuerdos en este lugar;

Al grupo de investigación MAPRE por creer en mi desde un principio, y recibir su apoyo incondicional.

La empresa ARIS MINING y su personal por darme la oportunidad de aprender en sus instalaciones.

Resumen.

Este estudio aborda la modelación matemática del proceso de beneficio de oro en la planta María Dama, orientada a expandir su capacidad de procesamiento de 2000 a 3000 TPD. El enfoque se centra en la revisión y evaluación de los procesos determinantes, incluyendo la molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe, para asegurar un manejo eficiente del incremento en las toneladas de materia prima procesada.

A través de la construcción de modelos matemáticos basados en principios de balance de masa, se evaluaron las implicaciones de la expansión. Además, se realizaron ensayos experimentales, como la espectroscopia de absorción atómica (AAS) y la microscopía electrónica de barrido (SEM), para evaluar la eficiencia de los procesos y comportamiento de los minerales valiosos en cada etapa del proceso.

Los resultados demuestran que la expansión es viable, pero subrayan la necesidad de realizar ajustes específicos en la capacidad de los equipos y las condiciones operativas en las diferentes etapas estudiadas, para mantener o mejorar la eficiencia global. De esta forma se genera la necesidad de una planificación cuidadosa, además de la implementación de mejoras tecnológicas para que la planta pueda operar de manera eficiente a una mayor capacidad.

Abstract.

This study addresses the mathematical modeling of the gold beneficiation process at the María Dama plant, aimed at expanding its processing capacity from 2000 to 3000 TPD. The approach focuses on reviewing and evaluating the determining processes, including milling, flotation, leaching, and Merrill Crowe, to ensure efficient management of the increase in tons of raw material processed.

Through the construction of mathematical models based on mass balance principles, the implications of the expansion were evaluated. In addition, experimental tests, such as Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) and Scanning Electron Microscopy (SEM), were carried out to evaluate the efficiency of the processes and behavior of valuable minerals at each stage of the process.

The results demonstrate that expansion is feasible, but underscore the need to make specific adjustments to equipment capacity and operating conditions at the different stages studied, in order to maintain or improve overall efficiency. This creates the need for careful planning, in addition to the implementation of technological improvements so that the plant can operate efficiently at a higher capacity.

Tabla de contenido.

Resumen.....	5
Tabla de contenido.....	7
Índice de figuras.....	11
Índice de tablas.....	13
Índice de Gráficas.....	14
1 Introducción.....	15
2 Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3 Marco Teórico.....	18
3.1 Importancia del oro en la actualidad.....	25
3.2 Caracterización de partículas finas pertenecientes a plantas de beneficio de oro.	26
3.3 Balance de masa en plantas de beneficio de oro.....	28
3.4 Modelación matemática para la expansión.....	29
4 Generalidades de la empresa.....	30
4.1 Localización de la planta de beneficio de oro María Dama.....	30
4.2 Minería en los municipios de Remedios y Segovia.....	31
5 Metodología.....	32
5.1 Revisión bibliográfica.....	32
5.2 Reconocimiento del diagrama de flujo en la planta de beneficio María Dama.....	32
5.3 Balance de masa en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.....	33
5.4 Caracterización de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.....	33

5.4.1	Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.	36
5.4.2	Caracterización cuantitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.	36
5.5	Modelación matemática para la expansión de 2000 a 3000 TPD.....	37
6	Resultados y Análisis	38
6.1	Diagrama de flujo planta María Dama.	38
6.1.1	Diagrama de flujo etapa molienda presente en la planta Mará Dama.	38
6.1.2	Diagrama de flujo etapa de flotación presente en la planta María Dama.	39
6.1.3	Diagrama de flujo etapa de lixiviación presente en la planta María Dama.....	41
6.1.4	Diagrama de flujo en el proceso Merrill Crowe presente en la planta María Dama. 42	
6.2	<i>Balances de masa en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.</i> 43	
6.2.1	Balance de masa en el proceso de molienda.	45
6.2.2	Balance de masa en el proceso de flotación.	47
6.2.3	Balance de masa en el proceso de lixiviación.	48
6.2.4	Balance de masa Merrill Crowe.	50
6.2.5	Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.	51
6.2.5.1	Banda alimentación al molino (Banda 12).....	52
6.2.5.2	Sobre flujo hidrociclones principales.....	53
6.2.5.3	Bajo flujo hidrociclones principales.	55
6.2.5.4	Concentrado de la fase de limpieza (cleaner) del proceso de flotación.	57
6.2.5.5	Colas de la fase Scavenger del proceso de flotación (BULK).....	59

6.2.5.6	Sedimento del espesador #8.....	61
6.2.6	Análisis de forma por medio del software ImageJ.....	63
6.2.6.1	Dispersión de los datos obtenidos en el análisis de imagen.....	64
6.2.7	Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.	67
6.3	Modelación matemática para la expansión de 2000 a 3000 TPD.....	72
6.3.1	Nuevo circuito de molienda.	73
6.3.2	Nuevo circuito de flotación.	74
6.3.3	Datos de los equipos ubicados en la etapa de flotación.	76
6.3.4	Nuevo circuito de lixiviación.	77
6.3.5	Datos de los equipos ubicados en la etapa de lixiviación con cianuro.....	80
6.3.6	Nuevo circuito Merrill Crowe.	80
7	Análisis de resultados.....	82
8	Conclusiones.	88
	Referencias bibliográficas.	90
9	Anexo.	94
9.1	Mineral caracterizado de pirita.	94
9.2	Distribución granulométrica de las diferentes muestras.....	95
9.3	Análisis de partículas por medio del software ImageJ.	98
9.3.1	Banda #12.....	98
9.3.2	Bajo flujo hidrociclones principales.....	101
9.3.3	Sobre flujo hidrociclones principales.....	104
9.3.4	Bulk.	107
9.3.5	Concentrado flotación.	110

9.3.6	Sedimento espesador #8.	113
9.4	Vista previa modelación realizadas para el proceso de expansión.	116
9.4.1	Vista previa modelación en el circuito de molienda y flotación.	116
9.4.2	Vista previa modelación en el circuito de lixiviación y Merrill Crowe.	117

Índice de figuras.

Figura 1. Absorción del colector y espumante en la superficie del mineral.	21
Figura 2. Compuestos con propiedades antitumorales [21].	25
Figura 3. <i>Grado de esfericidad y redondez de las partículas minerales.</i>	27
Figura 4. Ubicación del municipio de Segovia en Antioquia [18].	30
Figura 5. <i>Diagrama de flujo proceso de molienda en María Dama.</i>	39
Figura 6. <i>Diagrama de flujo proceso de flotación en María Dama.</i>	40
Figura 7. <i>Diagrama de flujo proceso de lixiviación en María Dama.</i>	42
Figura 8. <i>Diagrama de flujo proceso Merrill Crowe en María Dama.</i>	43
Figura 9. Imagen SEM banda alimentación del molino (banda #12).	52
Figura 10. Mapeo elemental EDS Correspondiente a Electron image 1 en la figura 9.	53
Figura 11. Imagen SEM sobre flujo hidrociclones principales.	54
Figura 12. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 11.	55
Figura 13. Imagen SEM bajo flujo hidrociclones principales.	56
Figura 14. Mapeo elemental correspondiente a Electron image 1 en la figura 13.	57
Figura 15. Imagen SEM concentrado proceso de flotación.	58
Figura 16. Mapeo elemental correspondiente a Electron image 1 en la figura 15.	59
Figura 17. Imagen SEM colas de la fase Scavenger proceso de flotación.	60
Figura 18. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 17.	61
Figura 19. Imagen SEM sedimento espesador #8.	62
Figura 20. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 19.	63
Figura 21. Diagrama de flujo para la expansión de la etapa de molienda.	73
Figura 22. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de flotación.	76
Figura 23. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de remolienda para la lixiviación.	78
Figura 24. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de lixiviación.	79
Figura 25. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa Merrill Crowe.	81
Figura 26. Efecto del tamaño de partícula del sobre flujo de los hidrociclones principales en el proceso de flotación [28].	84

Figura 27. Microscopía Electrónica de Transmisión de alta resolución (HR-TEM) nanopartículas de Au en matriz del mineral [28].	85
Figura 28. Configuración de minerales refractarios [28].	86
Figura 29. Micrografía de mineral pirita caracterizado por SEM.	94

Índice de tablas.

Tabla 1. Datos obtenidos para balance de masa en molienda	46
Tabla 2. Resultados balance de masa molienda.	46
Tabla 3. Resultados balance de masa flotación.	48
Tabla 4. Resultados obtenidos para las densidades en la etapa de lixiviación.	49
Tabla 5. Resultados obtenidos de los flujos de pulpa en la etapa de lixiviación con cianuro.	50
Tabla 6. Resultado obtenido para el proceso Merrill Crowe en el balance de masa.	50
Tabla 7. Valores promedio de la circularidad y redondez de las partículas de mineral obtenidos del análisis de las micrografías en ImageJ.	64
Tabla 8. Resultados obtenidos por medio del ensayo de absorción atómica en ppm.	68
Tabla 9. Porcentaje de muestra que pertenece a la malla pasante 400.	68
Tabla 10. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de molienda.	74
Tabla 11. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de flotación.	76
Tabla 12. Tiempo de residencia actual en la etapa de flotación María Dama.	77
Tabla 13. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de lixiviación.	79
Tabla 14. Tiempo de residencia en la etapa de lixiviación.	80
Tabla 15. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa Merrill Crowe.	81
Tabla 16. resultados granulométricos banda #12.	95
Tabla 17. Resultados granulométricos bajo flujo (under flow) HC principales.	95
Tabla 18. Resultados granulométricos sobre flujo (over flow) HC principales.	96
Tabla 19. Resultados granulométricos Bulk.	96
Tabla 20. Resultados granulométricos concentrados dúo #4.	97
Tabla 21. Resultados granulométricos sedimento espesador #8.	97
Tabla 22. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ banda #12.	99
Tabla 23. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ bajo flujo HC principales.	102
Tabla 24. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ sobre flujo HC principales.	105
Tabla 25. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ colas Bulk.	108
Tabla 26. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ concentrado de flotación.	111
Tabla 27. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ espesador #8.	114

Índice de Gráficas.

Gráfico 1. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos de la banda #12.	64
Gráfico 2. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del bajo flujo del HC principal. .	65
Gráfico 3. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del sobre flujo de los HC principales.	65
Gráfico 4. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos de las colas Bulk.	66
Gráfico 5. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del concentrado de flotación.	66
Gráfico 6. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del sedimento del espesador #8.	67
Gráfico 7. Porcentaje de la muestra que pertenece a los finos (< 37 μm).	69
Gráfico 8. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías en la banda #12.	69
Gráfico 9. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el bajo flujo (under flow) de los hidrocilones principales.	70
Gráfico 10. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías del sobre flujo (over flow) de los hidrocilones principales.	70
Gráfico 11. relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en las colas de la fase Scavenger.	71
Gráfico 12. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el concentrado de flotación.	71
Gráfico 13. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el sedimento del espesador #8.	72

Introducción.

Colombia un país con alta riqueza en depósitos de oro de alta ley y que alberga una industria aurífera emergente, junto con un sector minero artesanal activo, presenta una importante oportunidad de colaboración buscada por ARIS MINING, la industria minera, en particular la encargada de la extracción de oro desempeña un papel crucial en la economía de muchas regiones del país. ARIS MINING establecida en septiembre de 2022, fue fundada con la visión de crear una empresa minera de oro que combine la producción actual y la generación de flujo de efectivo con crecimiento de expansiones de zonas industriales abandonadas, proyectos de explotación y desarrollo. En la actualidad las operaciones Segovia y Marmato Upper Mine produjeron 226.000 onzas de oro en 2023, además con proyectos de expansión en curso, Segovia y Marmato tienen como objetivo producir 500.000 onzas de oro en 2026. Por lo general en las operaciones mineras la ley de los minerales asociados al oro empieza a disminuir, en este contexto, la expansión de la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio María Dama de 2000 a 3000 toneladas por día (TPD) [1], es crucial para el aumento de la producción y el cumplimiento de los estándares establecidos. Esta expansión presenta desafíos y oportunidades significativas en el campo de la ingeniería, para esto, la eficiencia de los flujos y la productividad de la planta son aspectos clave para maximizar el rendimiento, además de la rentabilidad de la operación minera, ya que el proceso debe cumplir parámetros y condiciones específicas, de esta forma tener estabilidad y control del proceso.

Desarrollar la modelación matemática de la expansión, significa proyectar teóricamente el comportamiento del proceso actual al aumento que se desea en la capacidad productiva, dependiendo de; las variables de flujo, los equipos que se desean implementar, los equipos que se dejan en el proceso y, además, la cantidad de mineral explotable de la región; son aspectos importantes en este estudio ya que permiten un mejor entendimiento del proceso que se lleva en la planta, de esta forma afianzar lo que ya está establecido, en el campo del análisis de los datos que se obtienen en los diferentes procesos realizados en la planta de beneficio María Dama, es empleado un software, que permite el análisis de los datos, pero por políticas interna de la empresa en este documento no se emplea este programa de análisis de datos para la modelación aquí realizada. El rol de este proyecto implica estudiar la capacidad actual, realizar un estudio sobre los

flujos mediante pruebas metalúrgicas, realizar comentarios sobre las diferentes etapas del procesamiento, analizar mediante diferentes técnicas de caracterización el estado actual del proceso, determinando el efecto de los distintos procesos en las partículas, a partir de esto realizar balance de masa unificado en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe de la planta María Dama para la capacidad de procesamiento a la cual se espera llegar, de esta forma tener un documento que sirva de soporte para su futura implementación.

Objetivos.

Objetivo General.

Establecer el modelo matemático para la expansión a 3000 TPD de los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe en la planta de beneficio María Dama, de esta forma obtener la capacidad actual y la proyección a la expansión.

Objetivos Específicos.

- Obtener diagrama de flujo donde se implementen las diferentes variables implicadas en el proceso actual en las etapas de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe de esta forma obtener la capacidad actual del proceso.
- Valorar la capacidad máxima actual, recalculando las variables implicadas en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.
- Analizar mediante diferentes técnicas de caracterización la banda de alimentación del molino (banda 12), sobre flujo (over flow) y bajo flujo (under flow) de los hidrociclones primarios, concentrados de la etapa limpiadora (cleaner) de impurezas de flotación, colas de la etapa depuradora (scavenger) de flotación y sedimento del espesador #8.
- Determinar la modelación matemática correspondiente para los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe con base en la información recolectada sistémicamente en la planta durante la práctica de industria realizada.

Marco Teórico.

La microestructura es un factor importante que afecta todas las propiedades mecánicas de los materiales. Si bien el efecto de la microestructura sobre el comportamiento a la deformación y a la falla es bien conocido para aceros, aleaciones y cerámicas, este no es el caso para el comportamiento de rotura de los materiales geológicos dentro de los equipos de trituración, en el contexto del procesamiento de materiales minerales [2], ya que el comportamiento del material rocoso determina, el consumo de energía y las características de las partículas del producto en procesos de conminución [3]. En el procesamiento de minerales auríferos llevado a cabo en la planta María Dama, es importante conocer la composición mineralógica y las propiedades de los minerales de la región para una correcta disminución de tamaño de partícula mediante trituración [4][5], proceso en el cual el tamaño de las partículas del mineral se reduce progresivamente hasta que las partículas limpias del mineral pueden ser separadas mediante los métodos disponibles [6]. La trituración en sus primeras etapas se lleva a cabo para que el material extraído sea más fácil de manipular mediante raspadores y transportadores de mineral. En la minería del oro es común utilizar explosivos para extraer minerales de sus lechos naturales, y la voladura puede considerarse como la primera etapa de la trituración [7].

En la primera etapa mecánica del proceso de trituración (cuyo objetivo principal es la liberación de los minerales valiosos de la ganga), es típicamente una operación seca que se realiza en dos o tres etapas (primaria, secundaria y terciaria) [7]. Los trozos de mineral puro son reducidos en la etapa de trituración primaria. Para la trituración primaria en la superficie, es habitual que el departamento de minería entregue el mineral al departamento de procesamiento de minerales, para que triture y manipule el mineral.

La trituración primaria se da con máquina de trabajo pesado, se utilizan para reducir el mineral en bruto a un tamaño adecuado para las bandas transportadoras y alimentar las trituradoras secundarias, estas máquinas de trabajo pesado funcionan en un circuito abierto, con cribas de corte de alta resistencia (Grizzlies), además su característica distintiva son las placas que se abren y cierran como mandíbulas de animales [8]. Las mordazas están colocadas en un ángulo agudo entre sí, y una mordaza gira de manera que oscila con respecto a la otra mordaza fija. El material

alimentado a las mandíbulas se pellizca y libera alternativamente para caer más dentro de la cámara de trituración, finalmente cae por la abertura de descarga. Las trituradoras primarias comúnmente están diseñadas para operar el 75% del tiempo disponible, principalmente debido a interrupciones causados por una alimentación insuficiente de la trituradora y retrasos mecánicos [7].

Posterior al proceso de trituración primaria se da el proceso de trituración secundaria. El proceso inicia por una serie de selección por tamaño de partícula a través del cribado, seleccionando tres tipos de tamaño de partícula, las cuales según su tamaño son llevadas a las trituradoras cónicas, para el tamaño de partícula mayor y menor retenido el proceso de trituración terciaria, las partículas pasantes son llevadas a molienda [7]. Las trituradoras secundarias y terciarias también funcionan con alimento secos, su propósito es reducir el mineral a un tamaño adecuado para la molienda. Las trituradoras cónicas utilizadas no requieren una gran abertura, la carcasa de trituración se ensancha hacia afuera, lo que permite el hinchamiento del mineral quebrado al proporcionar un área de sección transversal creciente hacia el extremo de la descarga, el alcance de las trituradoras de cono puede ser hasta cinco veces mayor que el de las trituradoras primarias, que deben soportar tensiones de trabajo más pesadas. También funcionan a velocidades mucho más altas [9].

La molienda es la última etapa del proceso de trituración, en esta etapa las partículas se reducen de tamaño mediante una combinación de impacto y abrasión, en húmedo. Se realiza este proceso en recipientes cilíndricos de acero giratorios que contienen una carga de cuerpos molidores sueltos, los cuales tienen la libertad de moverse dentro del molino, de esta forma se da la trituración del mineral. El propósito de la sección de molienda es ejercer un estrecho control sobre el tamaño de la materia prima para los procesos posteriores, por esta razón, se dice que una molienda correcta es la clave para un buen procesamiento de minerales, aunque el molino giratorio se ha desarrollado con alto grado de eficiencia mecánica y confiabilidad, son extremadamente derrochadores en términos de energía gastada, ya que el mineral se rompe en su mayor parte como resultado de impactos repetidos y aleatorios, que rompen tanto el mineral liberado como el no liberado, aun el proceso de liberación óptima en escala industrial no tiene una forma práctica de que estos impactos puedan dirigirse a las interfaces entre los granos minerales y el metal libre, lo que produciría una liberación óptima [7][10].

La carga del molino es llevada a un proceso de clasificación, donde son seleccionadas las partículas más gruesas de las más finas, este proceso se hace a través de los hidrociclones, los cuales son clasificadores de funcionamiento continuo que utiliza la fuerza centrífuga para acelerar la velocidad de sedimentación de las partículas. Es uno de los dispositivos más importantes en la industria de los minerales, siendo su uso principal en el procesamiento de minerales como clasificador, que ha demostrado ser extremadamente eficiente en tamaños de separación finos. Se utiliza ampliamente en operaciones de molienda en circuito cerrado [11], un hidrociclón típico consiste en un recipiente de forma cónica, abierto en su vértice o flujo inferior, unido a una sección cilíndrica, que tiene una entrada de alimentación tangencial. La parte superior de la sección cilíndrica se cierra con una placa a través de la cual pasa un tubo de rebose montado axialmente. El tubo se extiende hacia el interior del cuerpo del ciclón mediante una selección corta y extraíble conocida como buscador de vórtices lo que evita el cortocircuito de la alimentación directamente al rebosadero. La alimentación se introduce bajo presión a través de la entrada tangencial que imparte un movimiento giratorio a la pulpa. Esto genera un vórtice en el ciclón, desarrolla un núcleo de aire a lo largo del eje, normalmente conectado a la atmosfera a través de la abertura del ápice, pero creado en parte por el aire disuelto que sale de la solución en la zona de baja presión [12].

La existencia de una región exterior de flujo descendente y una región interior de flujo ascendente implica una posición en la que no hay velocidad vertical. Esto se aplica a la mayor parte del cuerpo del ciclón. Las partículas arrojadas fuera de la envoltura de velocidad vertical cero por la mayor fuerza centrífuga salen a través del bajo flujo (under flow), mientras que las partículas arrastradas hacia el centro por la mayor fuerza de arrastre salen por el sobre flujo (over flow) [7]. Las partículas que se encuentran en la envoltura de velocidad cero son sometidas a fuerzas centrifugas y de arrastre iguales y tienen la misma probabilidad de reportarse al flujo interior o al desbordamiento.

Las partículas seleccionadas en el bajo flujo (under flow) de dos hidrociclones son recirculadas al proceso de molienda, y de tres hidrociclones a una criba vibratoria, posterior al cribado el material retenido vuelve al proceso de molienda y la carga pasante es llevada al proceso de concentración centrífuga, para esta etapa es utilizado un equipo Knelson, el cual no es más que un separador centrífugo discontinuo compacto, el cual imprime una fuerza centrífuga de hasta 200 veces la fuerza de gravedad sobre las partículas, atrapando las más densas en una serie de anillos ubicados

en el interior del equipo, mientras las partículas de ganga son expulsadas por la acción de la inyección de agua a través de una serie de orificios dispersos por los anillos del separador centrífugo [12]. El material concentrado es almacenado en una tolva, la cual alimenta una mesa vibratoria GEMINI, en esta última se da la separación del metal precioso por la acción de dos fuerzas, el movimiento de la mesa y la película de agua que fluye por toda la geometría de la mesa vibratoria. El material precioso concentrado sufre un ataque químico con ácido nítrico para limpiar este material y eliminar la mayor cantidad posible de impurezas.

Las partículas seleccionadas en el sobre flujo (over flow) son llevadas al proceso de flotación el cual es sin duda la técnica de procesamiento de minerales más importante y versátil. En escala industrial es implementado ya que permite grandes flujos de carga, además de estar en constante ampliación para tratar mayores tonelajes y cubrir nuevas áreas. La flotación es un proceso de separación físico – química que utiliza la diferencia en las propiedades de la superficie de los minerales valiosos y los minerales de ganga no deseados, la flotación es un proceso complejo ya que involucra tres fases (sólido, líquido y gaseoso), con muchos subprocesos e interacciones, y no se comprende completamente [7]. En este proceso de recuperación del material por flotación de pulpa se comprende tres mecanismos:

1. Adhesión selectiva a las burbujas de aire.
2. Arrastre en el agua que pasa a través de la espuma.
3. Atrapamiento físico entre partículas de la espuma adheridas a burbujas de aire (agregación).

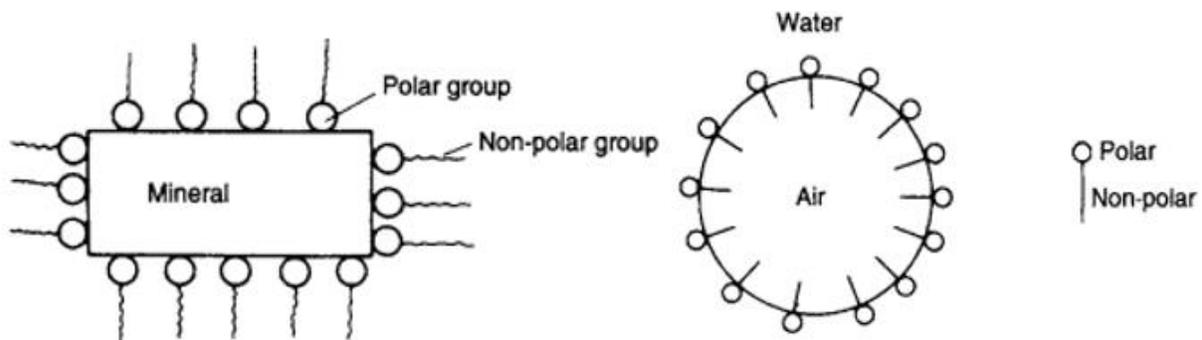


Figura 1. Absorción del colector y espumante en la superficie del mineral.

La unión del mineral valioso a las burbujas de aire es el mecanismo más importante y representa la mayoría de las partículas que se recuperan en el concentrado. Aunque la verdadera flotación es el mecanismo dominante para la recuperación de minerales valiosos, la eficiencia de separación entre el mineral valioso y la ganga también depende del grado de arrastre y atrapamiento físico. El drenaje de estos minerales valiosos ocurre en la fase de espuma y controlar la estabilidad de esta fase es importante para lograr una separación adecuada. En la práctica de las plantas de flotación industriales, el arrastre de ganga no deseada puede ser común y, por lo tanto, una sola etapa de flotación es poco común. A menudo se requiere varias etapas de flotación (circuitos) para alcanzar una cantidad económicamente aceptable de mineral valioso en el producto final. En estos circuitos es común utilizar agitadores, los cuales proporcionan suficiente turbulencia en la fase de pulpa para promover la colisión de partículas y burbujas que da como resultado la unión de partículas valiosas a las burbujas y su transporte a la fase de espuma para su recuperación. El proceso solo se puede aplicar a partículas relativamente finas, porque si son demasiado grandes, la adhesión entre la partícula y la burbuja será menos que el peso de la partícula, por lo tanto, la burbuja perderá su carga.

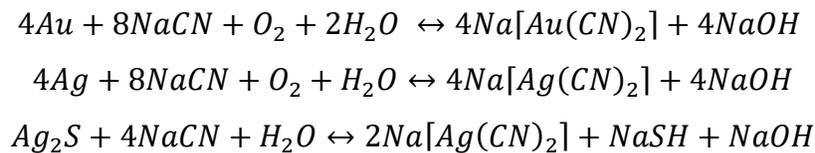
Existe un rango de tamaño de partículas óptimo para una flotación exitosa [13], además de una serie de condiciones que se deben tener en cuenta para que la flotación sea óptima:

1. Composición química del mineral asociado al oro.
2. Activadores y depresores.
3. Carga de colectores.
4. Forma de las partículas minerales y su tamaño.

La flotación ha permitido la explotación de grandes yacimientos minerales complejos y de baja ley de otro modo se habría considerado antieconómico, este proceso permite la separación selectiva de minerales y metal libre en ellos.

Tras realizar la exposición y liberación del metal se realiza el proceso de lixiviación con cianuro, el cual es un proceso en el cual están implicadas una serie de reacciones químicas, al poner en contacto el cianuro con los metales libres dispersos en los concentrados, el oro y la plata son

solubilizados, recordando que estos metales son metales nobles, como tales, no son solubles en agua, pero si en soluciones de cianuro [14]. Los metales preciosos forman complejos con aniones cianuro para producir derivados solubles, por ejemplo, $[Au(CN)_2]^-$ y $[Ag(CN)_2]^-$ en condiciones alcalinas fuertes, típicamente a $pH > 10$ utilizando Cal (óxido de calcio y/o hidróxido de calcio) para mantener la forma iónica de cianuro y además previene la volatilización al peligroso ácido cianhídrico (HCN). La cianuración del oro se lleva a cabo en varios pasos de reacción y la reacción general se conoce en la ecuación de Elsner [15].



Ecuación 1. Reacciones más favorables en cianuración.

La “solución rica” que contiene estos iones ($[Au(CN)_2]^-$ y $[Ag(CN)_2]^-$) se separa de los sólidos, por medio de un sistema de espesadores y agitadores, este sistema permite agotar el concentrado y recuperar la mayor cantidad de oro y plata posibles, los sólidos agotados tienen una composición química explotable, pero por lo general se desechan en un estanque de relaves o en un montón de desechos, una vez removidos el oro y la plata.

Después de extraer el oro, las aguas residuales o las soluciones de proceso pueden contener tres tipos principales de compuestos de cianuro: cianuro libre, cianuro débilmente acomplexado y cianuro fuertemente acomplexado [16]. El oro y el cianuro pueden formar un complejo fuerte en soluciones de cianuro relativamente débiles. Para la lixiviación de plata, como el complejo de cianuro de plata es más débil que el complejo de cianuro de oro, se debe emplear una solución de cianuro más fuertes y/o tiempos de reacción más prolongados para lograr la disolución de la plata debido a la refractariedad de los minerales del sulfuro de plata [15].

El oro se puede separar de la “solución rica” que contiene complejos de oro y cianuro mediante reducción con cinc o polvo de cinc (cementación con cinc, proceso Merrill-Crowe) o absorción

sobre carbón activado. En el proceso de precipitación con cinc, el polvo de cinc elemental reduce los iones de oro a su forma metálica libre en ausencia de oxígeno [17].



Ecuación 2. Reacción de cementación con cinc (Zn).

La materia prima precipitada es retenida en el proceso de filtrado, donde se retiene el material precipitado en una serie de filtro-prensa conectadas al sistema Merrill Crowe, en este proceso las partículas precipitadas interactúan con una serie de telas bañadas con varias capas de aluminato tricálcico (un ayudante de filtración para la clarificación y purificación de la solución empobrecida por el proceso de precipitación).

En un proceso posterior el material particulado es cosechado, este proceso se realiza extrayendo el material filtrado de la filtro-prensa, este material cosechado se almacena junto con el material concentrado por la mesa GEMINI, aunque los dos concentrados son fundidos de forma separada ya que tienen una ley distinta, de esta forma obtener el doré, lo que no es otra cosa que una aleación de oro, plata, cobre y zinc.

Importancia del oro en la actualidad.

Dado su uso histórico y la relación que es notable con el afán de obtener el material precioso, teniendo como principal motivo de su extracción la idea de riqueza material, aunque desde un punto de vista más científico es darle un uso motivado por sus propiedades eléctricas, ópticas y biológicas. Las aplicaciones del oro varían mediante la necesidad a la cual ha sido expuesto; en joyería, los artesanos emplean el oro en la fabricación de accesorios tales como anillo, cadenas, nariceras, monedas, aretas y demás objetos posibles; en economía, desde la antigüedad se ha determinado su valor, por este motivo los lingotes han sido utilizados, en forma de un refugio activo para sostener la moneda de los territorios, además en la actualidad llega a sostener incluso en tiempos de crisis económicas, ya que su alza ha coincidido, históricamente con crisis económicas e hiperinflación [20].

En el campo de las aplicaciones especializadas, se ha determinado su aplicabilidad en los campos de; la electrónica, utilizado por su alta conductividad eléctrica y estabilidad frente a la corrosión, en contactos eléctricos y cables conductores; la medicina, ya que no reacciona frente a los procesos biológicos, como implantes; además se han sintetizado moléculas a partir de los átomos de oro que permiten tratar algunas enfermedades [21].

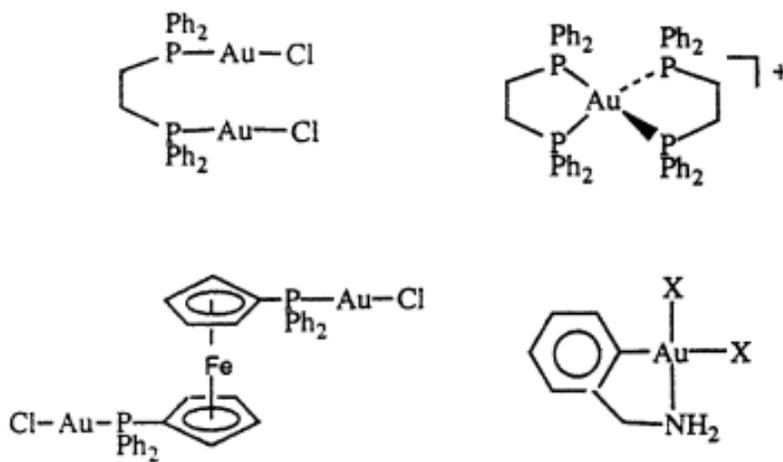


Figura 2. Compuestos con propiedades antitumorales [21].

Caracterización de partículas finas pertenecientes a plantas de beneficio de oro.

En los procesos metalúrgicos determinar el tamaño y la forma de las partículas implicadas en las diferentes etapas del proceso, se considera en el mundo actual de vital importancia. Cada año las industrias metalúrgicas, tratan millones de partículas, las cuales tienen propiedades individuales y en conjunto, estas propiedades están divididas en dos clases; propiedades primarias resultantes de la composición química y la estructura cristalina; las propiedades secundarias asociadas con sistemas de colecciones de partículas individuales [25]. Las características físicas de las partículas individuales, como sus tamaños, formas y distribuciones de tamaño, también como interactúan entre sí las partículas en conjunto, determinan las propiedades generales, la velocidad de sedimentación de las partículas, la compactación, la fluidez, la sinterización, etc.

La caracterización de materiales particulados es el factor clave para la investigación y el desarrollo industrial, proporciona un mayor conocimiento de las conexiones entre el procesamiento, la estructura, las características y el rendimiento de los materiales implicados [26]. La evaluación del comportamiento de los polvos durante el procesamiento de minerales es posible gracias al conocimiento de las variables del proceso junto con las propiedades físicas, por este motivo, evaluar la distribución granulométrica, la forma y la estructura, es una etapa crucial y moderna en el control del proceso.

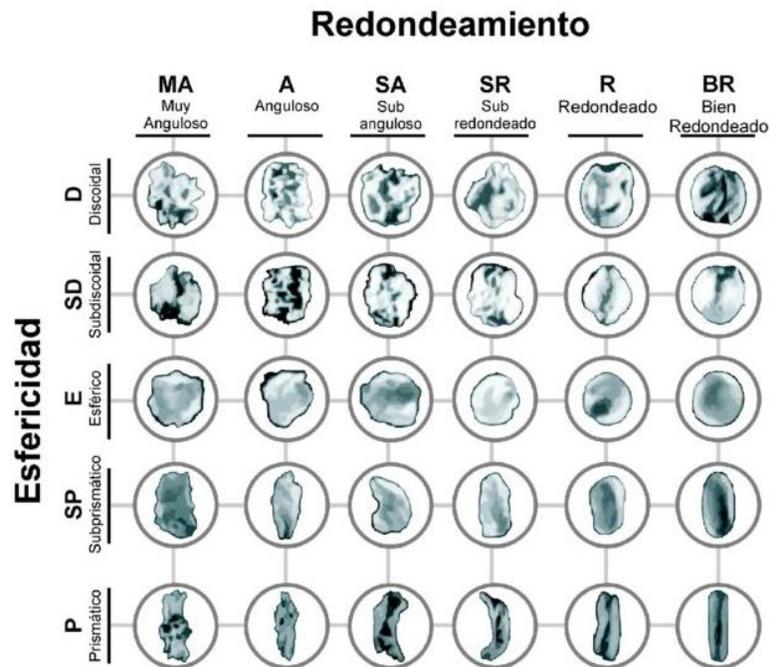


Figura 3. Grado de esfericidad y redondez de las partículas minerales.

En las operaciones de procesamiento de minerales, la separación también depende de las formas de las partículas. En las operaciones de clasificación mediante hidrociclón, se ha observado que las partículas esféricas tienden a separarse más eficazmente que las partículas escamosas, y en el proceso de flotación se prefieren partículas irregulares por su mayor superficie de contacto para la unión de las partículas a las burbujas [27][28].

Balance de masa en plantas de beneficio de oro.

El balance de masa es una contabilización de material que entra y que sale de un proceso, en el cual sufre un cambio físico, químico e inclusive fisicoquímico, los balances de masa se fundamentan en la ecuación general de la ley de conservación de la materia, en 1748 Lomonósov-Lavoisier enunció “En un sistema aislado, durante toda reacción química ordinaria, la masa total en el sistema permanece constante, es decir, la masa consumida de los reactivos es igual a la masa de los productos obtenidos”.

Determinar la capacidad del flujo de pulpa que tiene todo el sistema de beneficio de oro en María Dama es un paso que no se puede saltar al momento de realizar una modelación matemática. En la actualidad el sistema se encuentra limitado en 2000 TPD, es importante realizar dicho balance y posteriormente realizar el balance para el procesamiento de 3000 TPD, permitiendo determinar variables importantes y además tener un mayor control del proceso para los futuros cambios en el flujo, dicho balance se realiza con modelos de cálculos encontrados en la literatura [22][23][24], a partir de esto se realiza una base de datos que permita estimar cuanto varía el proceso en el tiempo, de esta forma realizar conclusiones sobre dicho balance de masa y observar realmente la importancia de implementar la modelación matemática en el incremento de la capacidad de producción de los diferentes equipos encontrados en la planta, determinando el volumen de estos, el flujo de alimentación y el tiempo de residencia en cada equipo.

Los errores aleatorios se deben a eventos relacionados con la instrumentación (dispositivos de muestreo y medición), fluctuaciones de las propiedades de los materiales y perturbaciones externas. La importancia de realizar una base de datos en el tiempo está relacionada con la caracterización del proceso por estadística, la desviación estándar un parámetro que cuantifica la precisión de la medición, la precisión de una medición es la proximidad al valor real e incluyendo el efecto de errores sistemáticos aleatorios [24]. En el presente trabajo solo se consideran los errores aleatorios.

Modelación matemática para la expansión.

La modelación matemática es la actividad que consiste en representar manipular y comunicar objetos del mundo real con contenidos matemáticos que permitan la simulación de procesos complejos, generar hipótesis y sugerir experimentos o métodos de validación. Dicha modelación se presenta como estrategia didáctica que permite simular e interpretar diferentes problemas y situación de la vida real. El proceso de modelación para la expansión en una planta metalúrgica es un proceso en el cual se deben considerar muchos escenarios, por este motivo la modelación requiere de un proceso de estudio que puede ser muy amplio en el cual se estudien las condiciones y variables implicadas del proceso, de esta forma cada modelación tiene sus implicaciones, sus pronósticos los cuales pueden ir mutando incluso cuando ya se ha implementado la expansión, realizar una revisión de las variables implicadas permite incluso tomar decisiones que pueden determinar la viabilidad de una inversión o no.

La modelación está fundamentada en los cambios que se deben realizar en los volúmenes y flujos de pulpas, por este motivo el diseño de la planta varía y se encuentra la forma adecuada de implementar la expansión, aumentar el volumen en determinadas etapas, manteniendo estable el tiempo de residencia de las partículas, y observar el cambio que se da en los flujos de las pulpas en las diferentes etapas encontradas.

Minería en los municipios de Remedios y Segovia.

La zona minera de los municipios de Remedios y Segovia se ha caracterizado por contar con uno de los depósitos de electrum (aleación de oro y plata) de clase mundial, de alta ley, en donde se han extraído hasta el momento más de 5 millones de onzas [18]. La historia de explotación de esta zona minera es de aproximadamente 200 años con un aumento importante en la actividad minera en el año 1840 donde se dan las primeras migraciones a este territorio de familias mineras. En el año 1931, por medio de acuerdos nacionales el territorio es adquirido y explotado oficialmente por la compañía Frontino Gold Mines, una empresa con origen en EE. UU. (Estados Unidos), posterior a la Frontino, la compañía en 1993 paso a ser llamada Gran Colombia Gold y desde el año 2022 es operada por ARIS MINING Segovia [19].

El material procesado es extraído de cuatro sistemas de minas, las cuales son identificadas con los nombres de; El silencio, Sandra K, providencia y Carla, existen adicionalmente, algunas minas de asociaciones de pequeña minería, estas asociaciones tienen contratos para el beneficio de material en la planta María Dama. La materia prima alimentada al molino es mezclada con las minas de ARIS MINING y la pequeña minería, esta materia prima tienen variaciones en el tenor, 15,48 g/t en el 2019, para el 2021 el tenor fue de 12,21g/t [18], en el 2024 el tenor se encuentra en 11,6 g/t. En este contexto al disminuir el tenor, es necesario incrementar la capacidad de procesamiento de la planta María Dama para mantener la capacidad productiva.



Metodología.

Revisión bibliográfica.

Se buscó y revisó la bibliografía pertinente sobre los diferentes temas teóricos del proceso de beneficio de oro con el fin de resolver los objetivos planteados. Dicha revisión se realizó por medio de las bases de datos disponibles en el sistema de bibliotecas de la Universidad de Antioquia, consultando libros y publicaciones científicas.

Reconocimiento del diagrama de flujo en la planta de beneficio María Dama.

Es un proceso importante que se le realiza para determinar las condiciones de operación del proceso actual de beneficio de oro en la planta María Dama. El reconocimiento se realiza con la ayuda de los jefes de turno y el personal disponible en cada puesto del proceso, a partir de este reconocimiento, realizar el diagrama con el flujo del proceso actual y determinar los puntos importantes del proceso (estos puntos están determinados por el cambio en el tipo de proceso que se le realiza al mineral).

El diagrama de flujo está acompañado de la literatura encontrada y basado en información científica, que permite determinar qué tipo de proceso físico o químico se está ocurriendo en cada etapa, así determinar la importancia de los diferentes procesos y su impacto en el procesamiento de los minerales.

Balance de masa en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.

El balance de masa en este documento es realizado por medio de las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7, a partir de estas se genera el modelo de cálculo, el cual no se especifica en este documento por cuestiones de privacidad, solo se muestran las ecuaciones empleadas y los resultados obtenidos.

Para el desarrollo de este balance de masa y la modelación para la expansión, es importante mencionar que los datos medidos siempre se ven afectados por errores experimentales. No se puede construir ningún sensor que sea absolutamente exacto y preciso. Además de la incertidumbre relacionada con los dispositivos de medición, pueden surgir errores en el muestreo o en el posicionamiento del proceso al tomar la muestra, debido a la heterogeneidad inherente al espacio y al tiempo de las variables del proceso.

Caracterización de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.

Se realiza una distribución de tamaño de partícula con tamices y se selecciona una población de partículas de interés, luego por medio de microscopía electrónica de barrido (SEM), dispersión de barrido de rayos x (EDS) y espectroscopía de absorción atómica (AAS), se determina la forma de las partículas y la composición química en 6 diferentes etapas del proceso, de esta forma ver el efecto del proceso en determinada población de partículas y además como se da el proceso de recuperación de la materia prima valiosa.

En el diagrama de flujo se determinan estos puntos de caracterización, los cuales son; **X₁** banda de alimentación del molino (banda 12); **X₂** bajo flujo (under flow) de los hidrociclones principales; **X₃** sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales; **X₄** colas de la etapa depuradora (scavenger) de flotación (bulk); **X₅** concentrado de la etapa limpiadora (cleaner) de impurezas de flotación; **X₆** sedimento espesador #8. Estos puntos de caracterización son seleccionados por el impacto del proceso en las partículas de los minerales procesados.

El muestreo se realiza en determinadas fechas y bajo condiciones de planta distintas, se realiza este proceso en 3 ocasiones, esto está limitado ya que la planta presenta condiciones de procesamiento distintas las cuales pueden ser que; el tonelaje de alimentación del molino varía, por esto en este muestreo y para los términos de estudio se realiza solo el muestreo cuando la alimentación del molino sea mayor a 90 toneladas por hora; en planta María Dama el cárcamo es utilizado para contener los derrames de la materia prima, en determinadas ocasiones cuando el cárcamo excede un límite, la materia prima contenida es bombeada para ser procesada, esto tiene implicaciones en la certeza del muestreo realizado, por este motivo se requiere que no se esté bombeando del cárcamo la materia prima contenida; como ya ha sido mencionado se alimentan de dos proporciones de mineral, mineral de minas de ARIS MINING y mineral de minas externas (pequeña minería), por lo general las materias primas son alimentadas bajo relaciones, donde se ve implicado el tenor de cada mineral procesado, por este motivo en ciertas ocasiones el mineral alimentado de pequeña minería es mayor en porcentaje que el mineral de ARIS MINING, o viceversa, por motivos de estudio esta variación no se tiene en cuenta para limitar el proceso de muestreo, solo se deja en constancia la relación utilizada.

Son tomados tres litros en total para determinados tiempos en un mismo día, se toma un litro hasta completar los tres litros y por cada toma se mide la densidad de la muestra, de esta forma se realiza un muestreo aleatorio. Las muestras son tomadas en los lugares ya mencionados X_1 ; X_2 ; X_3 ; X_4 ; X_5 ; X_6 .

El primer muestreo se realizó bajo las siguientes condiciones de planta:

- La alimentación del molino al momento de realizar el muestreo fue de 95 toneladas por hora.
- De las 95 toneladas 45 toneladas pertenecían a minería de ARIS MINING y 50 toneladas de pequeña minería.
- El espesador #8 se encontraba en recirculación.
- El flujo en toda la operación se encontraba estable.
- No se estaba bombeando materia prima del cárcamo.

El segundo muestreo se realizó bajo las siguientes condiciones de planta:

- La alimentación del molino al momento de realizar el muestreo fue de 100 toneladas por hora.
- De las 100 toneladas 70 toneladas pertenecían a minería de ARIS MINING y 30 toneladas de pequeña minería.
- El flujo en toda la operación se encontraba estable.
- No se estaba bombeando materia prima del cárcamo.

El tercer muestreo se realizó bajo las siguientes condiciones de planta:

- La alimentación del molino al momento de realizar el muestreo fue de 98 toneladas por hora.
- De las 98 toneladas 73 pertenecían a minería de ARIS MINING y 25 toneladas de pequeña minería.
- El flujo en toda la operación se encontraba estable.
- No se estaba bombeando materia prima del cárcamo.
- El espesador #8 no estaba recirculando.

Las muestras son secadas en un horno de resistencias a 200 °C por 3h, posterior a este proceso las muestras son almacenadas y mezcladas con las muestras de los diferentes días y de la misma etapa, de esta forma se obtiene una muestra final. Para finalizar el proceso de obtener una muestra representativa, se realiza varias veces el proceso de cuarteo, para obtener 100 gr finales, los cuales son tamizados hasta obtener materia prima pasante por la malla 400, obteniendo partículas con un tamaño $< 37 \mu\text{m}$, de esta forma limitar la caracterización en lo más fino obtenido en el procesamiento.

De la materia prima obtenida en el pasante por la malla 400 se almacenan 5gr de muestra, los cuales son llevados a la Universidad de Antioquia para su caracterización. La preparación de la muestra

se realiza desde la porta muestra, anclando el polvo sobre cinta de grafito, posterior a este proceso se realiza una metalización sobre la muestra con polvo de oro.

Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.

La caracterización cualitativa se lleva a cabo en la Universidad de Antioquia, por medio de un Microscopio Electrónico de Barrido (SEM) JEOL JSM - 6490LV con fuente termoiónica, además este equipo cuenta con un detector INCAPentaFETx3, el cual permite realizar el análisis por Espectroscopía de Energía Dispersada (EDS) de las partículas estudiadas, la imagen puede ser observada a través del software JEOI Scanning Electron Microscope y el análisis EDS se obtiene a través del programa INCA – Point & ID.

Para determinar el área y el perímetro de las partículas se utiliza el software ImageJ, el cual permite un procesamiento analítico de imágenes, con el fin de analizar como varía en cada etapa del procesamiento la granulometría y la forma de las partículas. Determinar estas variables metalúrgicas en plantas de beneficio es vital para conocer e investigar el proceso industrial.

Caracterización cuantitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.

Posterior a este proceso se realiza un análisis cuantitativo por medio de la técnica Espectroscopía de Absorción Atómica (AAS), en el equipo Agilent Technologies 200 Series AA ubicado en el laboratorio químico perteneciente a la empresa ARIS MININING, el software Agilent 240fs AA es el encargado de realizar la lectura de los resultados, las lámparas utilizadas tienen la capacidad de arrojar valores de 10ppm, de esta forma cuando excede este valor se debe realizar una dilución de la muestra hasta ajustar la medición, además se utiliza una llama oxiacetilénica la cual tiene implicaciones favorables en la cuantificación de los minerales refractarios ya que los oxida. Con el fin de determinar las partes por millón (ppm) de Au y Ag en las muestras tomadas de las diferentes

etapas, para este punto se determina realizar una comparativa para cada una de las muestras tomadas del flujo, tomando así, una muestra de 100gr con la granulometría completa, y una muestra de 100 [gr] de pasante malla 400. De esta forma determinar la concentración en ppm de Au y Ag para el tamaño de partícula más fino y observar que tan relevante puede ser este fino en el proceso.

Se realizan granulométricos para las muestras tomadas, este proceso se realiza en seco con los tamices disponibles en el laboratorio metalúrgico de la planta María Dama. En este sentido observar la distribución granulométrica de las muestras y determinar el porcentaje al cual pertenecen los finos (malla pasante 400) de la granulometría de cada muestra, de esta forma observar las implicaciones que tiene el tamaño de partículas en la concentración de Au y Ag en la granulométrica completa y en los finos.

Modelación matemática para la expansión de 2000 a 3000 TPD.

En este documento se revisan las variables implicadas en el procesamiento que impiden realizar un proceso más eficiente, además se determinan los cambios que se deben dar en el flujo de la planta y sus equipos para aumentar el tonelaje procesado, posterior a esto establecer algunas de las condiciones que debe cumplir el proceso para su expansión y cuáles son las etapas que deben ser intervenidas del proceso actual.

Se utilizan los valores que deben permanecer estables para el correcto funcionamiento del proceso posterior a la expansión de la capacidad productiva, de esta forma se definen los valores como constantes, dependiendo del lugar del proceso en el cual se deben tomar, claramente estos valores están cumpliendo con una incertidumbre asociada a las mediciones y a la heterogeneidad del proceso. Estos valores serán procesados a partir del valor promedio del valor encontrado por la base de datos generada en el Excel, las ecuaciones utilizadas para procesar estos valores son las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7.

Resultados y Análisis

Diagrama de flujo planta María Dama.

El flujo presente en la planta María Dama se encuentra en constantes cambios, ya que por lo general ocurren fallos mecánicos o eléctricos asociados a eventos aleatorios en los equipos, el flujo que aquí se menciona está sujeto a la disposición de la planta María Dama sin cambios por fallas. De acuerdo con la bibliografía consultada, se pueden identificar las etapas del flujo y relacionar la importancia de cada una para el proceso posterior.

Se identifican las líneas de flujo, que permite el movimiento de la materia prima a través de los diferentes procesos físicos y químicos, de igual forma la información que puede ser recolectada de cada etapa es muy amplia, por este motivo se consideran las implicaciones metalúrgicas que según la literatura y la experiencia en María Dama deben estar presentes en este tipo de estudios.

Diagrama de flujo etapa molienda presente en la planta Mará Dama.

La etapa de molienda es un proceso en el cual se da una reducción de tamaño de partícula a través de un molino giratorio con cuerpos moledores, este molino, tiene la capacidad de procesar aproximadamente 2000 TPD. El alimento del molino es dado por medio de la banda #12, al salir por el trómel la materia prima es llevada a través de una bomba centrífuga (Warman), hasta la olla de los hidrociclones principales, los cuales se encargan de realizar un proceso de selección de tamaño de partículas, el flujo del bajo flujo (under flow) el tamaño de partícula más grueso y el flujo del sobre flujo (over flow) el tamaño de partículas más fino, este último sale del proceso para alimentar la flotación, el bajo flujo (under flow) se divide en; 3 hidrociclones que alimentan una criba vibratoria, en la cual el retenido es llevado de nuevo al proceso de molienda y el pasante alimenta el concentrador gravimétrico Knelson, el concentrado obtenido en esta etapa es almacenado en una tolva de almacenamiento para ser procesado por la acción de la mesa GEMINI, en la cual se obtiene un concentrado de alta ley, pero debe ser atacado con ácido nítrico para extraer

la mayor cantidad de impurezas posibles para su posterior fundición; 2 hidrociclones que recirculan al molino, llamado carga de recirculación.

Cada flujo implicado tiene condiciones distintas para las densidades, también, se tiene un alimento con una granulometría variable, además, se realizan distintos procesos de separación para las partículas. Esto tiene implicaciones en los balances de masa realizados en este documento, pero estas densidades y flujos en la parte operativa son ajustables tras el control del alimento de agua a todo el procesamiento.

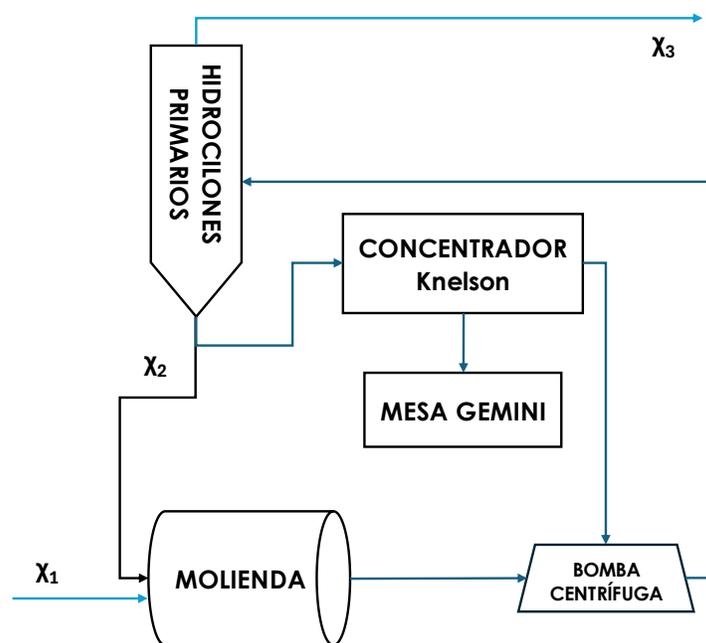


Figura 5. Diagrama de flujo proceso de molienda en María Dama.

Diagrama de flujo etapa de flotación presente en la planta María Dama.

El sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales es el alimento de la etapa de flotación, pero antes de alimentar esta etapa, es llevado a una criba vibratoria donde se extraen las impurezas, la pulpa pasante es llevada a la primer etapa llamada etapa Rougher (Celda Circular 0), en esta etapa se da un arrastre de partículas, donde la pulpa cede una gran cantidad de minerales valiosos en forma de espuma, la espuma es desbordada de la celda y pasa a la segunda celda, la etapa Cleaner

(DUO #4), donde se eliminan las impurezas y además se puede sostener un nivel de pulpa bajo. La pulpa de la etapa Rougher es llevada a la etapa Scavenger (DUO #1 – DUO #2 – DUO #3), en las celdas de flotación de esta etapa al tener poco mineral valioso para sostener una espuma profunda, la pulpa casi desborda el labio de la celda.

Es importante mencionar que la actividad de flotación de un mineral está determinada por el rango promedio del tamaño y la forma de las partículas, para el caso del rango del tamaño la flotación disminuye hacia el rango de partícula fina ($< 10\mu\text{m}$), principalmente debido al aumento de partículas por unidad de peso y a las condiciones de deterioro para el contacto burbuja-partícula, el material flotado está compuesto por una fracción flotante en el rango de tamaño mediano y una fracción más reacia que comprende material grueso no liberado y finos [28]. Según esto un proceso de molienda óptimo permite una flotación máxima, aunque en los procesos industriales determinar un rango y sostenerlo es económicamente poco viable, por la cantidad de materia prima allí procesado.

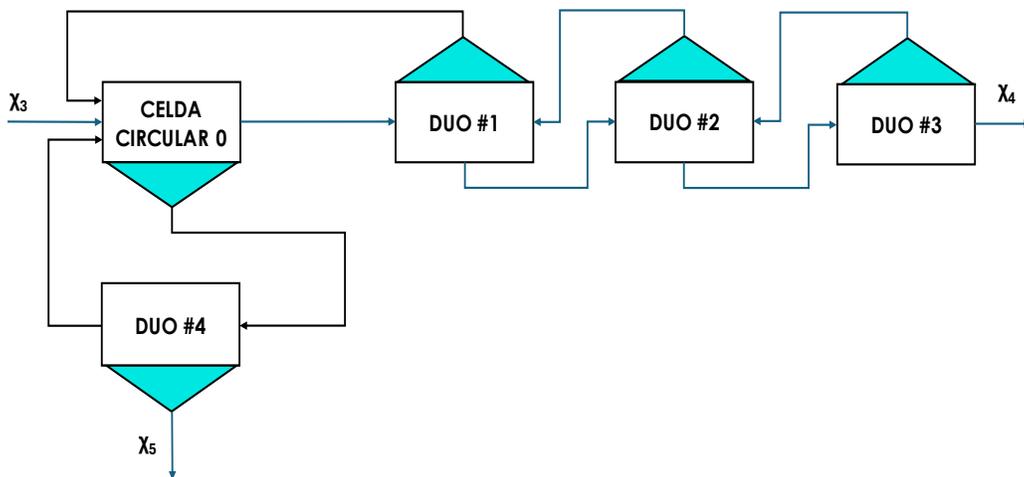


Figura 6. Diagrama de flujo proceso de flotación en María Dama.

Diagrama de flujo etapa de lixiviación presente en la planta María Dama.

Como ya se ha mencionado la lixiviación es un proceso en el cual se busca un ambiente químico que permita que los metales preciosos sean disueltos, para este proceso se deben cumplir ciertas condiciones; el oro y la plata deben estar en forma de partículas discretas y limpias, sin impurezas que puedan inhibir la reacción; debe permitirse una adecuada aireación ya que el oxígeno es fundamental en el proceso; el pH debe ser mayor a 10 menor a 12, para evitar la pérdida de cianuro por hidrólisis.

El flujo encontrado está bajo el margen de estas condiciones para la lixiviación, el concentrado resultante de la flotación es llevado al espesador #2, en el cual se extrae la mayor cantidad de agua posible, el concentrado es llevado junto a un flujo de una solución acuosa de cianuro de sodio a remolienda para disminuir al tamaño de partícula de forma que estas sean discretas y limpias, estas partículas son separadas por la acción de un hidrociclón secundario, cumpliendo la función de seleccionar el tamaño de las partículas adecuadas para la lixiviación (p_{80} malla 400), las partículas que son arrastradas por el bajo flujo (under flow) son llevadas a remolienda hasta cumplir el tamaño esperado menor a $37 \mu\text{m}$.

El sobre flujo (over flow) es llevado al tanque de activación, allí el proceso de lixiviación se da de forma más directa ya que la adición de cianuro es más abundante, en esta etapa, la pulpa resultante en el activador es llevada al espesador #6, en este se disuelve la mayor cantidad de oro y plata, por este motivo el espesador #6 es el encargado de alimentar la “piscina rica”, allí se almacena toda la solución rica en los iones $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$ y $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$. La pulpa resultante del espesador #6 es llevada a un tanque de agitación, donde se añade más cianuro, oxígeno y cinética. Este proceso de agitar y espesar es realizado tres veces, donde todas son consecuencias del proceso anterior, por último, la pulpa final es llevada a la planta de polimetálicos, encargada de realizar por medio de flotación la recuperación de Pb y Zn.

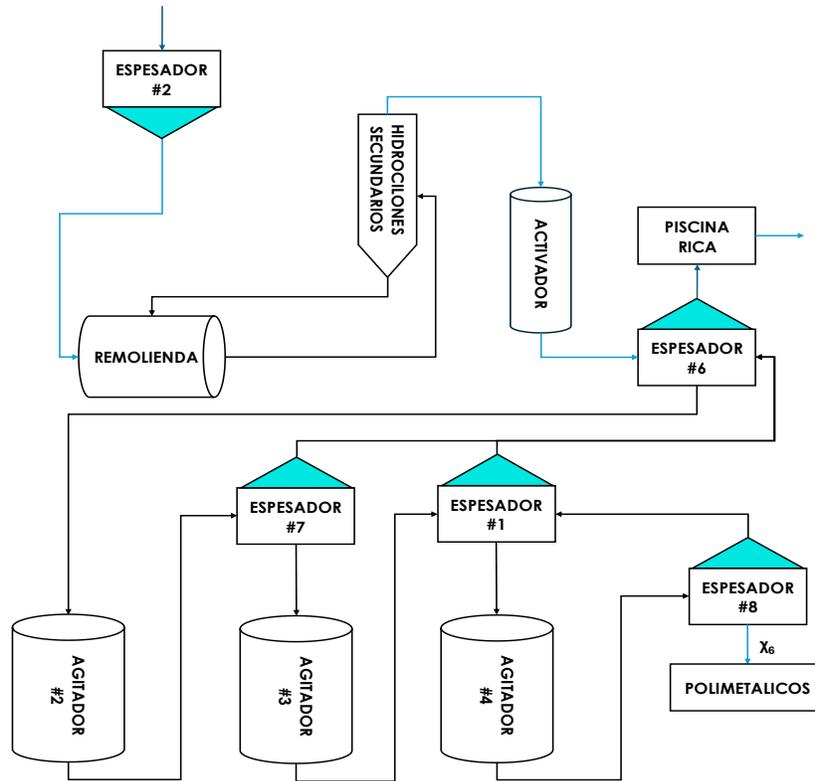


Figura 7. Diagrama de flujo proceso de lixiviación en María Dama.

Diagrama de flujo en el proceso Merrill Crowe presente en la planta María Dama.

El proceso Merrill Crowe es un método de recuperación de los metales preciosos lixiviados con cianuro (Au y Ag), se utiliza la solución enriquecida en oro y plata que proviene del proceso de lixiviación, en esta etapa a la solución rica es filtrada, ya que aún tiene partículas dispersas (sólidos suspendidos), el filtrado se realiza en la etapa de clarificación, esta zona tiene una serie filtros cubiertos con tela y aluminato tricálcico, permitiendo que la solución rica (en oro y plata) sea filtrada que esta pueda interactuar de forma directa con el cinc en polvo y el acetato de plomo, de esta forma precipitar oro y plata.

En este proceso es necesario extraer el oxígeno, se utiliza una torre de desoxigenación (vacío), la cual permite extraer todo el oxígeno disperso en la solución y realiza el acondicionamiento final para precipitar los metales preciosos disueltos. El flujo de la solución sin oxígeno se pone en contacto con polvo de zinc y acetato de plomo, que mediante un proceso redox, el Zinc pasa a la

solución oxidándose, entregando electrones que son captados por los átomos de oro o plata, que se encuentran en estado de catión con una carga positiva (Au^+), el que se reduce sobre la partícula de Zinc. Todo el precipitado es recuperado siendo filtrado y posterior al proceso de filtrado, se cosecha toda la carga retenida, se almacena el material precipitado para el día de la fundición del precipitado seco, cuando se tiene la carga suficiente es llevada al horno para ser fundido, de esta forma obtener el doré, lo que no es otra cosa que una aleación de oro, plata, cobre y zinc.

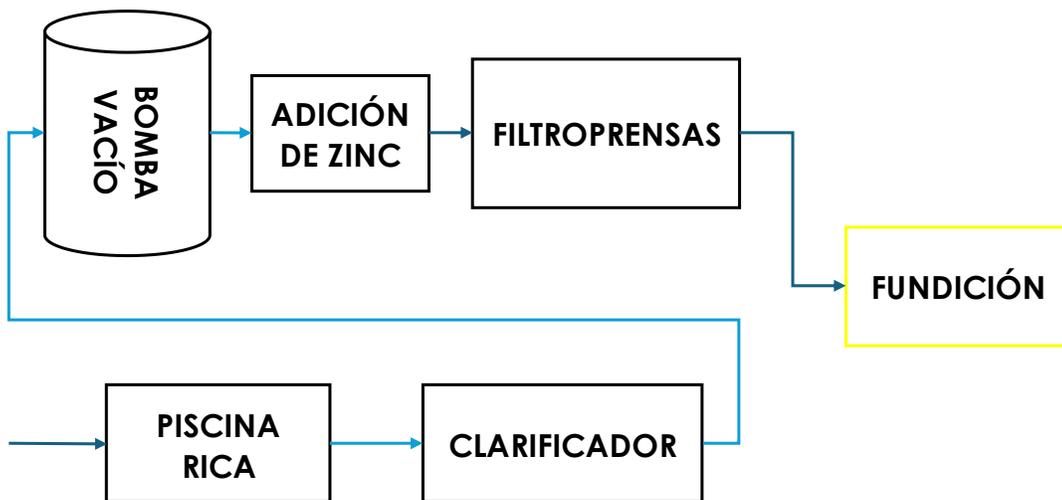


Figura 8. Diagrama de flujo proceso Merrill Crowe en María Dama.

Balances de masa en los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe.

Es importante mencionar que las horas efectivas en la planta María Dama es de 94%, esto es importante por las implicaciones que tiene en el tonelaje alimentado al molino. Se implementó la herramienta Excel para organizar el flujo de la pulpa obtenido en las etapas estudiadas molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe. Se obtuvo los datos necesarios de dos fuentes; la primera fuente es la planta, en la cual están dispuestas balanzas para determinar el porcentaje de sólidos y la densidad de la pulpa, a partir del valor de la gravedad específica de los sólidos presentes en el flujo; la segunda es a través del sistema SCADA MD, un sistema basado en el análisis de datos en tiempo real, por medio de sensores como pesómetros, flujómetros y densímetros, permite tener una

idea general de las condiciones a las que opera la planta, estos sensores están ubicados estratégicamente a través de todo el flujo de pulpa en la planta María Dama.

Como cada etapa del proceso de beneficio tiene sus consideraciones de operación, inicialmente se realiza el balance de masa individualmente y luego se unen todas las etapas para obtener el balance de masa global, esto con la intención de simular el proceso al aumentar la capacidad de procesamiento de 2000 a 3000 TPD, utilizando las siguientes ecuaciones:

$$\%S = \frac{G.E * (\delta - 1)}{\delta * (G.E - 1)} * 100$$

Ecuación 3. Porcentaje de sólidos en función de la gravedad específica ($G.E$) y la densidad (δ) de los minerales.

$$\%S = \frac{M_s}{M_p} * 100$$

Ecuación 4. Porcentaje de sólidos en función de la masa seca (M_s) y la masa de la pulpa (M_p).

$$Q = \frac{V}{t}$$

Ecuación 5. Flujo de la pulpa en función del volumen (V) y del tiempo (t).

$$\%CC = \frac{M_{seca\ over\ flow}}{M_{seca\ under\ flow}} * 100$$

Ecuación 6. Porcentaje de carga circulante en función de la masa seca del sobre flujo (over flow) y la masa seca del bajo flujo (under flow).

Para el tiempo de residencia es necesario emplear la ecuación de flujo y despejar el tiempo, obteniendo la siguiente ecuación.

$$t = \frac{V}{Q}$$

Ecuación 7. tiempo de residencia (t) en función de la capacidad de volumen del equipo (V) y el flujo de la pulpa (Q).

Además, para entender a mayor profundidad lo que implican estas ecuaciones y los datos que se obtienen de ellas, es necesario emplear la ley de conservación de la materia:

$$Masa_{entrada} = Masa_{salida}$$

Ecuación 8. Ley de la conservación de la materia.

A partir de esta ley se obtienen los balances globales de cada proceso estudiado, los elementos en la problemática de balance de masa abordados en la modelación matemática entienden; observar en el sistema seleccionado las corrientes de entrada y de salida; las variables de las corrientes que describen los flujos y composiciones de cada corriente; el sistema de obtención de los datos y las ecuaciones relacionadas; la base de cálculo seleccionada.

Balance de masa en el proceso de molienda.

Las fórmulas utilizadas para realizar el balance de masa en la etapa de molienda son encontradas en la literatura y, relacionando el proceso con las variables necesarias para efectuar los cálculos se realiza el muestreo necesario para determinar cada parámetro.

Datos requeridos para el balance de masa:

Peso alimentación del molino	Densidad alimento HC principales
Gravedad especifica	Densidad sobre flujo HC principales
Flujo de alimento HC principales	Densidad bajo flujo HC principales

Tabla 1. Datos obtenidos para balance de masa en molienda

A partir de los valores obtenidos, se realizan los cálculos respectivos para determinar el porcentaje de sólidos, el flujo del sobre flujo (over flow) [m³/h], el flujo del bajo flujo (under flow) [m³/h].

Los cálculos se realizan a partir de la recopilación sistémica de los datos de la tabla 1, estos datos se obtienen realizando las mediciones bajo diferentes condiciones de operación, esto se ve reflejado en la variación de los datos y en generar una base de datos, con el fin de que estas variaciones puedan hacer parte de la globalidad de los datos y, además generar una base de datos con las variaciones del sistema. La desviación estándar es utilizada para encapsular el proceso en valores que se parezcan a la realidad de planta, por este motivo es importante que, a partir de la expansión en la capacidad de procesamiento sea necesario utilizar los diferentes canales de análisis para tener un control en el sistema.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 2.

Gravedad especifica	2,7
Alimentación del molino	95 [ton/h]
Densidad alimento HC principales	1,62 [ton/m3]
Densidad sobre flujo HC principales	1,34 [ton/m3]
Densidad bajo flujo HC principales	2,07 [ton/m3]
Flujo alimento HC principales	320,06 [m3/h]
Flujo sobre flujo HC principales	167,7 [m3/h]
Flujo bajo flujo HC principales	149 [m3/h]
% Carca de recirculación	280 %

Tabla 2. Resultados balance de masa molienda.

El balance de masa global en la etapa de molienda obedece según la ecuación 8, a la alimentación del molino (A_m) obtenida en la tabla 2, que es igual al flujo de masa seca del sobre flujo de los hidrociclones principales (SF_{HCP}) obtenido en la tabla 2, este flujo claramente es igual a la masa seca alimentada en el molino (A_m), además se sabe que en el bajo flujo se da el porcentaje carga de recirculación obtenido en la tabla 2.

$$A_m = SF_{HCP}$$

Ecuación 9. Balance de masa proceso de molienda.

Balance de masa en el proceso de flotación.

El balance de masa para la etapa de flotación está determinado por el tiempo de residencia en el cual la materia prima se encuentra bajo el efecto de arrastre como se observa en la figura 1, el tiempo de residencia se encuentra limitado bajo las variables del flujo de la materia prima y la capacidad de volumen de los equipos predispuestos en la planta María Dama.

Es importante mencionar que la etapa de flotación es alimentada por el flujo de salida del sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales, de esta forma para efecto del balance de masa se toma el flujo de salida del sobre flujo (over flow) del proceso de flotación calculado en el balance de molienda. Este balance se puede estudiar de forma correcta por el porcentaje de concentración másico, el cual puede decirse que es una constante en la flotación. El porcentaje de concentración másico nos permite analizar el flujo de entrada, el de salida y el de los concentrados, ya que es el porcentaje del flujo que se concentra.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 3.

Densidad sobre flujo HC principales	1,34 [ton/m3]
-------------------------------------	---------------

Densidad colas bulk	1,32 [ton/m ³]
Densidad concentrados	1,122 [ton/m ³]
Flujo sobre flujo HC principal	167,7 [m ³ /h]
Flujo colas celda dúo #3	160,5 [m ³ /h]
Flujo concentrado celda dúo #4	22,5 [m ³ /h]
Porcentaje de concentración masico	4,3%

Tabla 3. Resultados balance de masa flotación.

El balance de masa global en el proceso de flotación está determinado según la ecuación 8 por, el alimento seco principal que es la masa seca del sobre flujo de los hidrociclones principales (SF_{HCP}), en este proceso se tienen dos flujos de salida, los cuales están determinados por el porcentaje de concentración másico observado en la tabla 3, de esta forma el 4,3% del alimento al proceso de flotación se concentra en la etapa limpiadora (C_f), el 95,7% restante de la masa se encuentra en la etapa depuradora (B_f).

$$SF_{HCP} = C_f + B_f$$

Ecuación 10. Balance de masa global proceso de flotación.

Balance de masa en el proceso de lixiviación.

En la etapa de lixiviación se tiene como alimento el concentrado obtenido de la etapa limpiadora (cleaner celda dúo #4), este concentrado es almacenado y a partir de este comienza el flujo de alimento para todo el circuito de lixiviación, primero se tiene una carga de recirculación en la cual está implicado el hidrociclón secundario (simplex) y los molinos de remolienda, por medio del sistema SCADA MD, se toman los datos dados por los diferentes sensores allí ubicados, también las densidades y los flujos se toman en los puntos más importantes de esta etapa, las cuales son el alimento que proviene del espesador #2, el bajo flujo (under flow) y el sobre flujo (over flow) del hidrociclón secundario, y cada una de las entradas y salidas de los espesadores y agitadores. Es importante mencionar que la gravedad específica en esta etapa es de 3,8.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 4.

Densidad espesador #2	1,917 [ton/m3]
Densidad sobre flujo HC secundario	1,244 [ton/m3]
Densidad bajo flujo HC secundario	2,842 [ton/m3]
Densidad espesador #6	2,037 [ton/m3]
Densidad agitador #2	1,068 [ton/m3]
Densidad espesador #7	1,899 [ton/m3]
Densidad agitador #3	1,295 [ton/m3]
Densidad espesador #1	1,855 [ton/m3]
Densidad agitador #4	1,286 [ton/m3]
Densidad espesador #8	1,8 [ton/m3]

Tabla 4. Resultados obtenidos para las densidades en la etapa de lixiviación.

El sobre flujo (over flow) del hidrociclón secundario es alimento principal del circuito de lixiviación, su flujo alimenta directamente el espesador # 6 el cual tiene dos líneas de flujo; alimenta la piscina rica; alimenta el agitador # 2.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 5.

Flujo espesador #2	3,93 [m3/h]
Flujo sobre flujo HC secundario	13,17 [m3/h]
Flujo bajo flujo HC secundario	4,5 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #6	2,43 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #6	29,8 [m3/h]
Flujo agitador #2	7,2 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #7	3,4 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #7	5,8 [m3/h]
Flujo agitador #3	10,35 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #1	3,15 [m3/h]

Flujo solución rica espesador #1	13,8 [m3/h]
Flujo agitador #4	10,61 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #8	3,9 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #8	7,01 [m3/h]

Tabla 5. Resultados obtenidos de los flujos de pulpa en la etapa de lixiviación con cianuro.

El balance de masa global en el proceso de lixiviación está determinado por el flujo de masa seca del sobre flujo del hidrociclón secundario (SF_{HCS}), de esta forma al ser un proceso en el cual se da la disolución del oro y la plata, la pérdida de masa en este proceso no es evidente por este motivo el flujo del sobre flujo de masa seca del hidrociclón secundario es igual al flujo de masa seca de la pulpa del espesador # 8 (MS_{E8}).

$$SF_{HCS} = MS_{E8}$$

Ecuación 11. Balance de masa global proceso de lixiviación.

Balance de masa Merrill Crowe.

En la etapa Merrill Crowe el flujo obedece a una entrada y una salida, en la cual se debe mantener el control de estas; se debe favorecer el tiempo para extraer el oxígeno de la solución rica en la bomba de vacío; es importante permitir que se dé la interacción entre el acetato de plomo y el polvo de zinc con la solución rica. Por estos motivos el volumen es un factor considerado importante para obtener las condiciones que deben permanecer constantes para la posterior expansión.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 3.

Alimento piscina rica por día	662,8 [m3/día]
--------------------------------------	----------------

Tabla 6. Resultado obtenido para el proceso Merrill Crowe en el balance de masa.

El balance de masa global en el proceso Merrill Crowe está determinado por el flujo de solución rica en oro y plata que entra F_E al sistema Merrill Crowe y el flujo de solución pobre en oro y plata que sale del sistema Merrill Crowe F_S . La eficiencia de este método se rige por la cantidad de oro precipitado, de esta forma los resultados obtenidos aquí están limitados por la eficiencia del equipo de desoxigenación y la dosificación de los reactivos. Según la ecuación 8, se tiene que en promedio se precipita 17 ppm (oro y plata), para un alimento de solución rica al día de 662,8 [m³/día], se tendría 11267,6 [g/día].

$$F_E = F_S$$

Ecuación 12. Balance de masa global proceso Merrill Crowe.

Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.

Los puntos de caracterización son; X_1 banda de alimentación del molino (banda 12); X_2 bajo flujo (under flow) de los hidrociclones principales; X_3 sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales; X_4 colas de la etapa depuradora (scavenger) de flotación (bulk); X_5 concentrado de la etapa limpiadora (cleaner) de impurezas de flotación; X_6 sedimento espesador #8.

De esta forma son utilizadas las siguientes ecuaciones para realizar el cálculo de la circularidad y la redondez de las partículas minerales.

$$Circularidad = 4 * \pi * \frac{\text{Área}}{\text{Perímetro}^2}$$

Ecuación 8. Fórmula para circularidad de las partículas minerales.

$$Redondez = \frac{4 * \text{Área}}{\pi * D_{mayor}^2}$$

Ecuación 9. Formula redondez de las partículas minerales.

Banda alimentación al molino (Banda 12).

En la figura 9, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados de la Universidad de Antioquia, de la muestra tomada en la banda de alimentación del molino (banda #12).

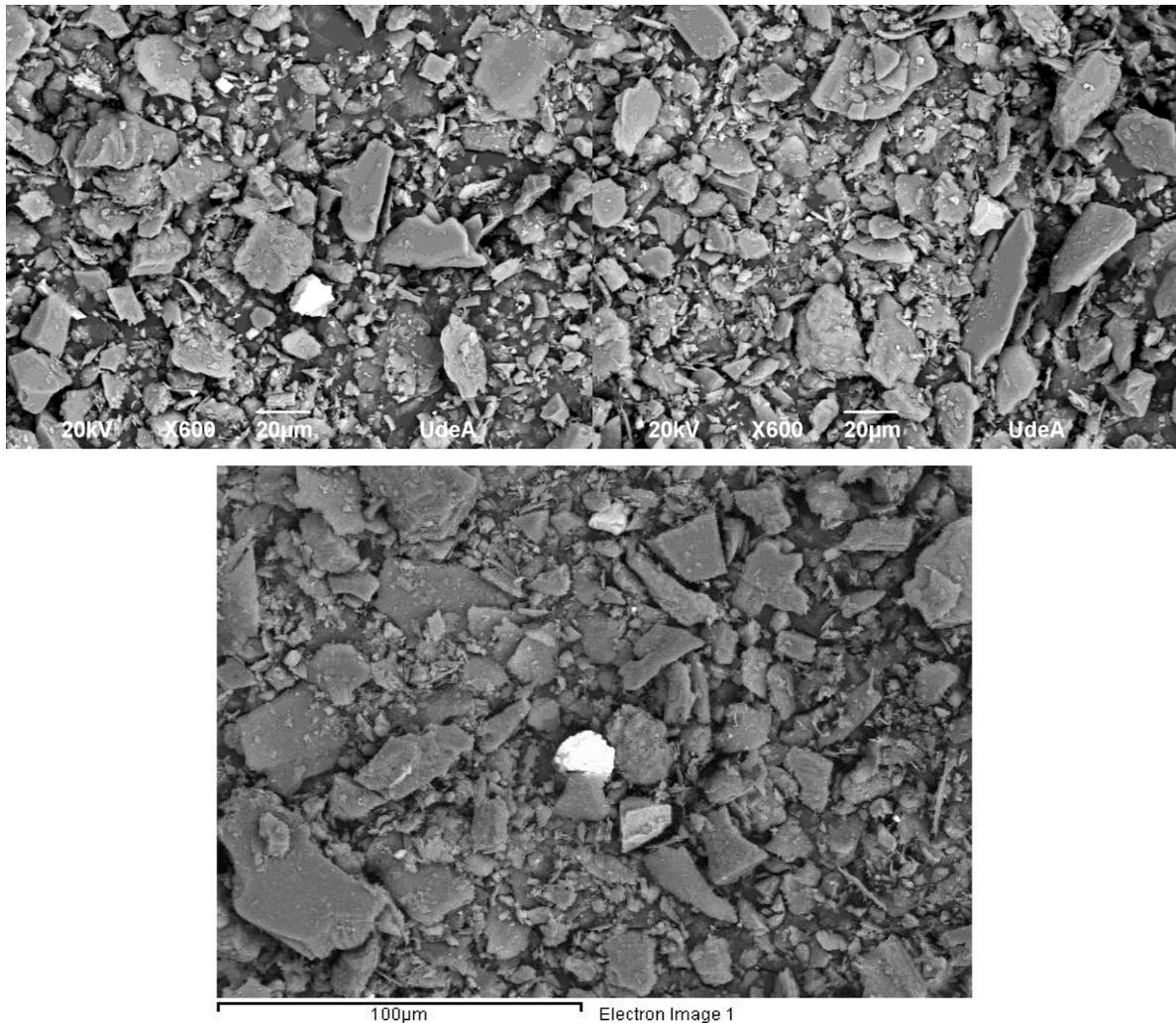


Figura 9. Imagen SEM banda alimentación del molino (banda #12).

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 10, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 9.

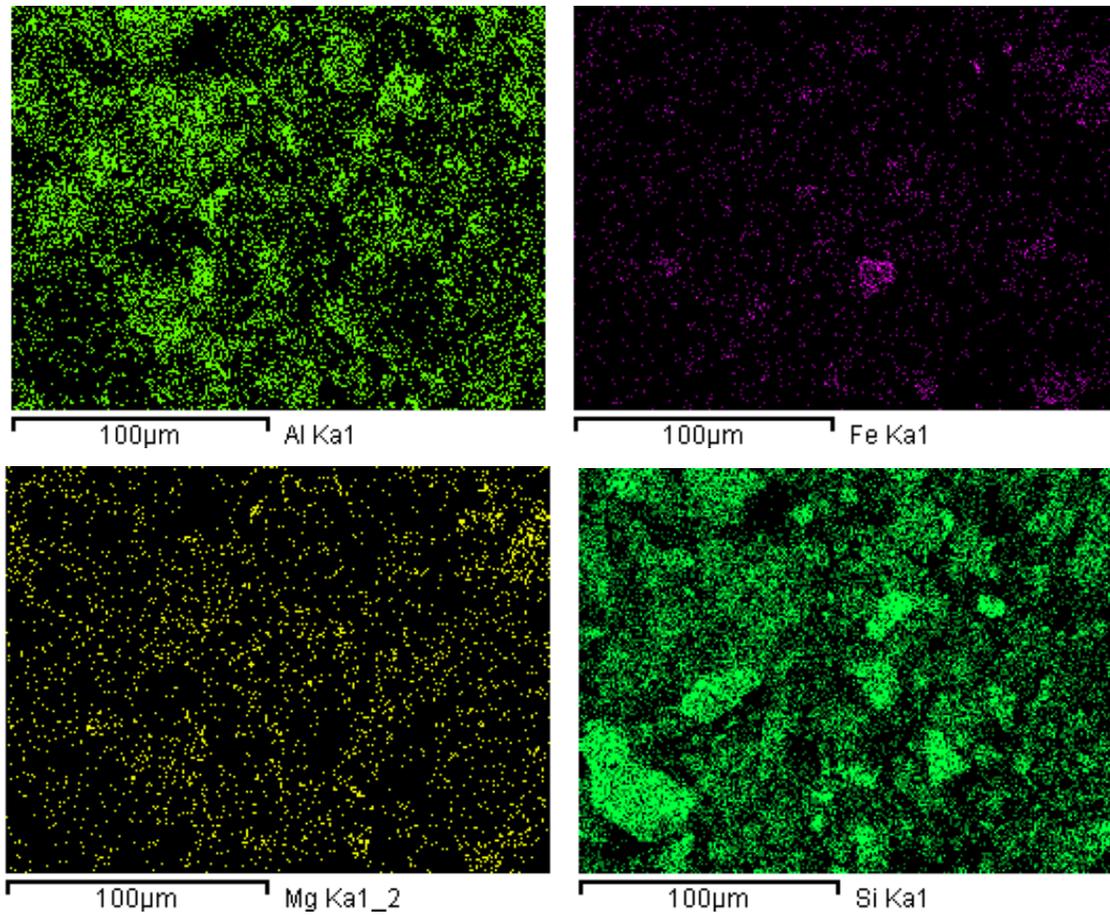


Figura 10. Mapeo elemental EDS Correspondiente a Electron image 1 en la figura 9.

Sobre flujo hidrociclones principales.

En la figura 11, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados, de la muestra tomada en el sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales.

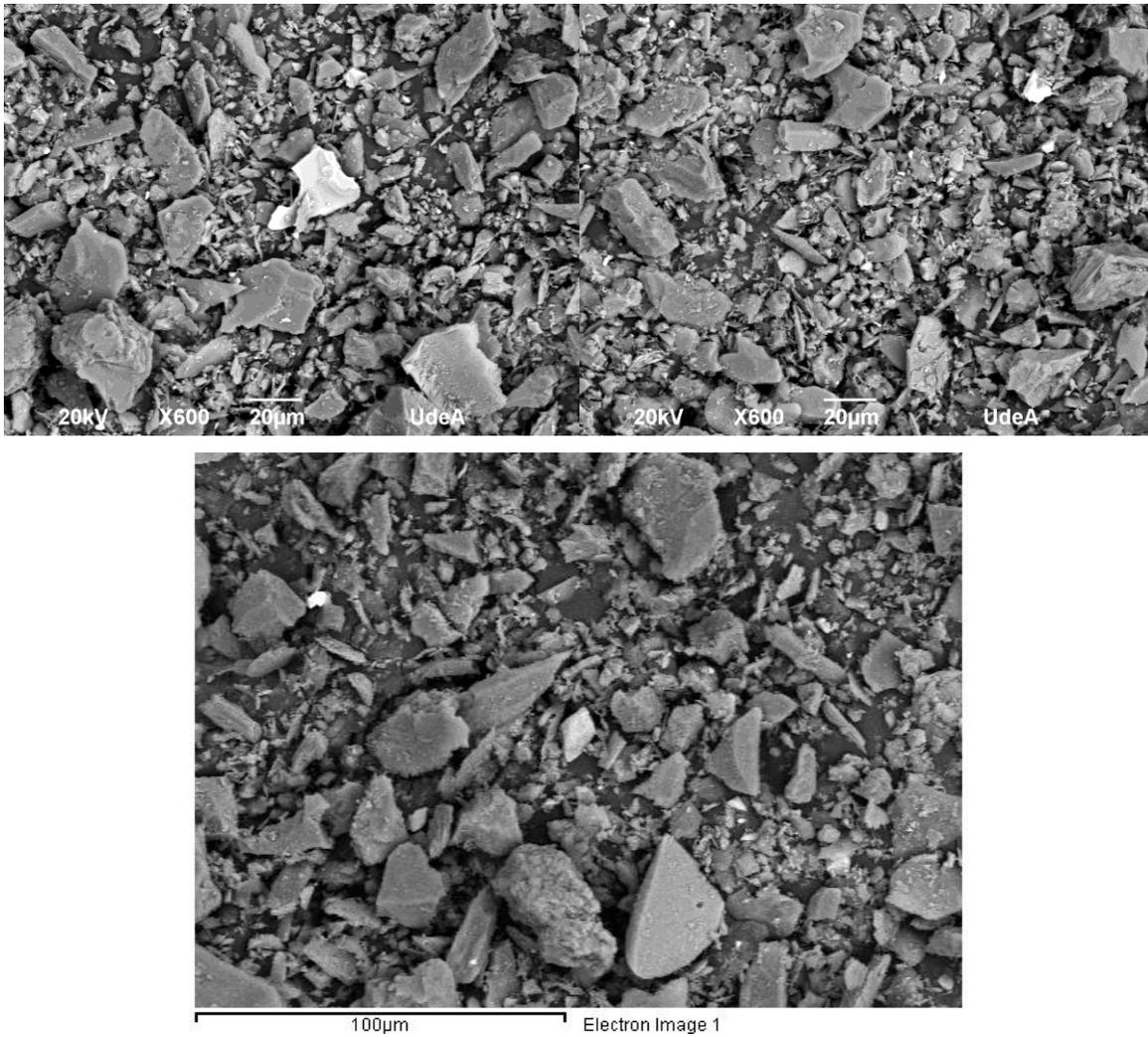


Figura 11. Imagen SEM sobre flujo hidrociclones principales.

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 12, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 11.

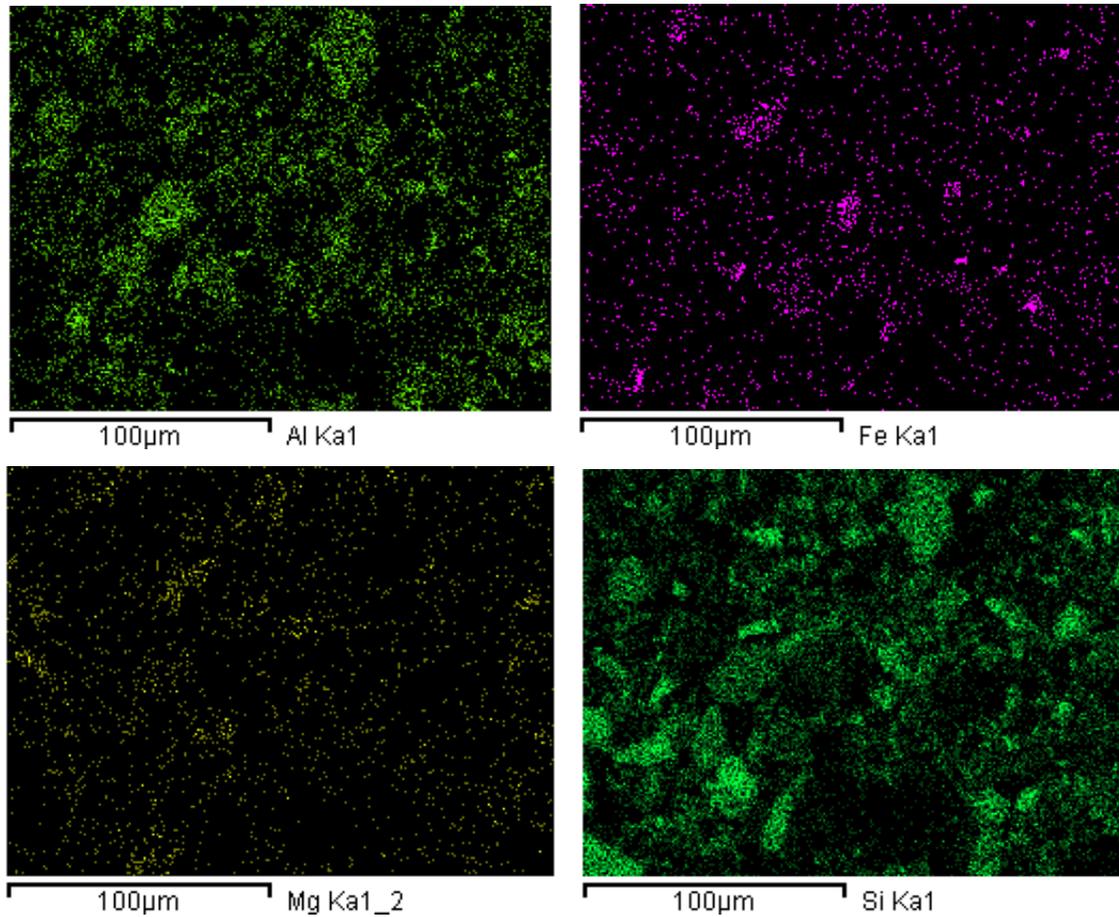


Figura 12. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 11.

Bajo flujo hidrociclones principales.

En la figura 13, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados, de la muestra tomada en el bajo flujo (under flow) de los hidrociclones principales.

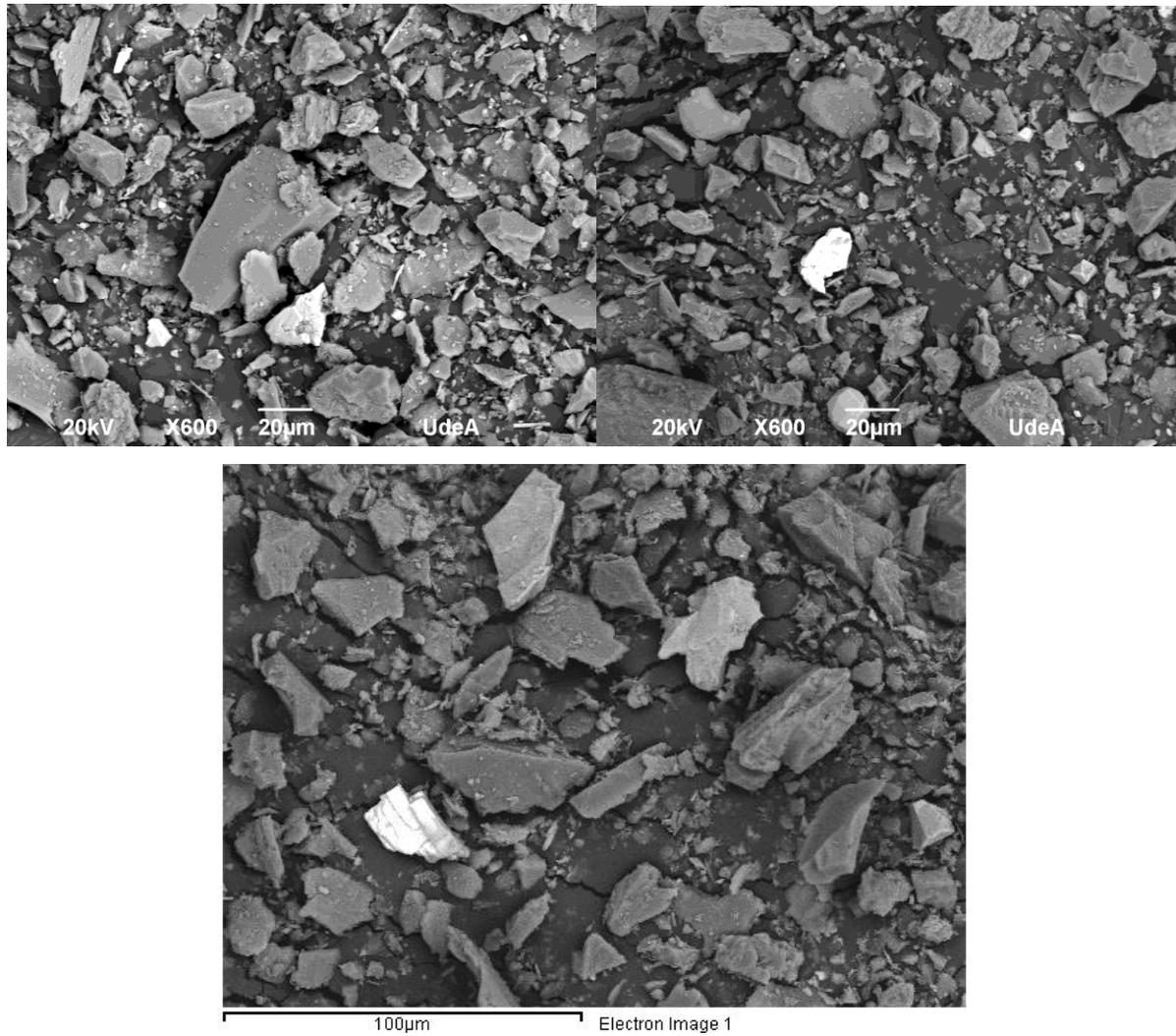


Figura 13. Imagen SEM bajo flujo hidrociclones principales.

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 14, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 13.

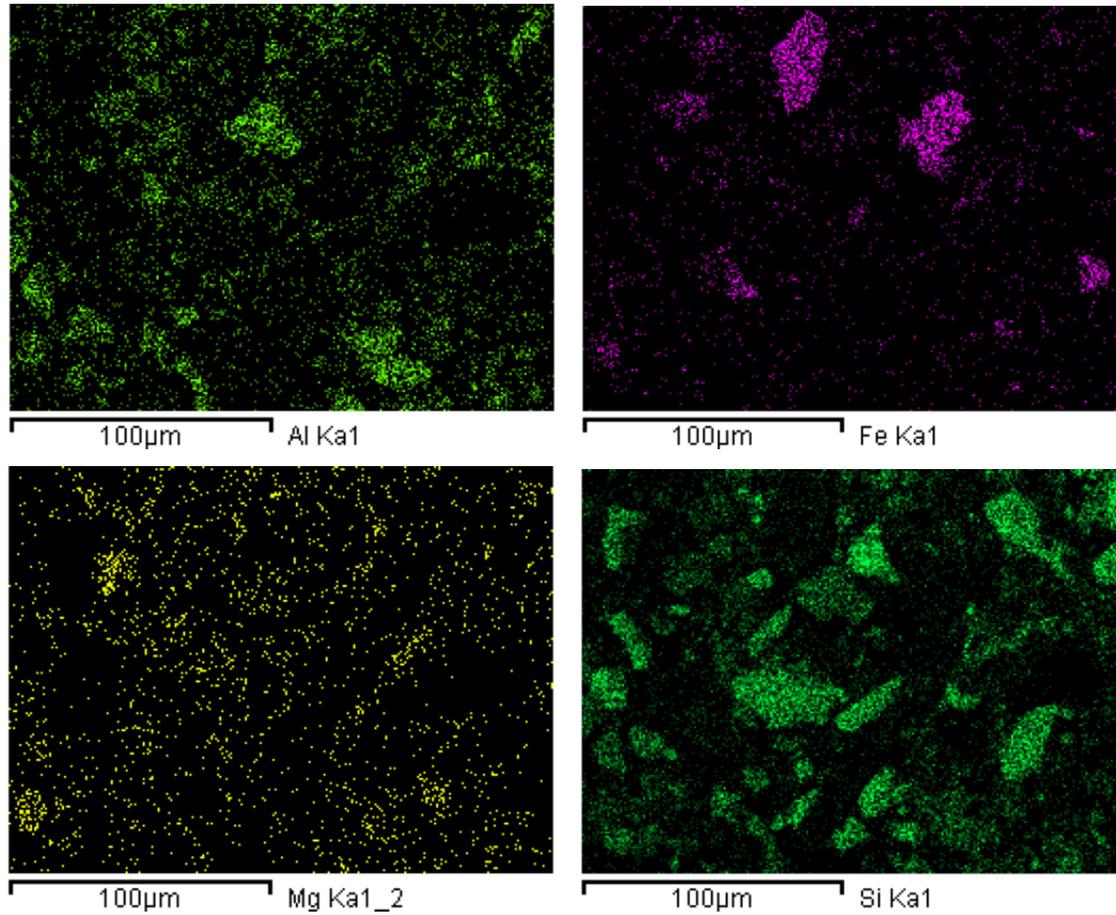


Figura 14. Mapeo elemental correspondiente a Electron image 1 en la figura 13.

Concentrado de la fase de limpieza (Cleaner) del proceso de flotación.

En la figura 15, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados, de la muestra tomada en el concentrado de la fase Cleaner del proceso de flotación.

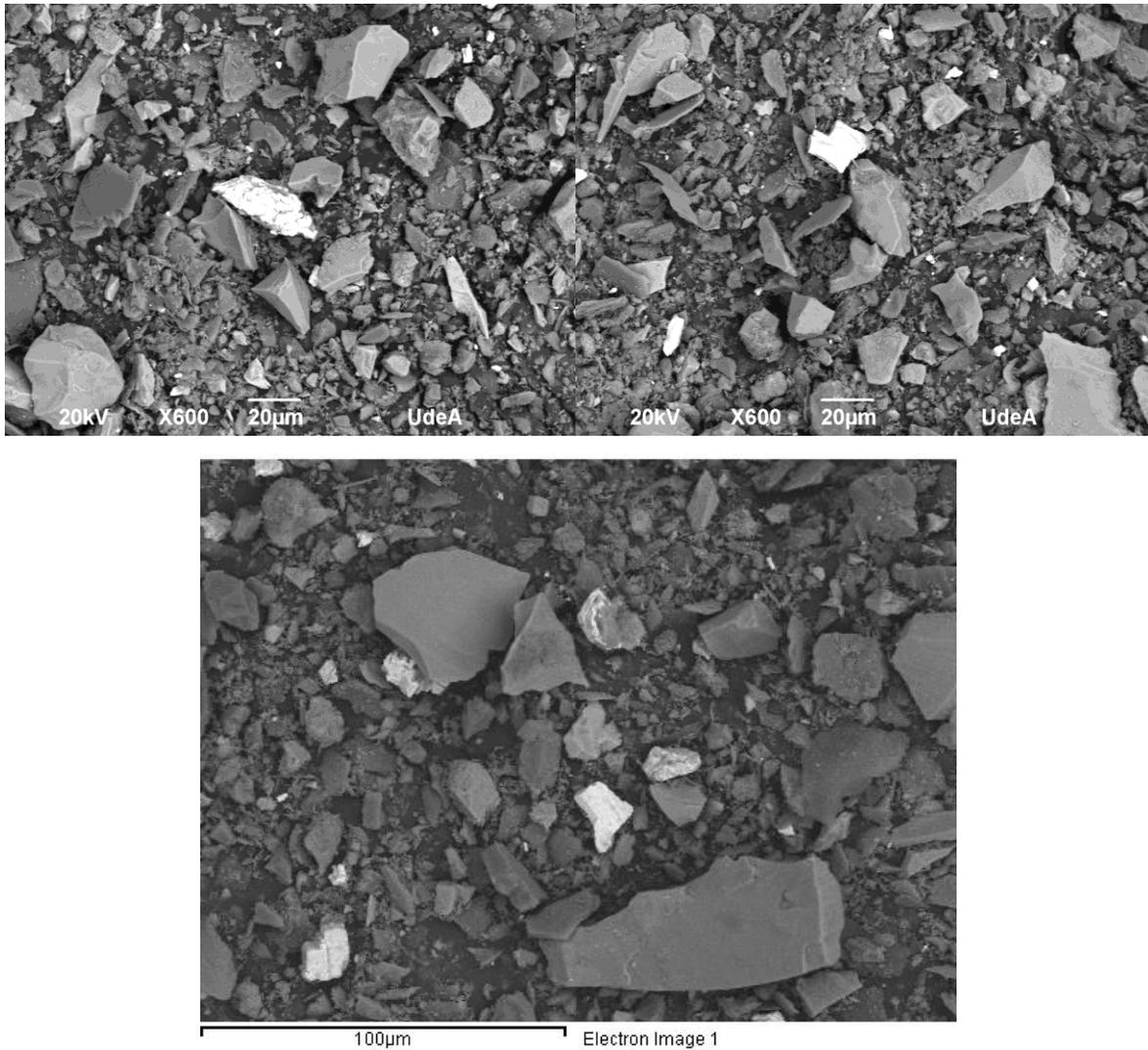


Figura 15. Imagen SEM concentrado proceso de flotación.

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 16, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 15.

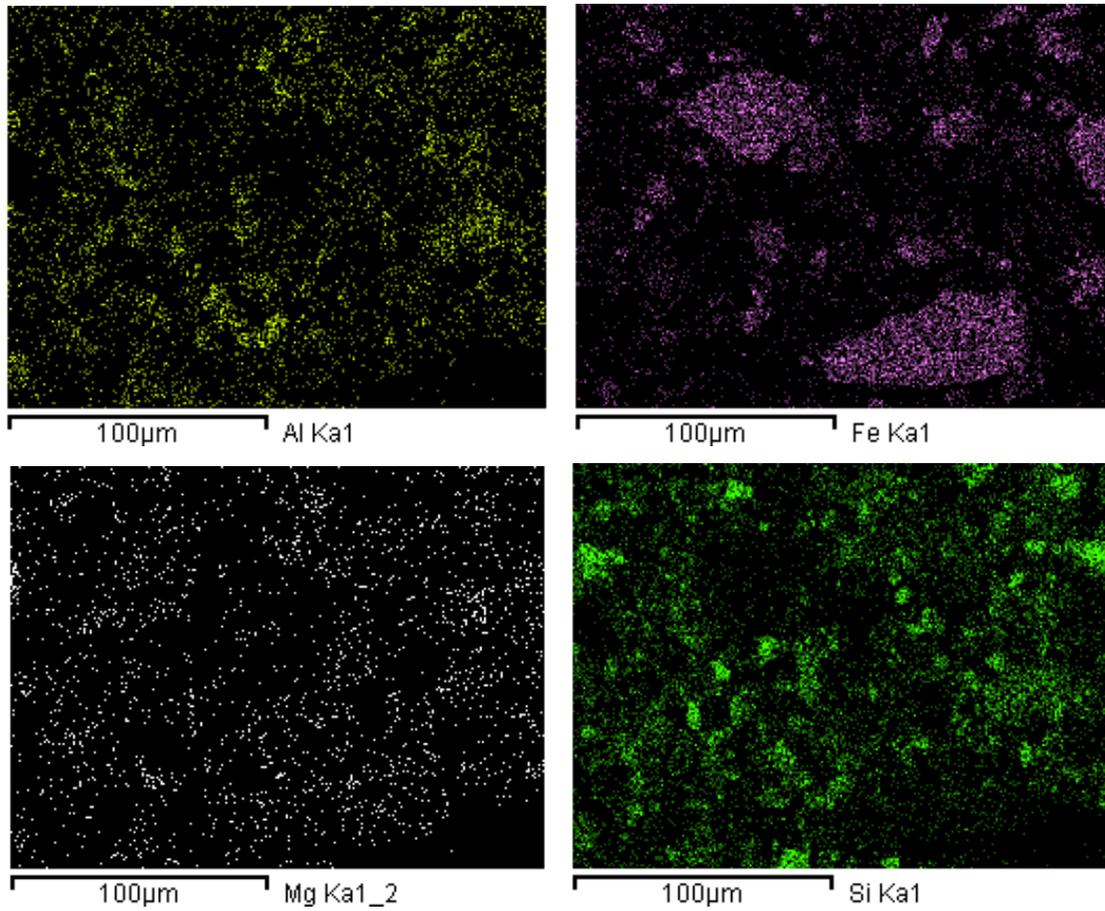


Figura 16. Mapeo elemental correspondiente a Electron image 1 en la figura 15.

Colas de la fase Scavenger del proceso de flotación (BULK).

En la figura 17, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados, de la muestra tomada en las colas de la fase Scavenger del proceso de flotación.

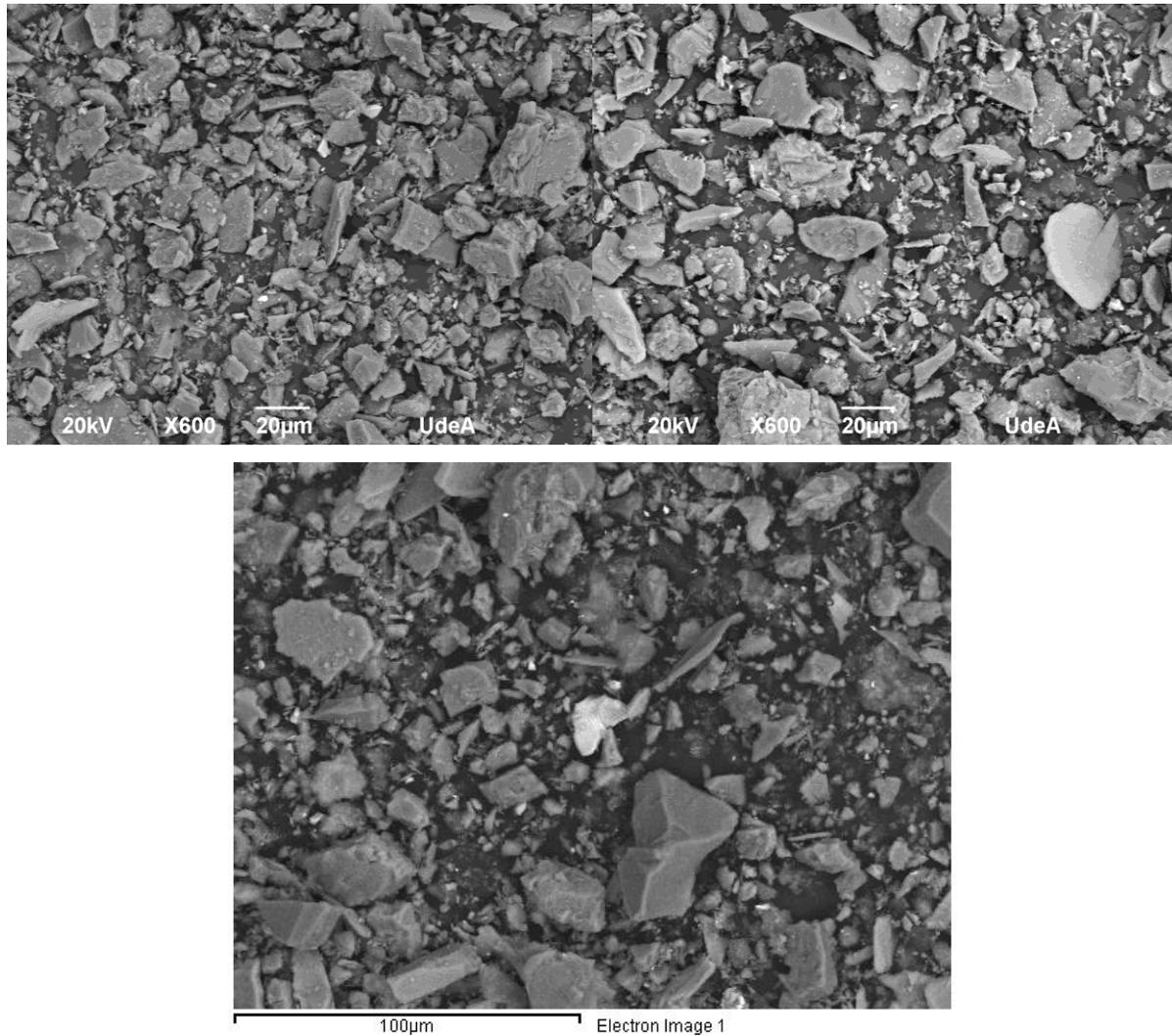


Figura 17. Imagen SEM colas de la fase Scavenger proceso de flotación.

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 18, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 17.

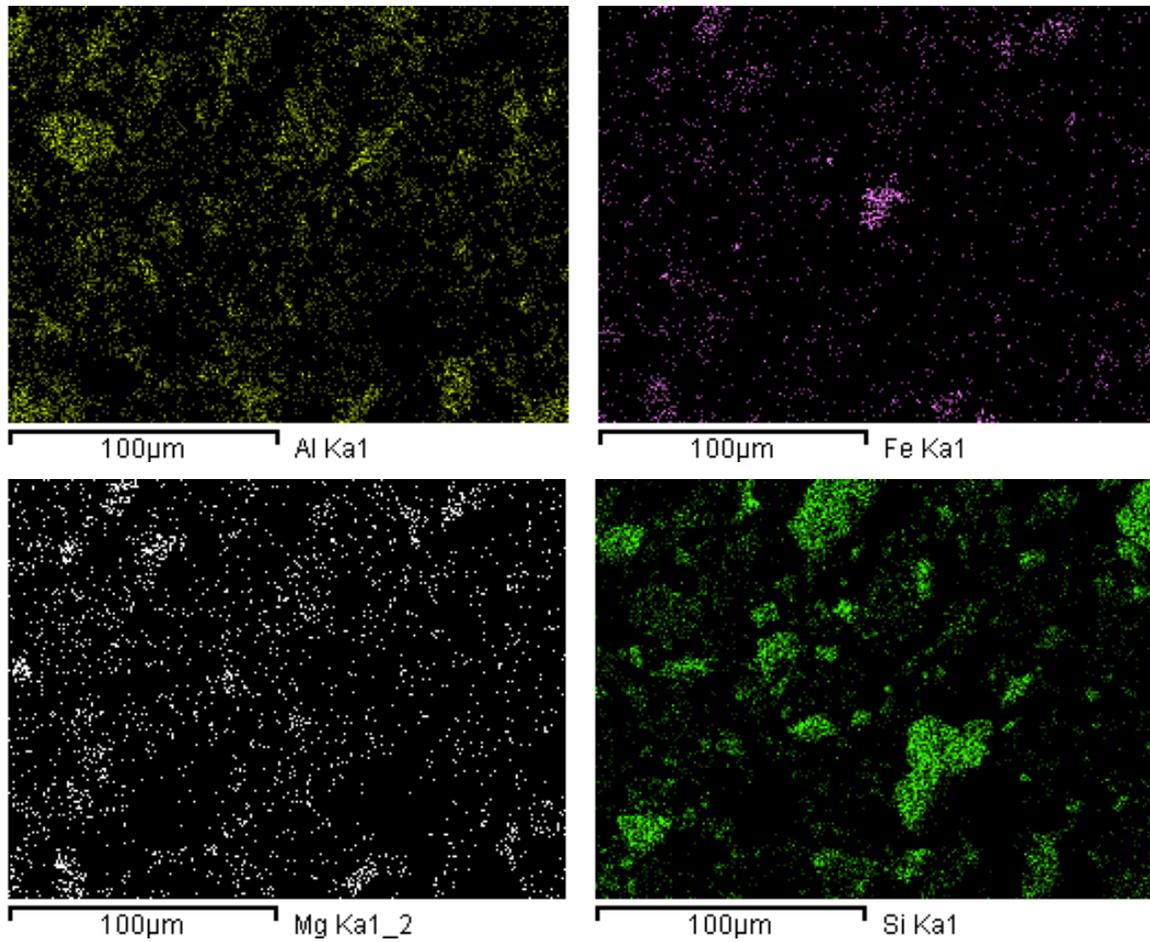


Figura 18. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 17.

Sedimento del espesor #8.

En la figura 19, se observa las imágenes tomadas por medio de la técnica SEM con electrones retro dispersados, de la muestra tomada en el espesor #6.

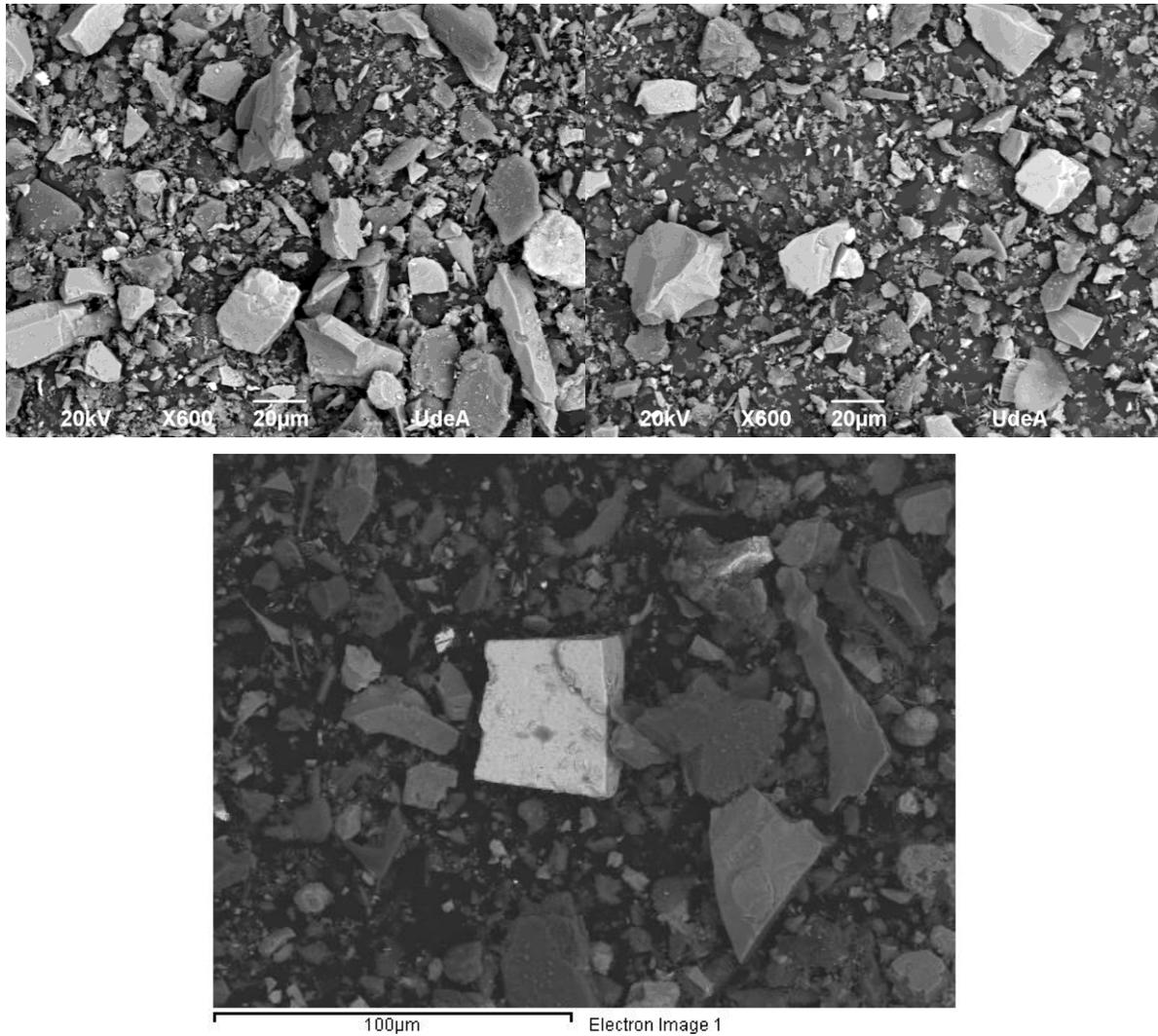


Figura 19. Imagen SEM sedimento espesador #8.

A través del detector EDS se realiza mapeo elemental, obteniendo los resultados vistos en la figura 20, donde se observa la composición elemental de la micrografía tomada en la figura 19.

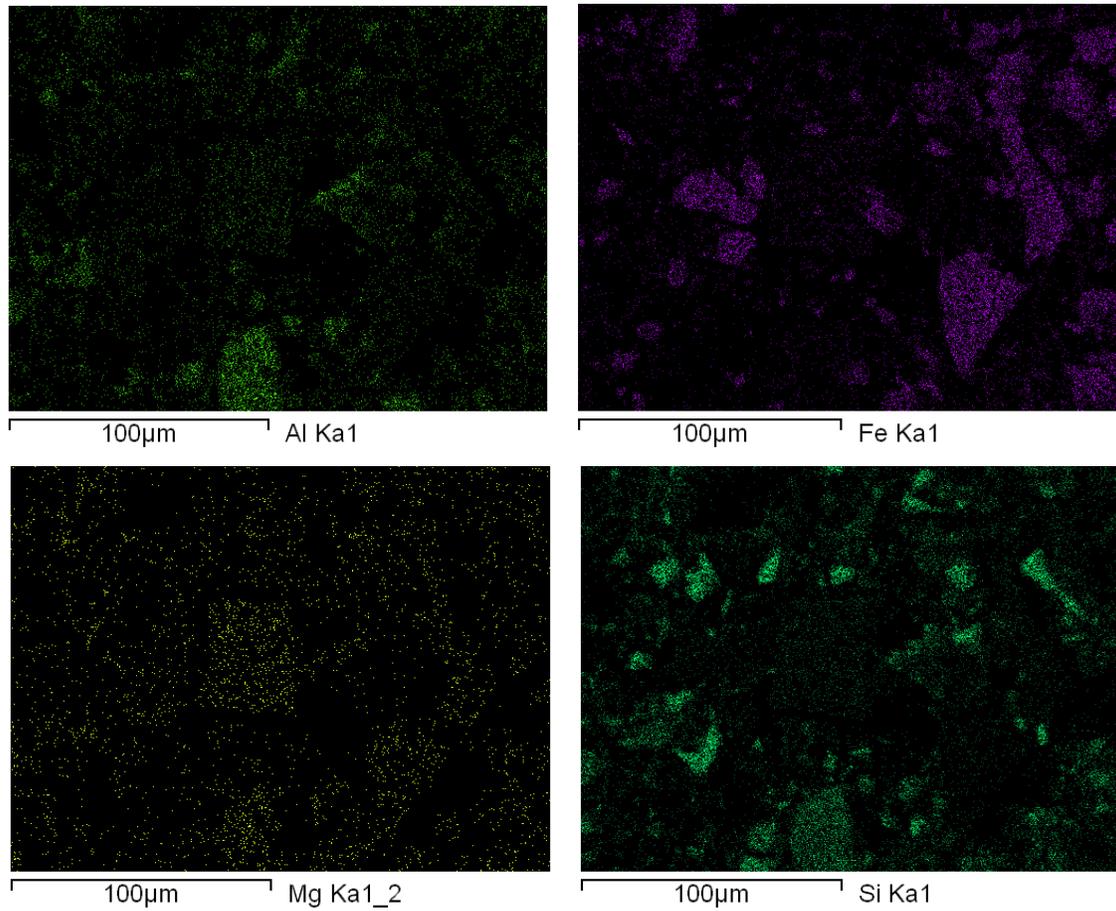


Figura 20. Mapeo elemental EDS correspondiente a Electron image 1 en la figura 19.

Análisis de forma por medio del software ImageJ.

Se realiza el análisis de las micrografías a través del software ImageJ, tomando los tres resultados obtenidos de cada muestra caracterizada, se analiza la circularidad y redondez promedio de las partículas por medio de las ecuaciones 8 y 9, obteniendo los siguientes resultados:

Ubicación de la muestra	Circularidad	Redondez
Banda #12	0,711	0,720
Bajo flujo HC principal	0,623	0,584
Sobre flujo HC principal	0,684	0,782
Colas flotación (Bulk)	0,675	0,652
Concentrado flotación	0,697	0,693
Espesador #8	0,747	0,757

Tabla 7. Valores promedio de la circularidad y redondez de las partículas de mineral obtenidos del análisis de las micrografías en ImageJ.

Dispersión de los datos obtenidos en el análisis de imagen.

Los datos son analizados por graficas por medio del software Excel, el cual permite un procesamiento de datos, el cual permite un mayor entendimiento de estos.

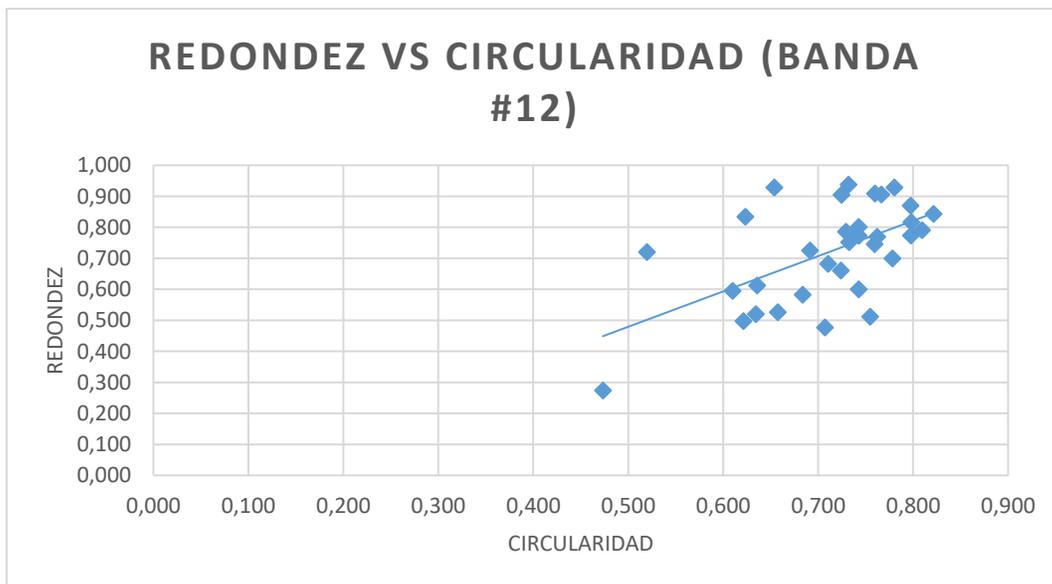


Gráfico 1. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos de la banda #12.

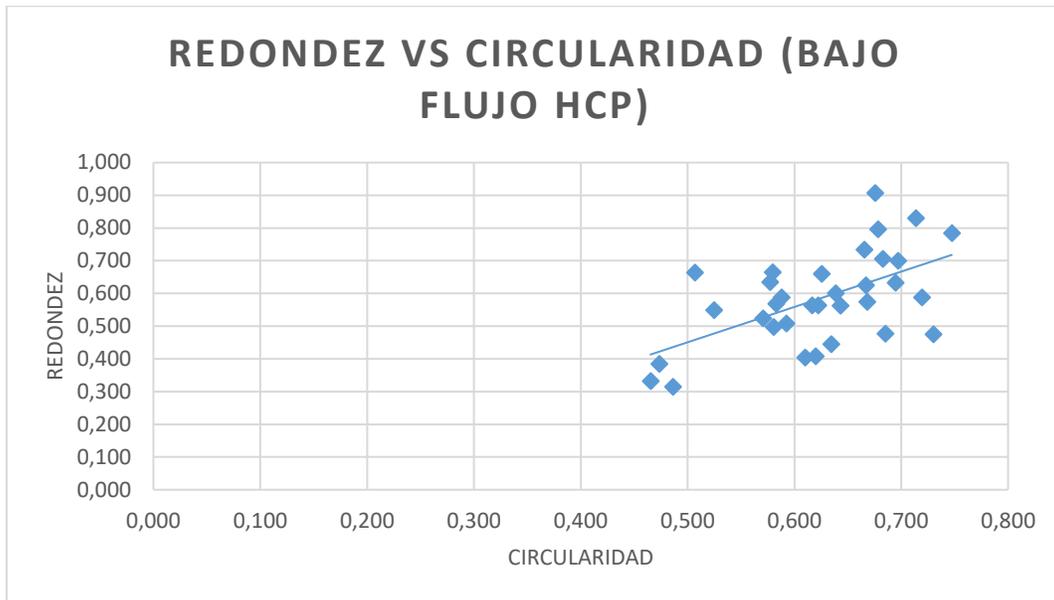


Gráfico 2. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del bajo flujo del HC principal.

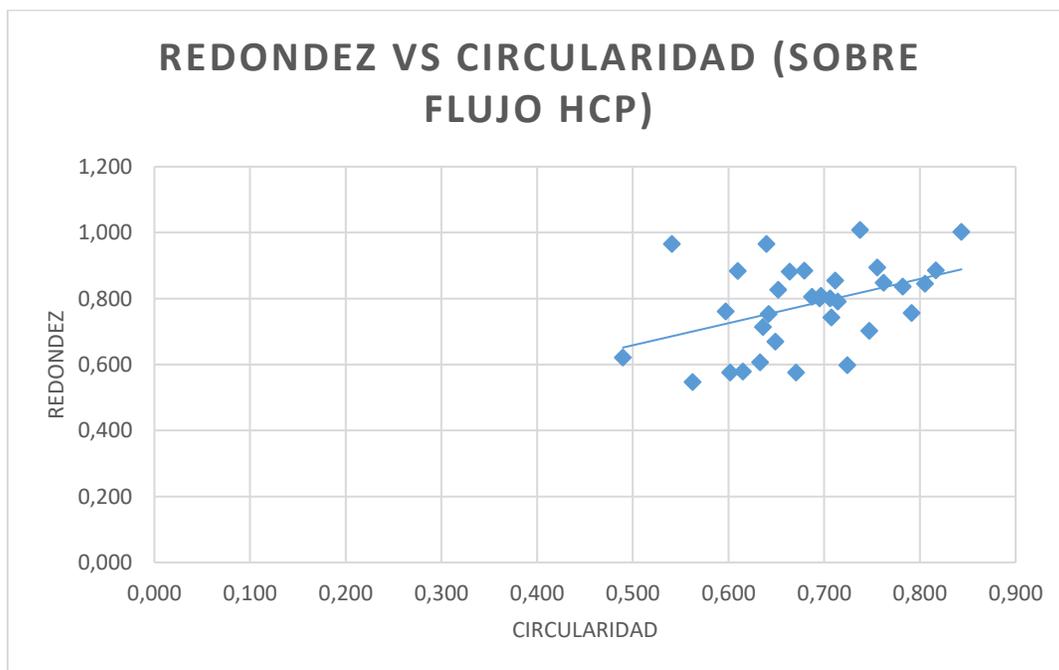


Gráfico 3. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del sobre flujo de los HC principales.

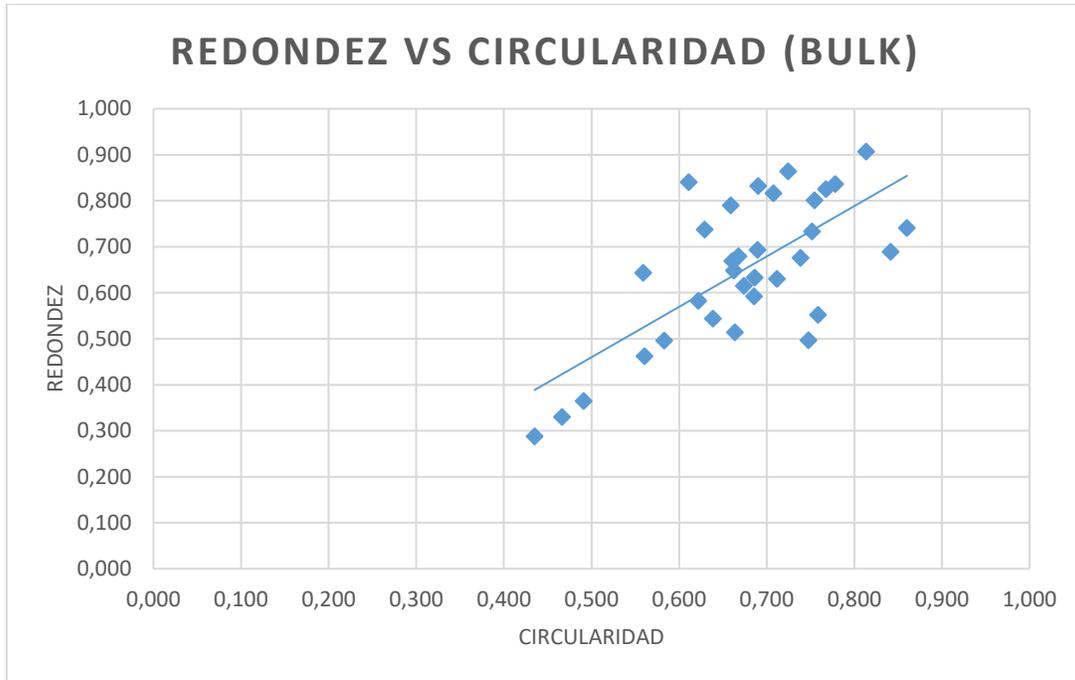


Gráfico 4. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos de las colas Bulk.

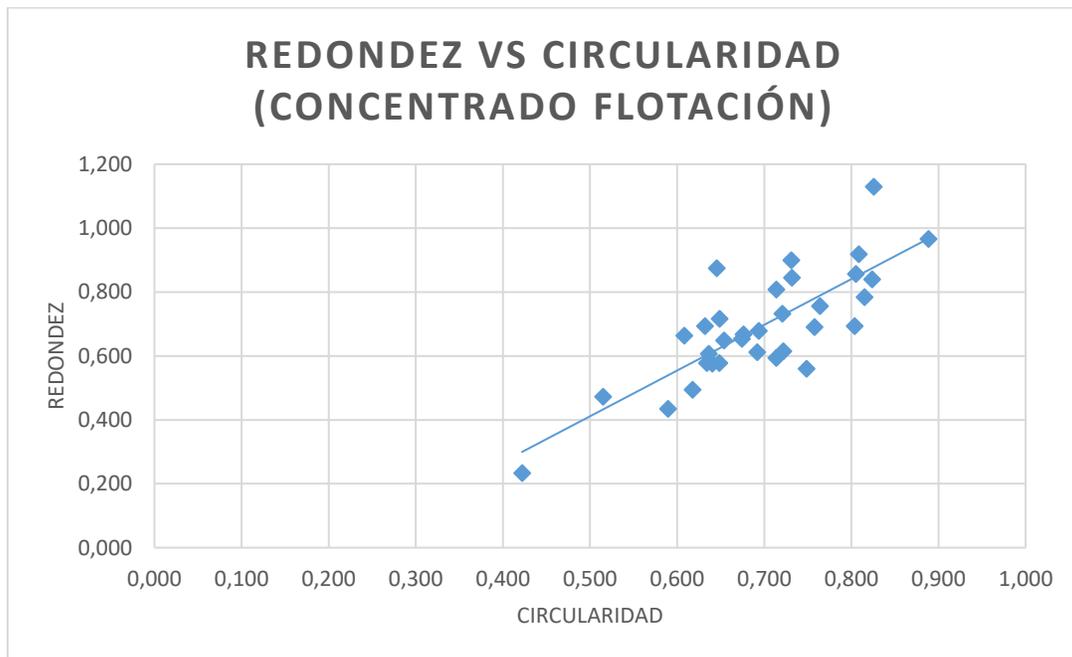


Gráfico 5. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del concentrado de flotación.

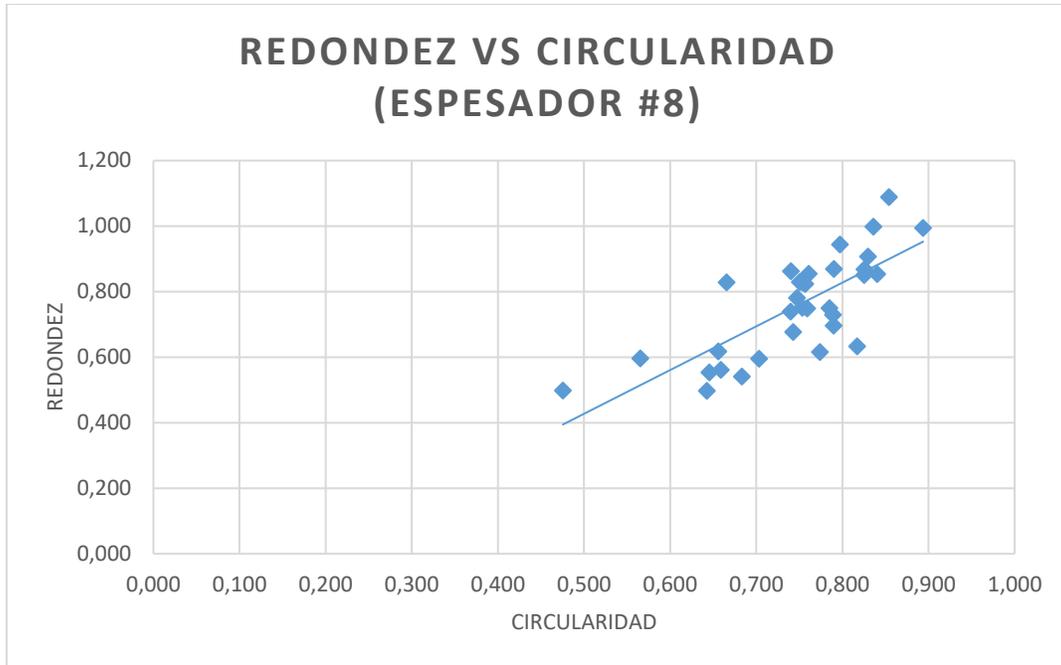


Gráfico 6. Análisis de la dispersión de los datos obtenidos del sedimento del espesador #8.

Caracterización cualitativa de las partículas pertenecientes al proceso de beneficio de oro en la planta María Dama.

Al momento de realizar la preparación de la muestra para este análisis, se requieren dos tipos de muestras para cada etapa del proceso, ya que, se caracteriza la ppm de Au y Ag en los polvos caracterizados por SEM, siendo para cada muestra pasante tamiz malla 400 y la granulometría completa. La muestra pasante para el tamiz malla 400 no es necesario realizarle una preparación posterior, para la muestra con la granulometría completa se realiza un proceso de pulverización, en el cual se reduce el tamaño de partícula para su correcta atomización.

En la tabla 8, se observan los resultados obtenidos por el ensayo de espectroscopia de absorción atómica realizado.

Ubicación de la muestra	ppm Au	ppm Ag
Banda #12 – malla pasante 400	6,55	36,55

Banda #12 – pasante malla 80	11,37	28,17
Bajo flujo HCP – malla pasante 400	23,96	43,70
Bajo flujo HCP – granulometría total	39,04	33,01
Sobre flujo HCP – malla pasante 400	4,94	24,14
Sobre flujo HCP – granulometría total	3,50	12,49
Bulk – malla pasante 400	0,46	5,27
Bulk – granulometría total	0,35	5,15
Concentrado flotación – malla pasante 400	108,80	324,98
Concentrado flotación – granulometría total	155,43	345,20
Espesador #8 – malla pasante 400	2,64	87,85
Espesador #8 – granulometría total	3,74	95,95

Tabla 8. Resultados obtenidos por medio del ensayo de absorción atómica en ppm.

Los ensayos de absorción están determinados para dos tipos de granulometrías, la granulometría completa de la muestra y el tamaño de partícula pasante por malla 400, de esta forma se debe calcular el porcentaje al cual pertenece el tamaño de partícula pasante malla 400 a la granulometría completa, de esta forma entender los resultados anteriores.

Los resultados dados en los diferentes granulométricos realizados, se muestran en la tabla 9, donde se muestra el porcentaje al cual corresponde el tamaño de partícula pasante malla 400, para cada granulometría.

Ubicación de la muestra	Porcentaje de muestra pasante malla 400
Banda #12	8
Bajo flujo HCP	6,8
Sobre flujo HCP	59
Colas flotación (Bulk)	68,16
Concentrado flotación	59,8
Espesador #8	89,72

Tabla 9. Porcentaje de muestra que pertenece a la malla pasante 400.

Los datos obtenidos son procesados con la herramienta Excel, en el cual se obtienen diferentes gráficos que permiten organizar y analizar de mejor forma los resultados obtenidos en los diferentes ensayos realizados.

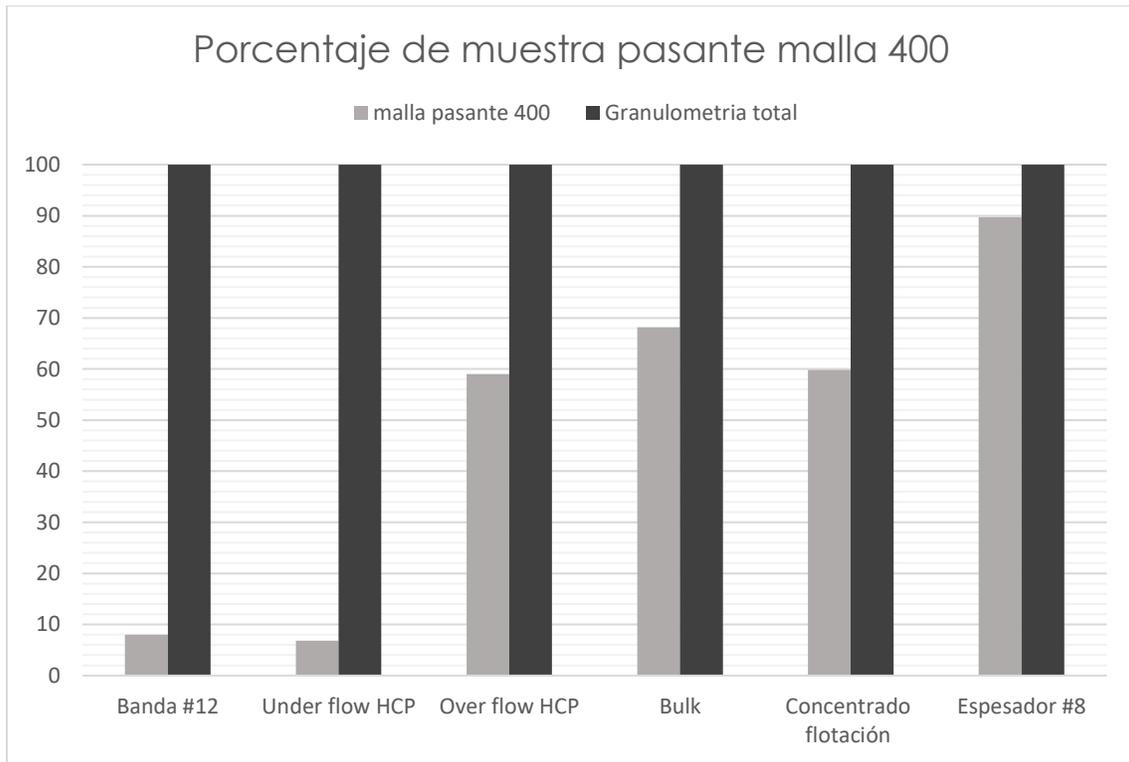


Gráfico 7. Porcentaje de la muestra que pertenece a los finos (< 37 μm).

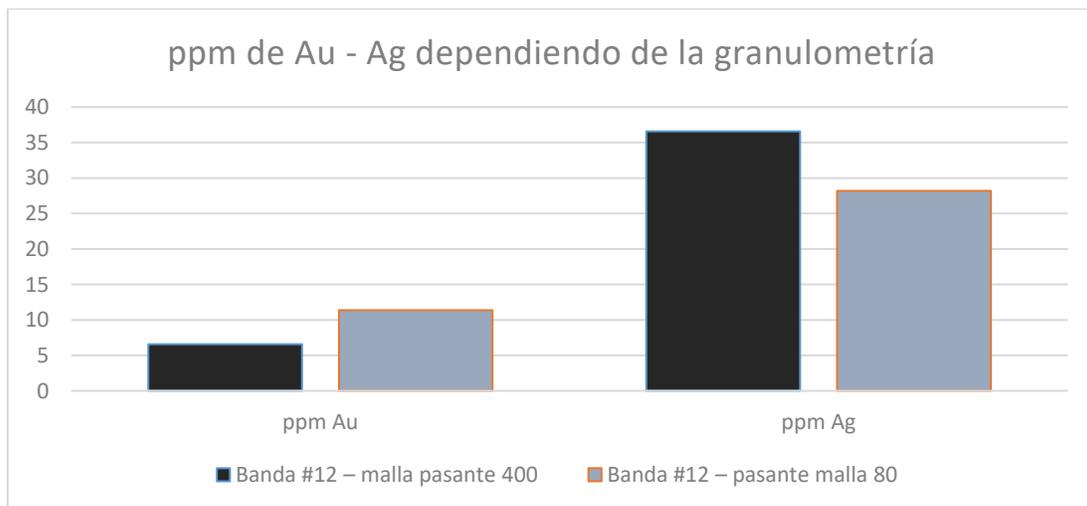


Gráfico 8. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías en la banda #12.

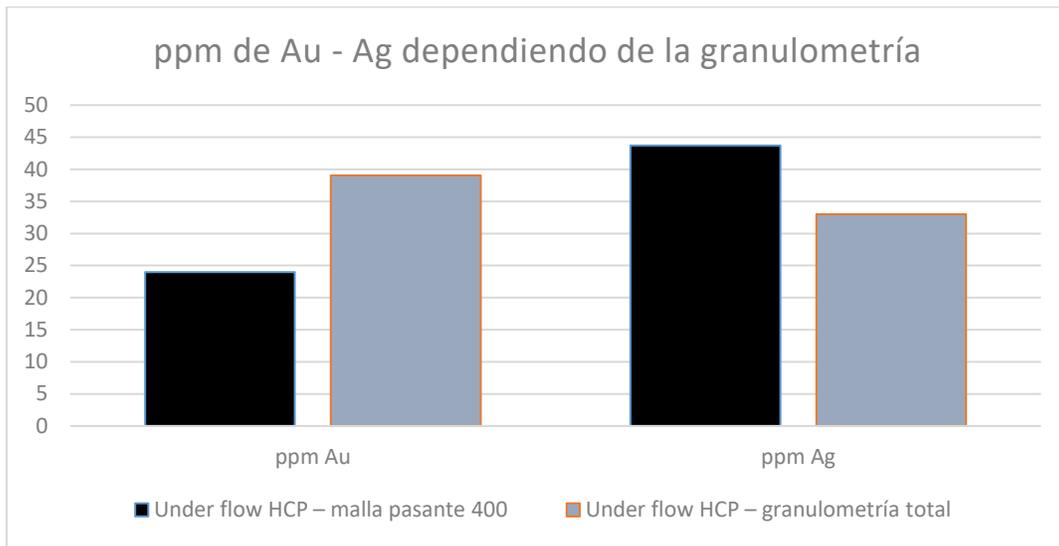


Gráfico 9. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el bajo flujo (under flow) de los hidrocilones principales.

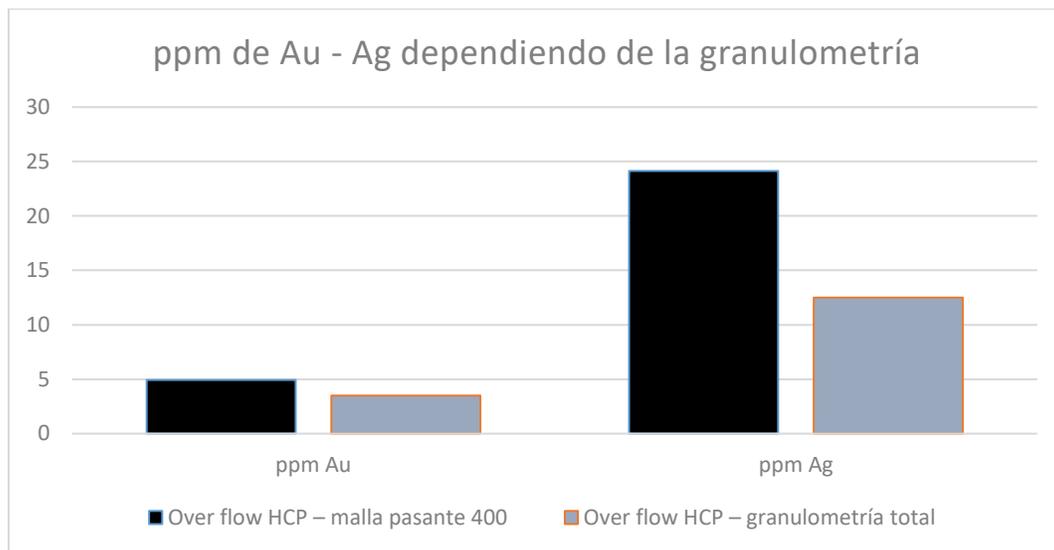


Gráfico 10. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías del sobre flujo (over flow) de los hidrocilones principales.

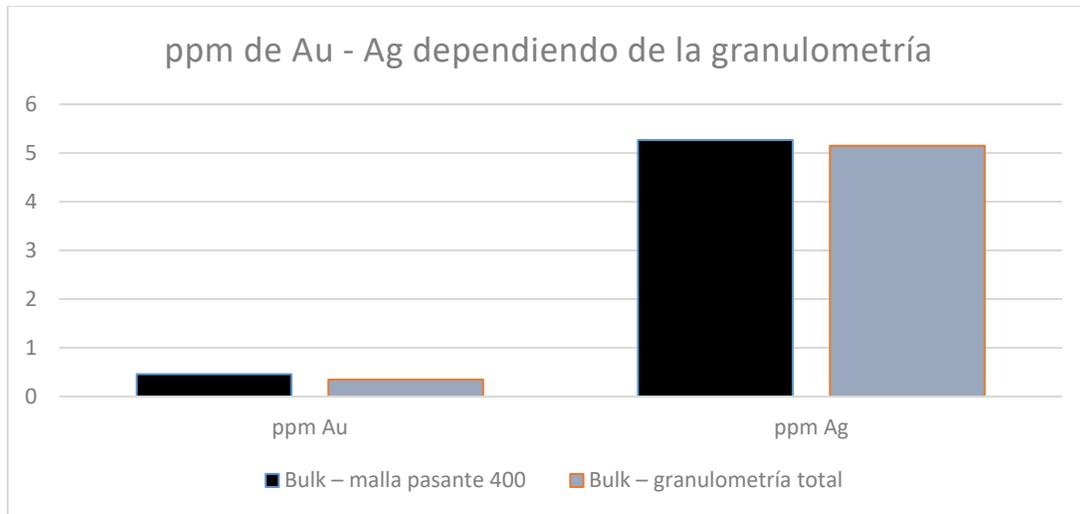


Gráfico 11. relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en las colas de la fase Scavenger.

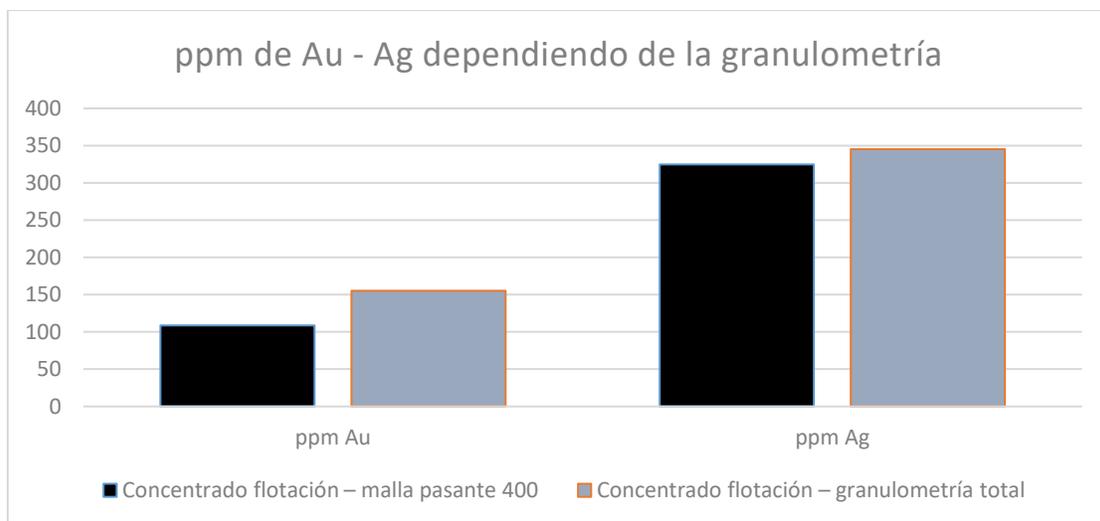


Gráfico 12. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el concentrado de flotación.

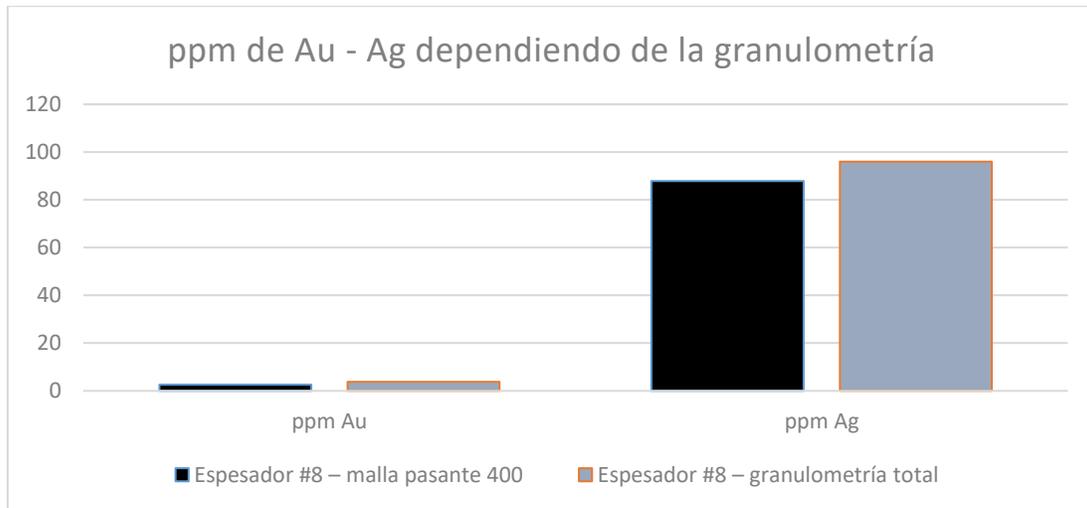


Gráfico 13. Relación de las ppm de Au y Ag en las diferentes granulometrías obtenidas en el sedimento del espesador #8.

Modelación matemática para la expansión de 2000 a 3000 TPD.

La modelación matemática se utiliza para prever como la planta manejara el incremento en la capacidad de procesamiento y para identificar las etapas donde se requieran ajustes o mejoras. Como se ha mencionado se realizó una base de datos donde se recopilan datos específicos del flujo, se observan las variables que deben permanecer fijas posterior al proceso de expansión, estos valores permitieron modelar el proceso de beneficio y de esta forma obtener los flujos esperados en el nuevo diseño de la planta, utilizando las ecuaciones 3, 4, 5, 6 y 7.

Nuevo circuito de molienda.

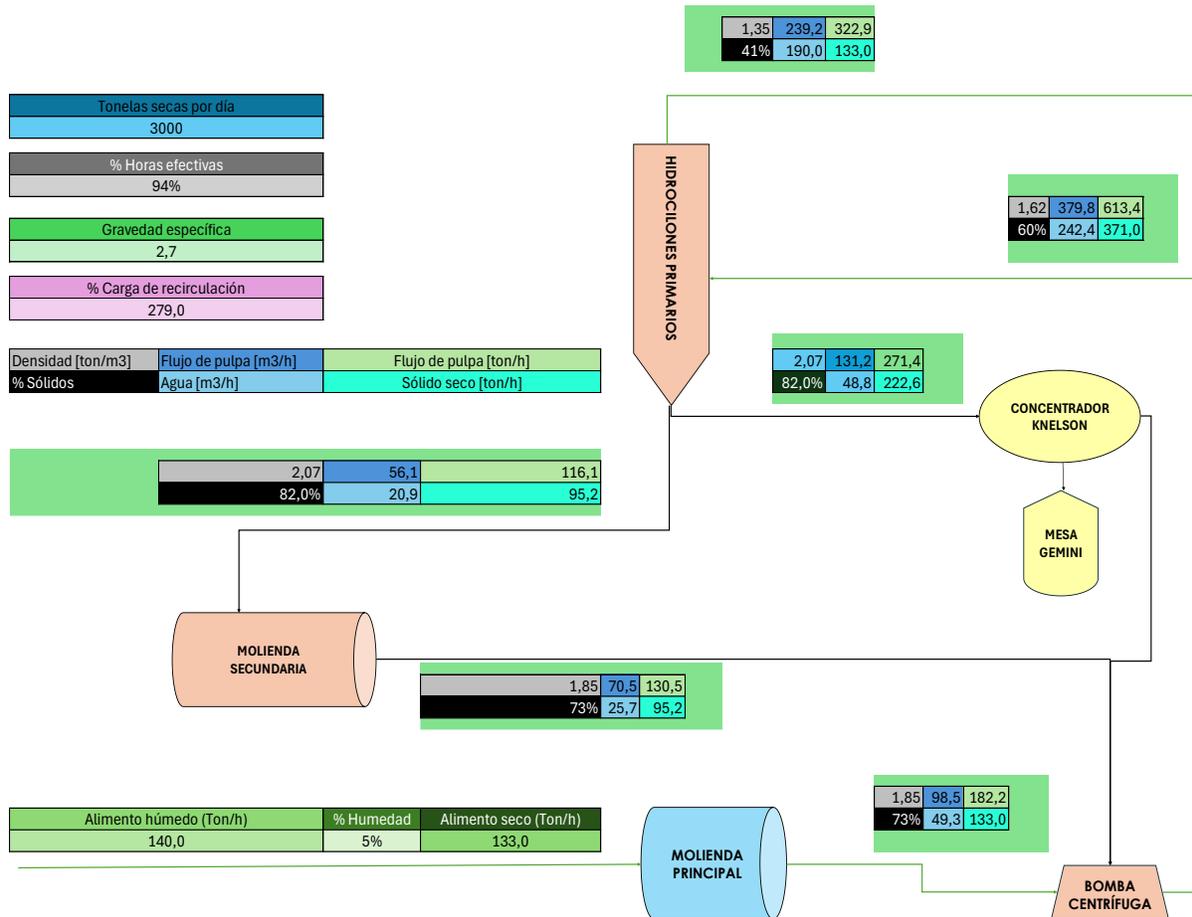


Figura 21. Diagrama de flujo para la expansión de la etapa de molienda.

Para la expansión en la etapa de molienda es necesario que el flujo sea dado de la forma más estable posible, en esta etapa se espera alimentar el molino principal por encima de 140 toneladas por hora, de acuerdo a esto se implementa un nuevo molino con dimensiones de Ø 3,6 x 4,5 m, también se debe aumentar los hidrociclones disponibles, aumentando a 12 hidrociclones, el bajo flujo (under flow) de los hidrociclones sigue alimentando la etapa de concentración centrifuga (Knelson) y además, alimenta el nuevo molino, el resultado de esta segunda molienda es llevado a la bomba centrifuga para alimentar los hidrociclones principales, en este nuevo alimento el bajo flujo (under flow) recircula a la molienda secundaria.

Los nuevos flujos obtenidos en la etapa de molienda manteniendo; las densidades ya obtenidas en el balance de masa de 2000 TPD; además manteniendo la carga de recirculación promedio calculada; el valor de la gravedad específica en esta etapa (2,7); el porcentaje de humedad, según la modelación matemática son los siguientes.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la figura 21 y la tabla 10.

Flujo salida molienda principal	98,5 [m3/h]
Flujo alimento HC principal	379,1 [m3/h]
Flujo sobre flujo HC principal	239,22 [m3/h]
Flujo bajo flujo HC principal	187,04 [m3/h]

Tabla 10. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de molienda.

Nuevo circuito de flotación.

Con la expansión a 3000 TPD, el volumen de material que ingresará al circuito de flotación aumentará significativamente. El análisis de la capacidad actual de las celdas de flotación sugiere que, aunque funcionan adecuadamente con el flujo actual podría enfrentar desafíos al manejar el mayor volumen. Se observó que el tiempo de residencia en las celdas de flotación es un factor crítico para la eficiencia del proceso ya que de este depende la cantidad de materia prima concentrada. Un mayor volumen de pulpa podría reducir el tiempo de residencia, lo que afectaría la capacidad de las burbujas de aire para capturar partículas valiosas.

La etapa de flotación está determinada por tres flujos; el flujo de alimento de flotación, el flujo de los concentrados y el flujo de descarga de las colas de flotación (Bulk). Para el caso del flujo de alimento de flotación se observa que es igual al flujo del sobre flujo (over flow) de los hidrociclones principales, de esta forma lo que se determina en esta etapa del proceso es el tiempo de residencia el cual está determinado por el volumen útil y el flujo.

Del anterior análisis se observa que la etapa de flotación tiene dos variables implicadas importantes, el volumen de los equipos de flotación y el tiempo de residencia de la materia prima en el proceso, según la bibliografía consultada el tiempo de residencia favorece el arrastre de la materia prima de interés, y variar este tiempo requiere de diferentes pruebas metalúrgicas, además de cambios en la forma en la cual los equipos trabajan. Para mantener esta etapa con un tiempo de residencia igual se debe aumentar el volumen de los equipos que pertenecen al circuito, de esta forma tener un circuito de flotación estable.

Los nuevos flujos obtenidos en la etapa de flotación manteniendo; las densidades ya obtenidas en el balance de masa de 2000 TPD; el valor de la gravedad específica en esta etapa es de (2,7); el porcentaje de concentración másico (4,3 %), según la modelación matemática son los siguientes.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la figura 22 y la tabla 11.

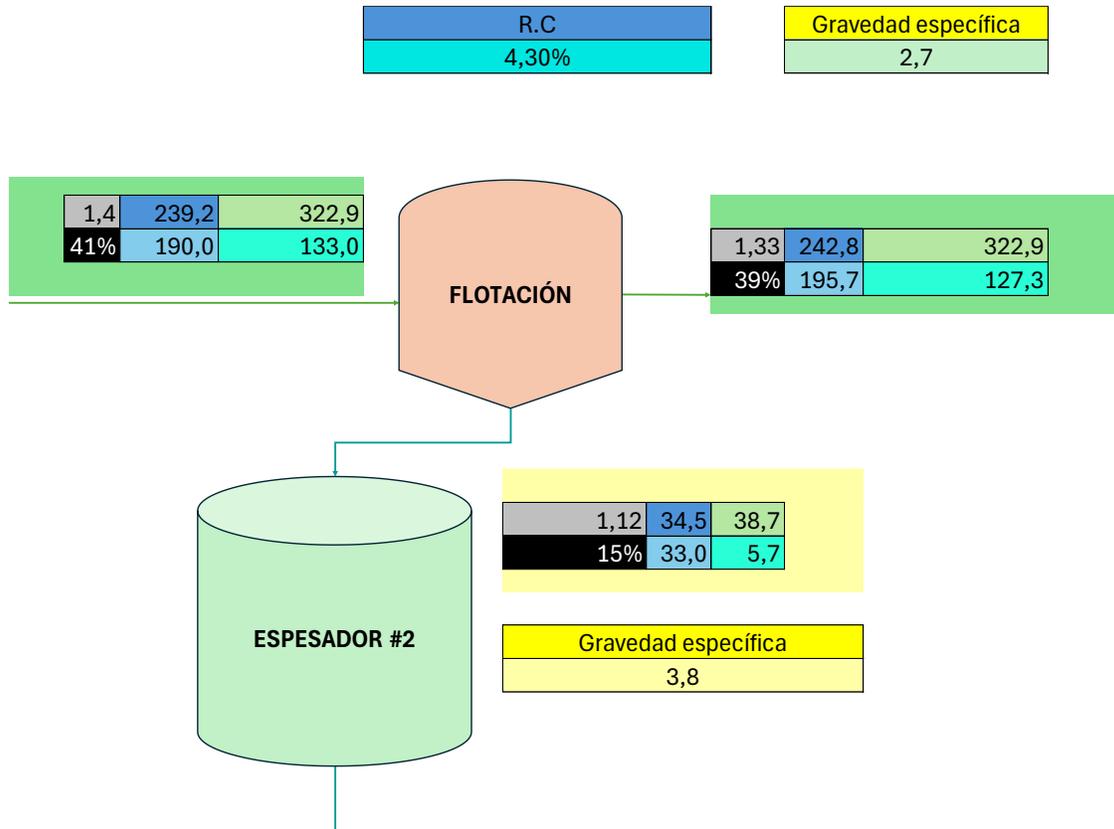


Figura 22. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de flotación.

Flujo sobre flujo HC principal	239,2 [m3/h]
Flujo de colas celda dúo #3	242,8 [m3/h]
Flujo de concentrado celda dúo #4	34,5 [m3/h]

Tabla 11. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de flotación.

Datos de los equipos ubicados en la etapa de flotación.

Obteniendo los volúmenes de las celdas de flotación se obtiene el tiempo de residencia total del circuito de flotación, de la ecuación 7:

Celda de flotación	Volumen	Tiempo de residencia
Celda Circular 0	51 [m3]	20 min
Celda Dúo #1	30 [m3]	12 min

Celda Dúo #2	30 [m3]	12 min
Celda Dúo #3	30[m3]	12 min
Celda Dúo #4	40 [m3]	16 min
Total	181 [m3]	1 hora y 12 min
Para las 3000 TPD	181 [m3]	1 hora y 2 min

Tabla 12. Tiempo de residencia actual en la etapa de flotación María Dama.

Nuevo circuito de lixiviación.

El circuito de lixiviación encontrado actualmente en la planta María Dama está determinado por una serie de condiciones que se deben cumplir para no alterar su diagrama de flujo. El circuito de lixiviación es alimentado por el sobre flujo (over flow) de los hidrociclones secundarios, el funcionamiento se encuentra determinado por uno de los dos hidrociclones, este sobre flujo (over flow) es llevado al activador el cual cumple con las condiciones de acondicionar la materia prima, regulando el $pH > 10$ y adicionando cianuro (CN^-) en determinadas partes por millón [ppm] Los equipos espesadores, tienen la capacidad de almacenar aproximadamente 400 m^3 de volumen total útil, esto tiene implicaciones en el tiempo de residencia al aumentar el tonelaje del mineral procesado.

La importancia de adaptar el nuevo circuito de lixiviación para manejar un volumen de pulpa 50% mayor, recae en asegurar el tiempo de residencia mínimo en la recuperación del oro y la plata, de esta forma mejorar o mantener lo que ya se tiene. Con el aumento del flujo de la pulpa, es crucial evaluar si el volumen de los tanques de lixiviación es suficiente para mantener el tiempo de residencia adecuado. La modelación indica la necesidad de tanques adicionales o de ampliar los existentes, ya que con un tiempo de residencia insuficiente se corre el riesgo de afectar negativamente la disolución del oro y la plata.

Pensando en la ampliación es importantes mencionar la demanda de cianuro y oxígeno también aumentara, estas dosificaciones de reactivos deben ser ajustadas para mantener la eficiencia de lixiviación.

Los nuevos flujos obtenidos en la etapa de lixiviación manteniendo; las densidades ya obtenidas en el balance de masa de 2000 TPD; el valor de la gravedad específica en esta etapa (3,8); la carga de recirculación para la etapa de remolienda, según la modelación matemática son los siguientes.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la figura 23, la figura 24 y la tabla 13.

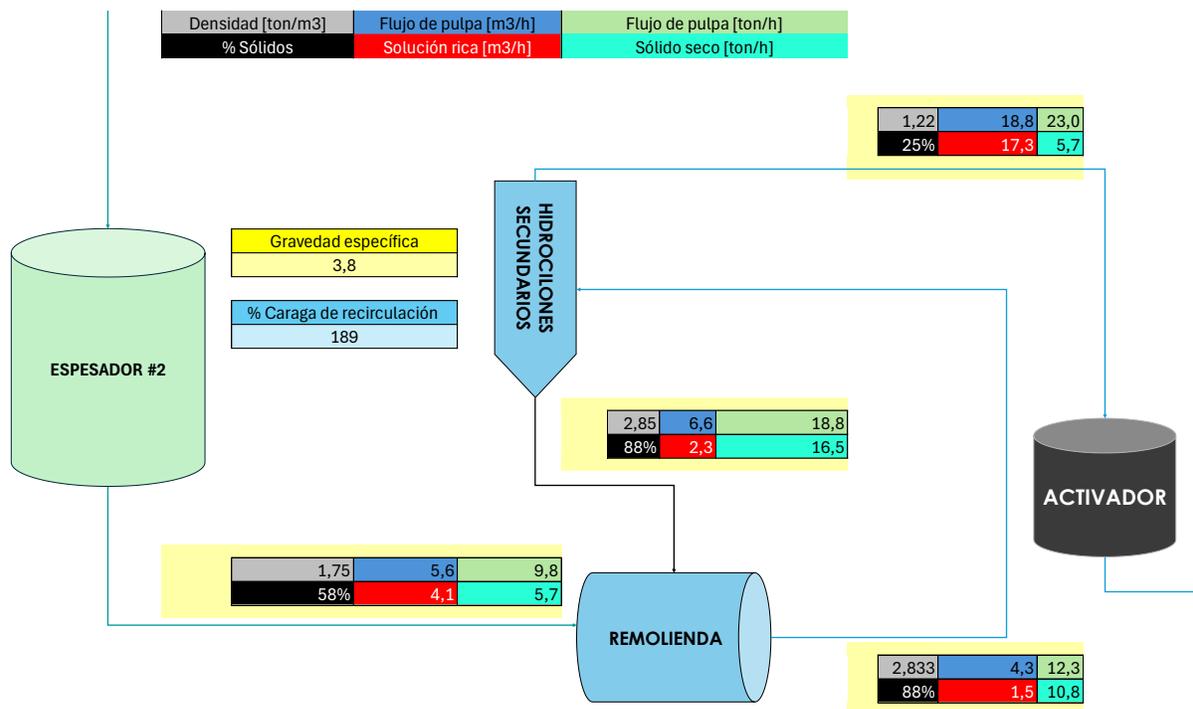


Figura 23. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de remolienda para la lixiviación.

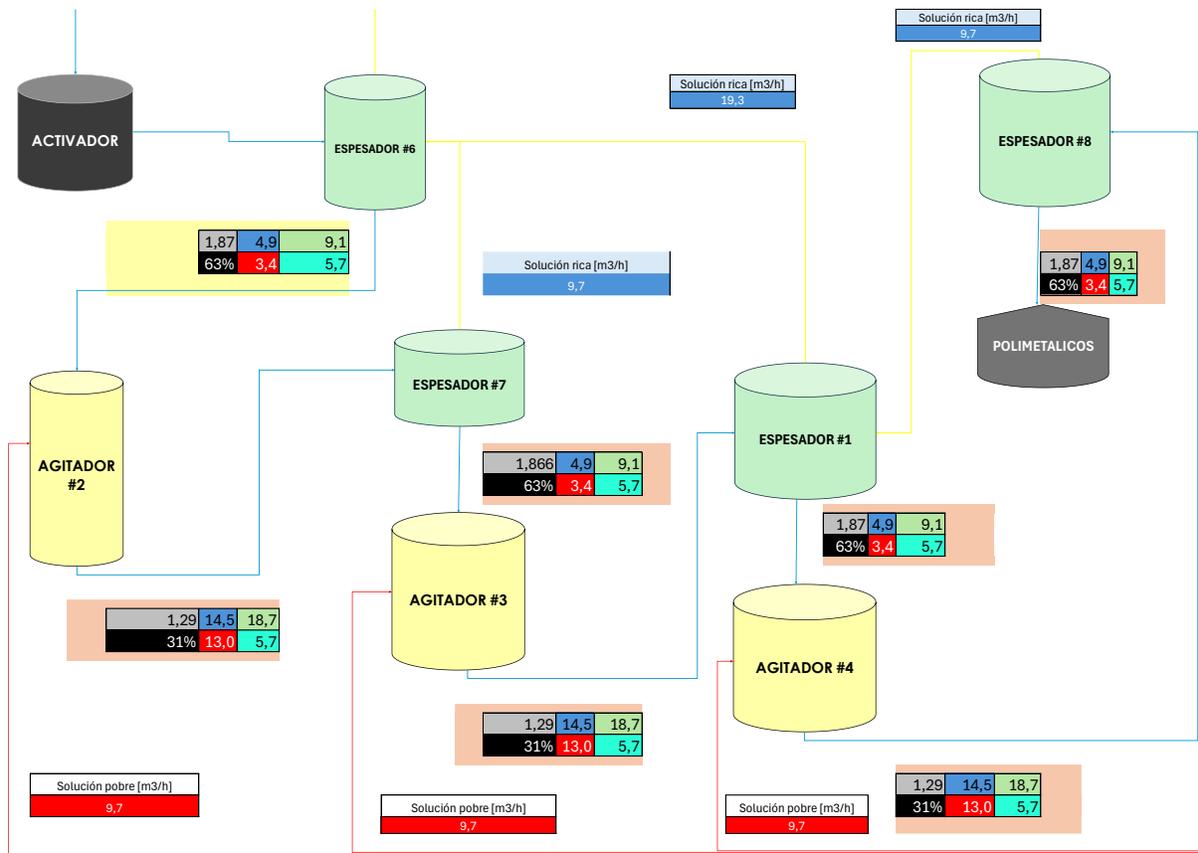


Figura 24. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa de lixiviación.

Flujo espesador #2	5,6 [m3/h]
Flujo sobre flujo HC secundario	18,8 [m3/h]
Flujo bajo flujo HC secundario	6,4 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #6	4,9 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #6	41,4 [m3/h]
Flujo agitador #2	14,5 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #7	4,9 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #7	9,6 [m3/h]
Flujo agitador #3	14,5 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #1	4,9 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #1	19,3 [m3/h]
Flujo agitador #4	14,5 [m3/h]
Flujo pulpa espesador #8	4,9 [m3/h]
Flujo solución rica espesador #8	9,7 [m3/h]

Tabla 13. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa de lixiviación.

Datos de los equipos ubicados en la etapa de lixiviación con cianuro.

La etapa de lixiviación tiene un tiempo de residencia asociado al volumen de los equipos y a los flujos, utilizando la ecuación 7 se obtienen los siguientes tiempos de residencia.

Equipo	Volumen	Tiempo de residencia
Espesador # 6	450 [m3]	16,52 [h]
Agitador # 2	397 [m3]	41,91 [h]
Espesador # 7	128 [m3]	13,51 [h]
Agitador # 3	397 [m3]	41,91 [h]
Espesador # 1	150 [m3]	10,13 [h]
Agitador # 4	397[m3]	41,91[h]
Espesador # 8	316 [m3]	56,45 [h]
Total	2231 [m3]	220 [h]
Para las 3000 TPD	2231[m3]	150 [h]

Tabla 14. Tiempo de residencia en la etapa de lixiviación.

Nuevo circuito Merrill Crowe.

Con la expansión a 3000 TPD, se incrementará el volumen de solución rica que pasará por el circuito Merrill Crowe. El análisis muestra que la capacidad actual del sistema de clarificación y desoxigenación podría estar en su límite operativo; la clarificación eficiente es crítica para evitar que sólidos suspendidos interfieran con la precipitación actual es adecuada, pero con la expansión, podría ser necesario mejorar la capacidad o eficiencia de los filtros prensa; la torre de desoxigenación es efectiva en la eliminación de oxígeno, lo cual es crucial para el éxito del proceso de precipitación con zinc. Sin embargo, el aumento en el flujo de solución rica requerirá un análisis detallado para asegurarse de que la torre pueda manejar el mayor volumen sin comprometer la eficiencia.

La dosificación correcta del polvo de zinc y el acetato de plomo es vital para asegurar la precipitación de oro y plata. Los resultados sugieren que, si bien las proporciones actuales son efectivas, podrían necesitarse ajustes para optimizar la recuperación en el nuevo circuito ampliado.

Los datos son procesados por las ecuaciones 3, 4, 5 y 6, de esta forma se obtienen los valores observados en la tabla 3.

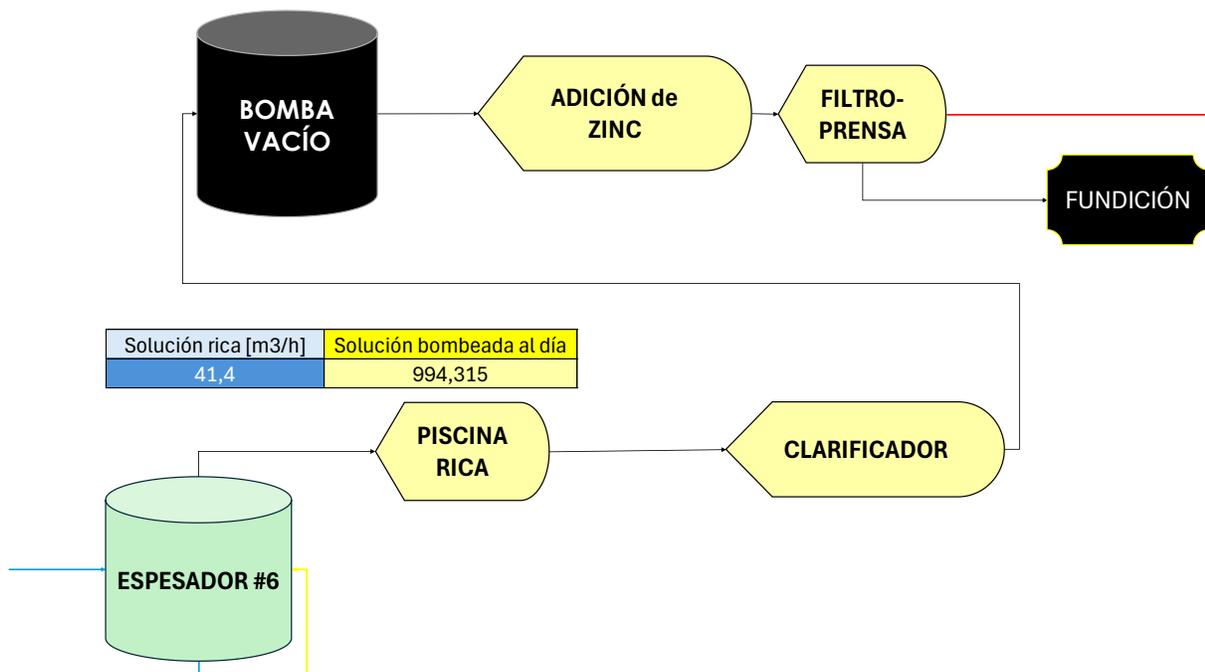


Figura 25. Diagrama de flujo para el proceso de expansión en la etapa Merrill Crowe.

Alimento piscina rica por día	994,3 [m3/día]
--------------------------------------	----------------

Tabla 15. Resultados de la modelación matemática obtenidos en la etapa Merrill Crowe.

Se tiene que en promedio se precipita 17 ppm (oro y plata), para un alimento de solución rica al día de 994,3 [m3/día], se tendría 16903 [g/día].

Análisis de resultados.

Sobre el balance de masa obtenido de la planta procesando 2000 TPD se encuentran variables que deben seguir cumpliendo su rango de trabajo, las variables son empleadas para tener el control estable del proceso, a partir de esto se determina deben permanecer como una constante en el procesamiento al aumentar las toneladas procesadas, además, que se encuentren constantes es una ventaja significativa al momento de realizar la modelación matemática para el aumento de la capacidad productiva de la planta MD, ya que permite recalcular las variables de flujo, y de esta forma determinar los volúmenes que deben ser ampliados, o las etapas que deben ser intervenidas y su por qué.

La capacidad actual del flujo presente en la planta María Dama es limitada para la expansión de 2000 a 3000 TPD, la adición de un nuevo molino y el aumento de los hidrociclones a 12, debería mejorar la eficiencia de la molienda, permitiendo una reducción más uniforme del tamaño de las partículas y el aumento del flujo por el aumento del tonelaje alimentado al molino. Esto es crucial para asegurar que el material este adecuadamente preparado para la flotación. Aumentar la capacidad en la etapa de molienda implica un mayor desgaste en los equipos y un posible incremento en los costos operativos. Será necesario monitorear de cerca el rendimiento de los dos molinos y la eficiencia de los hidrociclones para evitar cuellos de botella en el flujo.

Con el aumento en la capacidad de procesamiento en 1000 TPD, las celdas de flotación deberán manejar un mayor volumen de pulpa, esto podría afectar la eficiencia de la concentración por flotación si no se ajustan adecuadamente los tiempos de residencia y las concentraciones de reactivos. De esta forma mantener la estabilidad en la concentración másica es crucial para evitar la pérdida de minerales valiosos (Au y Ag) en las colas. Cualquier variación en la densidad podría llevar a una recuperación subóptima, por lo que se recomienda un monitoreo constante y ajustes en tiempo real. La posibilidad de integrar nuevas tecnologías o mejorar las existentes para manejar el incremento de la capacidad de procesamiento a 3000 TPD, podría incluir la ampliación de la capacidad en el volumen de las celdas.

La expansión implicará un mayor consumo de reactivos como cianuro y oxígeno, es esencial optimizar el uso de estos reactivos para mantener los costos bajo control y asegurar que no hay pérdidas innecesarias de la materia prima valiosa, con el aumento de la capacidad, el riesgo de que ocurran reacciones no deseadas también aumenta, de esta forma mantener el control estricto del pH y la concentración de cianuro es fundamental para evitar la volatilización o la hidrólisis, para asegurar una lixiviación eficiente.

En la etapa de Merrill Crowe la eliminación del oxígeno y la correcta dosificación del acetato de plomo y el cinc en polvo, son esenciales para una precipitación eficiente, cualquier fallo en estos parámetros podría llevar a una reducción en la cantidad de metal recuperado. El aumento en la cantidad del volumen de solución rica en oro y plata que pasará por el proceso Merrill Crowe, es crucial asegurar que los filtros y la torre de desoxigenación sean capaces de manejar el mayor volumen sin comprometer la calidad del precipitado, además según lo observado se podría considerar la posibilidad de mejorar la eficiencia de la clarificación mediante la actualización de los sistemas de filtrado, y ajustar la dosificación de zinc y acetato de plomo para asegurar una precipitación del oro y la plata óptima en el proceso ampliado.

Los procesos de caracterización de las partículas finas ($< 37 \mu\text{m}$) que pertenecen a las ya mencionadas zonas del flujo de la planta, mostró que tienen un impacto significativo en el proceso de recuperación de metales preciosos (Au y Ag), particularmente en la flotación y lixiviación, además la forma, el tamaño y la textura de las partículas varían considerablemente a lo largo del proceso, afectando la eficiencia de cada etapa.

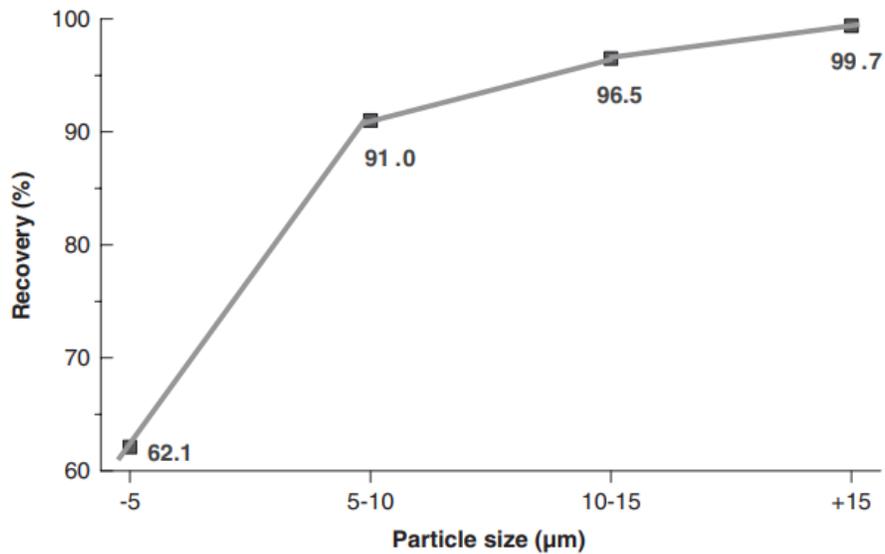


Figura 26. Efecto del tamaño de partícula del sobre flujo de los hidrociclones principales en el proceso de flotación [28].

Las partículas finas, debido a su mayor superficie específica, son más difíciles de procesar y requieren un manejo especial, como se observa en la figura anterior, donde se evidencia la disminución del porcentaje de recuperación respecto al tamaño de la partícula en el proceso de flotación, los resultados obtenidos sugieren que la gestión de las partículas finas debe ser un foco de atención para mejorar la eficiencia general. Se evidencia también que mantener una granulometría controlada es clave para optimizar cada etapa del proceso. La expansión implicaría una mayor variabilidad en el tamaño de las partículas, por lo que se recomienda un control más estricto de los tamaños de las partículas en cada etapa, implementando clasificadores más eficientes en el sentido de la ampliación.

En los resultados obtenidos se observó que los procesos de clasificación se encuentran bajo las características deseadas, ya que en el caso de la clasificación en los hidrociclones la granulometría cumple sus condiciones y además como se determinó en el ensayo SEM que, la esfericidad en el sobre flujo (over flow) es mayor que la esfericidad encontrada en el bajo flujo (under flow), esto es lo esperado para esta etapa del proceso, además, el oro submicroscópico asociado a los minerales típicos de la región, el cual no puede verse a través de un microscopio óptico y su grado de liberación no permite que este sea fácilmente extraído de la ganga, está fuertemente afectado por

el grado de la refractariedad del mineral asociado, de esta forma al tener un tamaño de partícula tan pequeño no es posible observar el oro fácilmente, ni tampoco permite que el proceso de extracción sea dado, la refractariedad es un fenómeno que en la actualidad se sigue estudiando, ya que por los mecanismos que se presentan en este tipo de partículas el oro no puede ser extraído por los métodos convencionales [29][30].

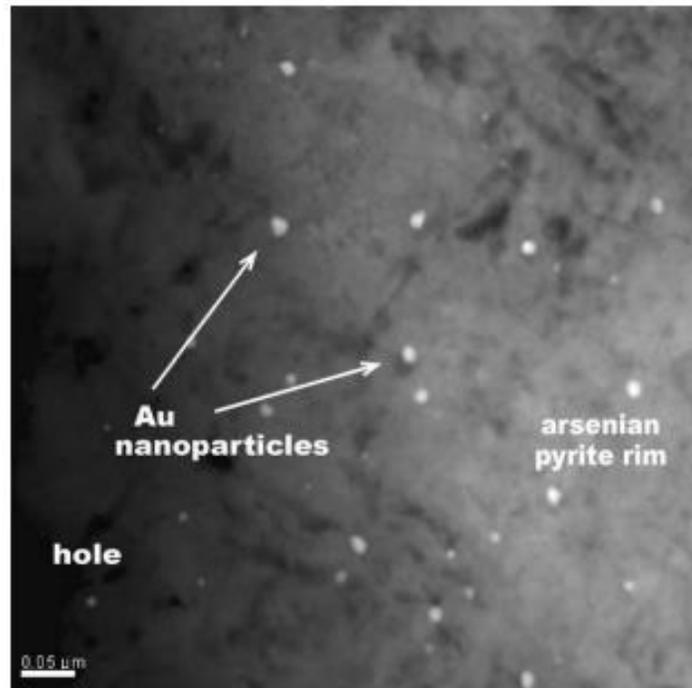


Figura 27. Microscopía Electrónica de Transmisión de alta resolución (HR-TEM) nanopartículas de Au en matriz del mineral [28].

Para efectos de este estudio fue importante analizar las micrografías de las partículas por medio del programa ImageJ, ya que este permitió observar la distribución de tamaño y de forma de los polvos estudiados, se observa un mayor porcentaje de partículas finas en las colas de flotación (bulk), observando esta tendencia en los análisis cuantitativos realizados, el porcentaje al cual pertenecen los finos de la distribución granulométrica de cada muestra es mayor en la muestra de las colas de flotación (bulk) que del concentrado, esta tendencia se menciona en la bibliografía consultada [29], donde se observa que en la etapa de flotación el porcentaje de recuperación el tamaño de partícula $< 10 \mu\text{m}$ disminuye rápidamente, de esta forma la remolienda para la etapa de

flotación podría tener implicaciones en la recuperación de los minerales valiosos, pensando en la implementación de un nuevo molino.

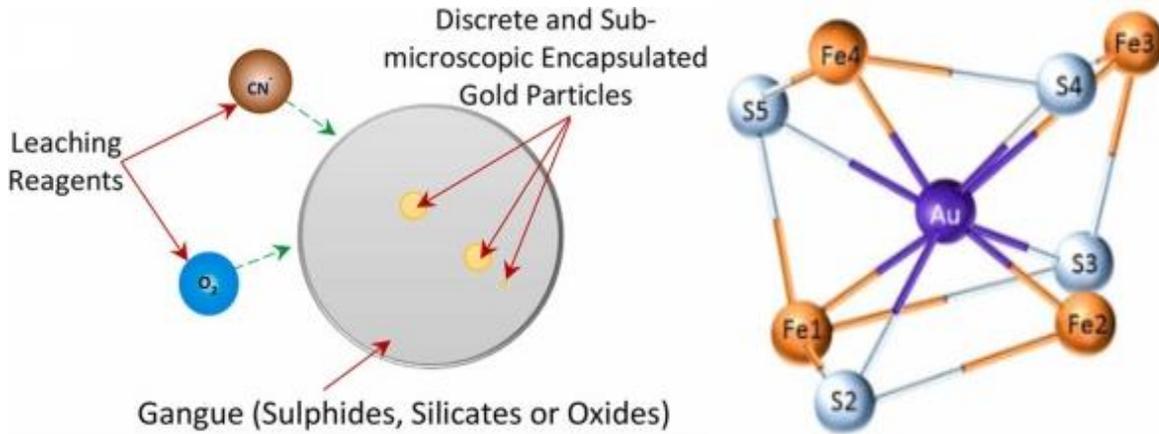


Figura 28. Configuración de minerales refractarios [28].

El ensayo SEM realizado en los diferentes puntos ya mencionados permite obtener resultados muy interesantes sobre el estado en el cual se encuentra el proceso de beneficio en la planta María Dama, en la etapa de flotación el hecho de que el oro y la plata permanezcan asociados con sulfuros ya que es lo que se flota, sugiere que hay un punto en el cual las partículas minerales asociadas al oro no se dejan flotar adecuadamente, esto implica que las partículas de sulfuro aún contienen metales preciosos que no están disponibles para los proceso de lixiviación, ya que se observa perdidas en las colas del proceso de flotación.

Para las muestras obtenidas en la etapa de flotación la rugosidad observada en las partículas de mineral valioso favorece la adhesión de reactivos de flotación, lo que es positivo para la recuperación, sin embargo, la presencia de oro finamente diseminado en la matriz de ganga, que no se recupera ya que la ganga no está favorecida en la flotación, sugiere que es necesario optimizar las condiciones de flotación para mejorar la recuperación de estas partículas más pequeñas.

En la etapa de lixiviación la fuerte asociación del oro y la plata con sulfuros implica que, incluso si las partículas llegan a la etapa de lixiviación, la eficiencia del proceso podría verse comprometida. La lixiviación de minerales asociados a sulfuros es generalmente más difícil y

puede requerir condiciones más agresivas en el ambiente químico del sistema y además una liberación del oro de los sulfuros para su lixiviación completa.

En los análisis de absorción realizados en las muestras obtenidas a lo largo del flujo, se observa las implicaciones del proceso en la concentración de los materiales de interés (Au y Ag), de esta forma se observa que la muestra del bajo flujo (under flow) de los hidrociclones principales presentan concentraciones relativamente altas de Au y Ag, lo que sugiere que una porción significativa de los metales valiosos se encuentra en las partículas más gruesas que retornan a la molienda o son alimentadas al concentrador centrífugo (Knelson). También se observa que los concentrados de flotación muestran las mayores concentraciones de oro y plata, indicando una alta eficiencia en la recuperación de los metales en la flotación, esto es especialmente evidente en la muestra de granulometría completa, lo que sugiere que tanto las partículas finas como las gruesas contribuyen significativamente a la recuperación. Los resultados obtenidos indican que en los procesos de molienda, flotación y lixiviación hay margen para mejorar la eficiencia de la recuperación de los metales de interés, especialmente en la gestión de partículas finas y en la optimización de la lixiviación.

Conclusiones.

La expansión de la planta de beneficio María Dama de 2000 a 3000 TPD es técnicamente viable y necesaria para mantener la capacidad productiva ante la disminución de la ley de los minerales, el estudio que se ha realizado demuestra que, con la implementación de nuevas tecnologías y ajustes en los procesos actuales, se puede lograr este aumento sin comprometer la eficiencia operativa.

La expansión requiere la optimización de los procesos de molienda, flotación, lixiviación y Merrill Crowe. La instalación de un nuevo molino, la adición de hidrociclones y la modificación en los flujos de recirculación son esenciales para manejar el aumento del volumen de materia prima, manteniendo un proceso óptimo, el balance de masa realizado para cada etapa del proceso es crucial para identificar los puntos críticos y prever los ajustes necesarios. Este análisis confirma que la expansión no solo incrementará el tonelaje procesado, sino que también mejorará la estabilidad y control de la operación si se mantienen los parámetros adecuados.

Los resultados obtenidos en la etapa de flotación subrayan la importancia de mantener un control preciso del tiempo de residencia y la densidad de la pulpa para maximizar la recuperación de la materia prima de interés. La expansión debe considerar la ampliación de la capacidad de las celdas de flotación para evitar pérdidas de mineral y optimizar la eficiencia del proceso.

El proceso de lixiviación y el método Merrill Crowe son efectivos en la recuperación de oro y plata, pero su eficiencia depende del control riguroso de las condiciones operativas. La expansión aumentará las demandas sobre estos sistemas, lo que requerirá un manejo más preciso de reactivos y un control constante del ambiente químico.

La caracterización de las partículas en diferentes etapas del proceso reveló variaciones significativas en forma y tamaño que afectan la eficiencia de los procesos de flotación y lixiviación. Es crucial optimizar el control del tamaño de partículas para mejorar la recuperación de metales y reducir pérdidas en partículas finas. Los ensayos de caracterización empleados permitieron realizar una revisión de la eficiencia del proceso de beneficio, proporcionando una visión detallada de la microestructura y composición de las partículas en diferentes etapas del proceso de beneficio en la

planta María Dama, se observó la distribución de oro y plata en diferentes etapas del proceso de beneficio, de esta forma determinar las implicaciones que se tienen. Además de sugerir que, aunque los procesos actuales son efectivos en cierta medida, hay un margen significativo para mejorar la eficiencia de la liberación y recuperación de los metales valiosos.

La expansión no solo es técnicamente factible sino también económicamente ventajosa, siempre que se implementen las mejoras sugeridas en los procesos. La inversión en nuevos equipos, en la optimización y el control de los ya existentes permitirá maximizar la recuperación de la materia prima de interés y asegurar la rentabilidad a largo plazo.

Referencias bibliográficas.

- [1] *Reserves and resources*. (2023, noviembre 30). Aris Mining Corporation; Aris Mining. <https://aris-mining.com/operation/reserves-and-resources/>
- [2] Tavares, L. M. (2000). Role of particle microstructure in comminution. En *Developments in Mineral Processing* (pp. C4-99-C4-106). Elsevier.
- [3] Klichowicz, M., Stoyan, D., & Lieberwirth, H. (2022). Towards realistic modeling of mineral microstructures. *Minerals Engineering, 184*(107634), 107634. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107634>
- [4] Mehta, R. K., Adel, G. T., & Yoon, R. H. (1990). Liberation modeling and parameter estimation for multicomponent mineral systems. *Mining, Metallurgy & Exploration, 7*(3), 156–163. <https://doi.org/10.1007/bf03403292>
- [5] Fitzpatrick, E. A. (1984). *Micromorphology of Soils*. Chapman and Hall.
- [6] Cummins, A. B., & Given, I. A. (1992). *SME Mining Engineering Handbook* (H. L. Hartman, Ed.; 2a ed.). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- [7] Wills, B. A., & Finch, J. H. (2015). *Wills' mineral processing technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery* (8a ed.). Butterworth-Heinemann.
- [8] Grieco, F.W. and Grieco, J.P. (1985). Manufacturing and refurbishing of jaw crushers, CIM Bull.
- [9] Sbarbaro, D., & Del Villar, R. (Eds.). (2012). *Advanced control and supervision of mineral processing plants* (2010a ed.). Springer.

-
- [10] Bueno, M. P., Kojovic, T., Powell, M. S., & Shi, F. (2013). Multi-component AG/SAG mill model. *Minerals Engineering*, 43–44, 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.06.011>
- [11] Napier-Munn, T. J., Morrell, S., Morrison, R. D., & Kojovic, T. (1996). Mineral comminution circuits: their operation and optimisation.
- [12] Farghaly, M. G., Golyk, V., Ibrahim, G. A., Ahmed, M. M., & Neesse, T. (2010). Controlled wash water injection to the hydrocyclone underflow. *Minerals Engineering*, 23(4), 321–325. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.09.021>
- [13] Finch, J. A., & Dobby, G. S. (1991). Column flotation: A selected review. Part I. *International Journal of Mineral Processing*, 33(1–4), 343–354. [https://doi.org/10.1016/0301-7516\(91\)90062-n](https://doi.org/10.1016/0301-7516(91)90062-n)
- [14] Habashi, F. (1966). The theory of cyanidation. *Transactions of the mineralogical society of AIME*, 235, 236-239.
- [15] Kuyucak, N., & Akcil, A. (2013). Cyanide and removal options from effluents in gold mining and metallurgical processes. *Minerals Engineering*, 50, 13-29.
- [16] Cidu, R., Da Pelo, S., & Frau, F. (2013). Legacy of cyanide and ARD at a low-scale Gold Mine (furtei, Italy). *Mine Water and the Environment*, 32(2), 74–83. <https://doi.org/10.1007/s10230-012-0209-1>
- [17] Parga, J. R. (1987). Analysis of the zinc cementation reaction for recovery of precious metals from cyanide solutions. *Ph. D. Thesis*.
- [18] Echeverry, S., Cardenas, A., Ordoñez-Carmona, O., and Muñoz, O. (2009). Aspectos estructurales y relaciones de algunos sistemas vetiformes del distrito minero Segovia-remedios. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 26:19-28.

-
- [19] Ossa V., L. Y. (2019). Oro y salud. medicalización de la clase obrera en frontino gold mines y en segovia (antioquia), 1934-1958.
- [20] Adams, M. (2016b). *Gold ore processing: Volume 15: Project development and operations* (2a ed.). Elsevier Science.
- [21] Iii, C. F. S. (1999). Gold complexes with anti-arthritic, anti-tumour and anti-HIV activity. En *Uses of Inorganic Chemistry in Medicine* (pp. 26–57). The Royal Society of Chemistry.
- [22] Luyben, W. L., & Wenzel, L. A. (1988). *Chemical process analysis: Mass and energy balances*. Prentice Hall.
- [23] SAWISTOWSKI, H. SMITH, W. Métodos de Cálculo en los Procesos de Transferencia de Materia. Editorial Alhambra, S.A. Primera Edición Española.
- [24] Miller, J., & Miller, J. C. (2005). *Estadística y Quimiometría Para Química Analítica*. Pearson Educacion.
- [25] Rhodes, M. J. (Ed.). (2008). *Introduction to particle technology* (2a ed.). Wiley-Blackwell.
- [26] Ortega-Rivas, E. (2017). *Unit operations of particulate solids: Theory and practice*. CRC Press.
- [27] Ulusoy, U. (2023). A review of particle shape effects on material properties for various engineering applications: From macro to nanoscale. *Minerals (Basel, Switzerland)*, 13(1), 91. <https://doi.org/10.3390/min13010091>
- [28] Adams, M. D. (2014). *Advances in gold ore processing* (B. A. Wills & M. D. Adams, Eds.). Elsevier Science & Technology.

[29] Chryssoulis, S. L., & Dimov, S. (2004). Speciation of sorbed gold. En *36th CMP Proceedings* (pp. 405-e414). Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum.

[30] Piervandi, Z. (2023). Pretreatment of refractory gold minerals by ozonation before the cyanidation process: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(1), 109013. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.109013>

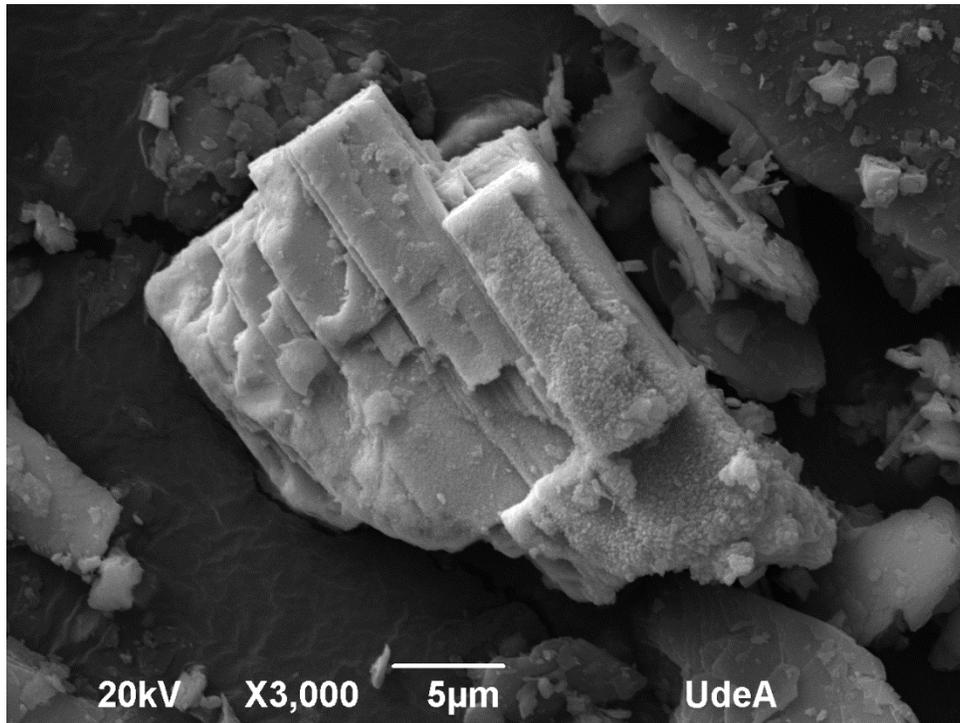
Anexo.**Mineral caracterizado de pirita.**

Figura 29. Micrografía de mineral pirita caracterizado por SEM.

Distribución granulométrica de las diferentes muestras.

Tamiz	Muestra #1 [gr]	Muestra #2 [gr]	Muestra #3 [gr]
Total	4682	3837	3940
3 / 4	0	0	0
5 / 8	20	27	9
1 / 2	50	87	174
3 / 8	195	167	175
1 / 4	724	598	657
12	1893	1680	1484
30	894	647	694
Tapa	901	631	747

Tabla 16. resultados granulométricos banda #12.

Tamiz	Muestra #1 [gr]	Muestra #2 [gr]
Total	300	300
30	69	72
50	118	162
80	46	99
100	12	31
120	12	32
140	8	12
200	6	29
325	4	14
400	3	8
-400	22	19

Tabla 17. Resultados granulométricos bajo flujo (under flow) HC principales.

Tamiz	Muestra #1 [gr]	Muestra #2 [gr]
Total	300	300
30	0	0
50	18	11

80	39	22
100	12	10
120	17	17
140	5	12
200	22	20
325	18	15
400	6	2
-400	163	191

Tabla 18. Resultados granulométricos sobre flujo (over flow) HC principales.

Tamiz	Muestra #1 [gr]	Muestra #2 [gr]
Total	300	300
30	0	0
50	1	11
80	15	19
100	5	9
120	10	17
140	8	9
200	34	15
325	22	11
400	4	1
-400	201	208

Tabla 19. Resultados granulométricos Bulk.

Tamiz	Muestra #1	Muestra #2
Total	300	300
50	10,73	0,01
80	6,46	3,27
100	5,78	4,08
140	26,9	17,59
200	33,7	34,88
325	28,48	43,51
400	7,88	9,99

-400	180,07	186,67
-------------	--------	--------

Tabla 20. Resultados granulométricos concentrados dúo #4.

Tamiz	Muestra #1 [gr]	Muestra #2 [gr]
Total	300	300
50	0	0
80	0	1,91
100	0,07	1,29
140	0,07	1,85
200	0,48	5,19
325	4,76	7,21
400	9,05	4,17
-400	285,57	278,38

Tabla 21. Resultados granulométricos sedimento espesador #8.

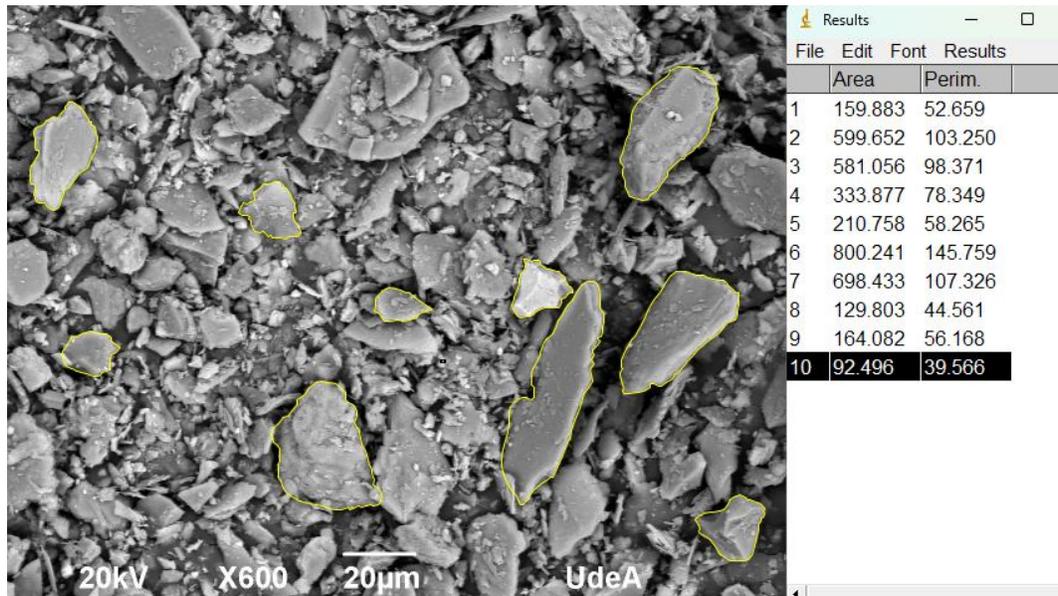
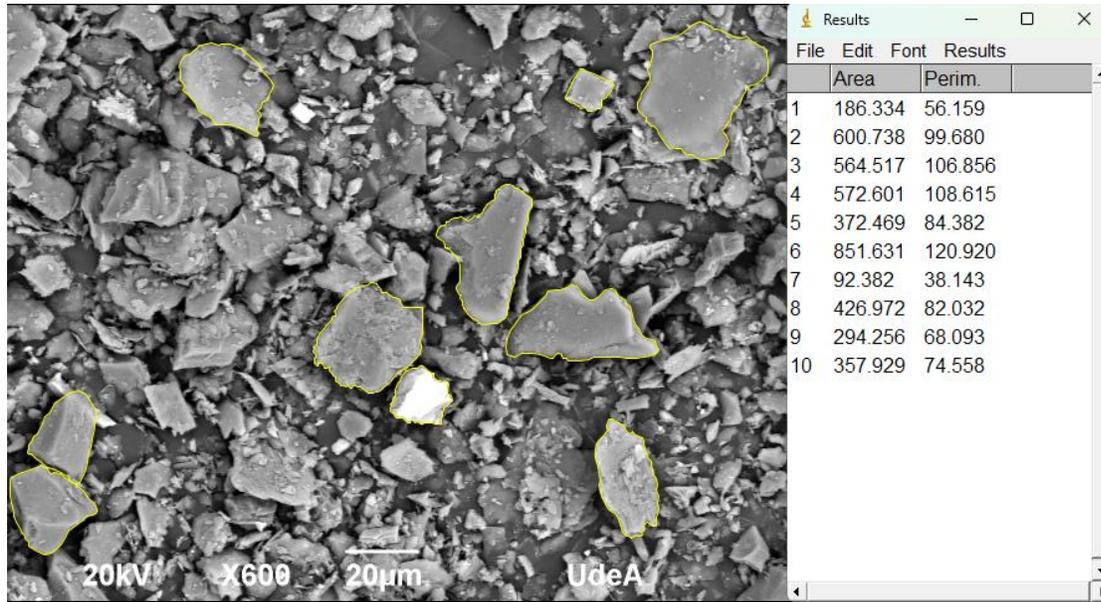
Análisis de partículas por medio del software ImageJ.

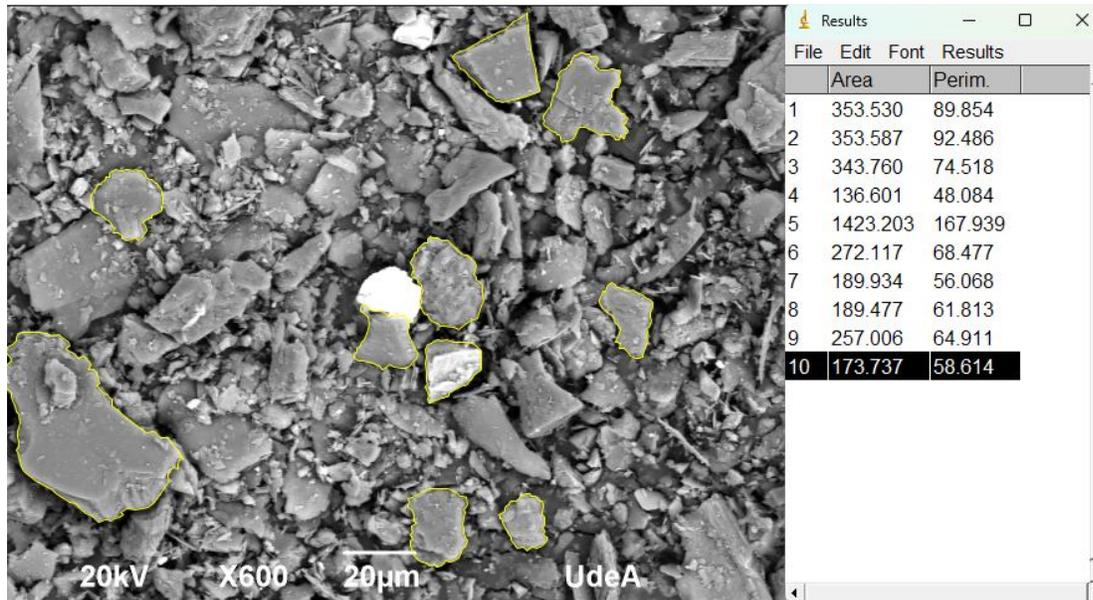
Banda #12.

Banda #12						
		<i>Área</i>	<i>Perímetro</i>	<i>D mayor</i>	<i>Circularidad</i>	<i>Redondez</i>
IMAGEN 1	1	186,334	56,159	17,200	0,742	0,802
	2	600,738	99,680	29,000	0,760	0,909
	3	564,517	106,856	38,000	0,621	0,498
	4	572,601	108,615	35,000	0,610	0,595
	5	372,469	84,382	30,000	0,657	0,527
	6	851,631	120,920	34,000	0,732	0,938
	7	92,382	38,143	12,000	0,798	0,817
	8	426,972	82,032	25,000	0,797	0,870
	9	294,256	68,093	22,000	0,797	0,774
	10	357,929	74,558	24,000	0,809	0,791
Promedio					0,732	0,752
IMAGEN 2	1	159,883	52,659	15,000	0,725	0,905
	2	599,652	103,250	40,000	0,707	0,477
	3	581,056	98,371	38,000	0,755	0,512
	4	333,877	78,349	27,000	0,683	0,583
	5	210,758	58,265	17,000	0,780	0,929
	6	800,241	145,759	61,000	0,473	0,274
	7	698,433	107,326	34,000	0,762	0,769
	8	129,803	44,561	14,000	0,821	0,843
	9	164,082	56,168	15,000	0,654	0,929
	10	92,496	39,566	14,000	0,742	0,601
Promedio					0,710	0,682
IMAGE N 3	1	324,250	75,036	25,000	0,724	0,661
	2	353,587	92,486	25,000	0,519	0,720

	3	343,760	74,518	25,000	0,778	0,700
	4	136,601	48,084	15,000	0,742	0,773
	5	1.423,203	167,939	59,000	0,634	0,521
	6	272,117	68,477	21,000	0,729	0,786
	7	189,934	56,068	18,000	0,759	0,746
	8	189,477	61,813	17,000	0,623	0,835
	9	257,006	64,911	19,000	0,767	0,906
	10	173,737	58,614	19,000	0,635	0,613
Promedio				0,691	0,726	

Tabla 22. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ banda #12.



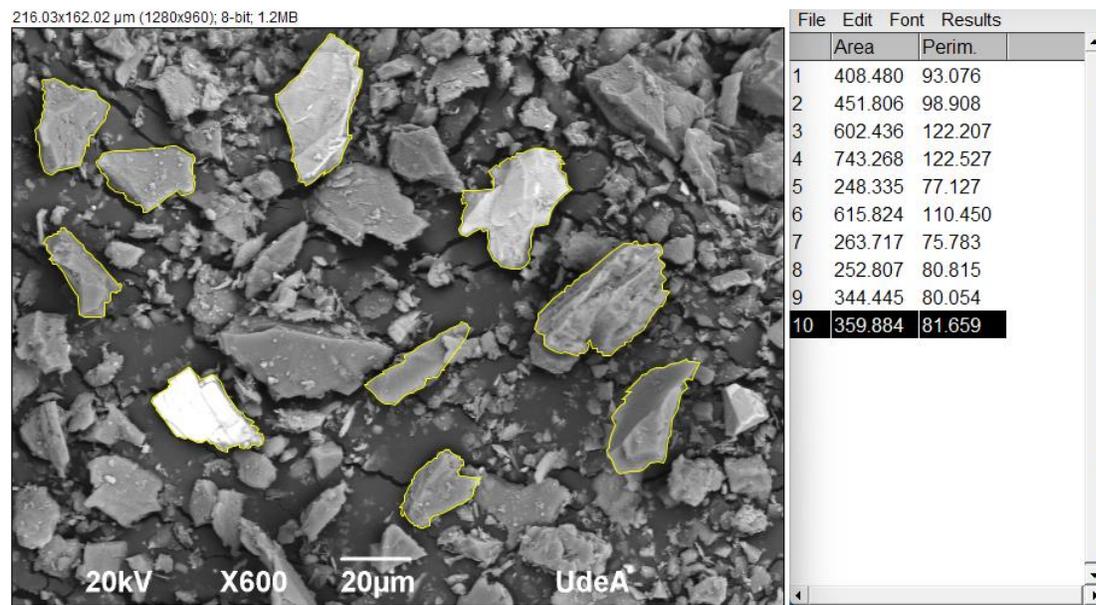
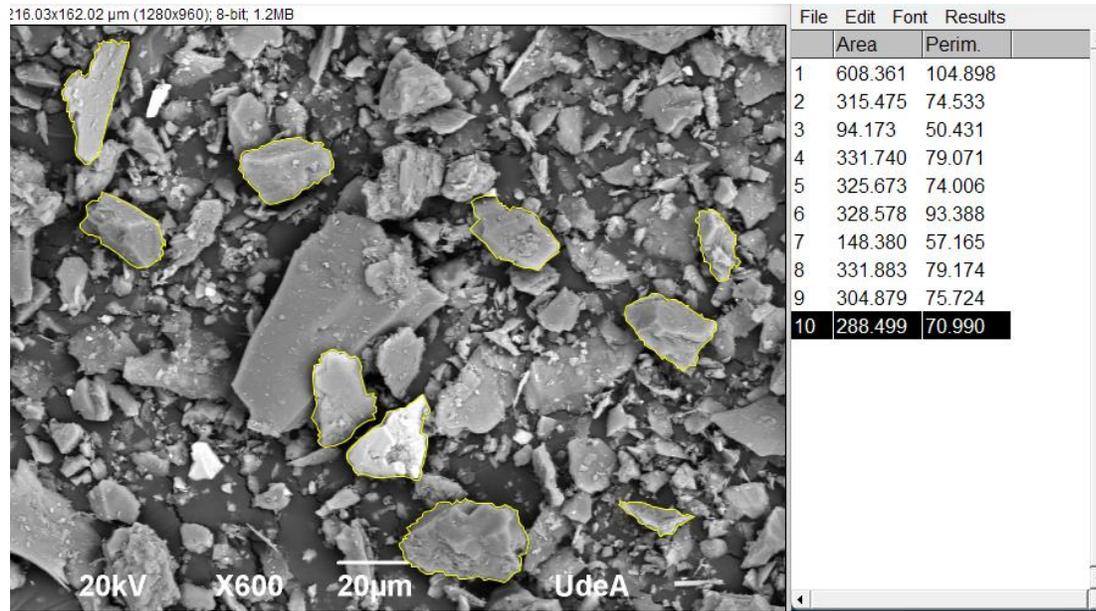


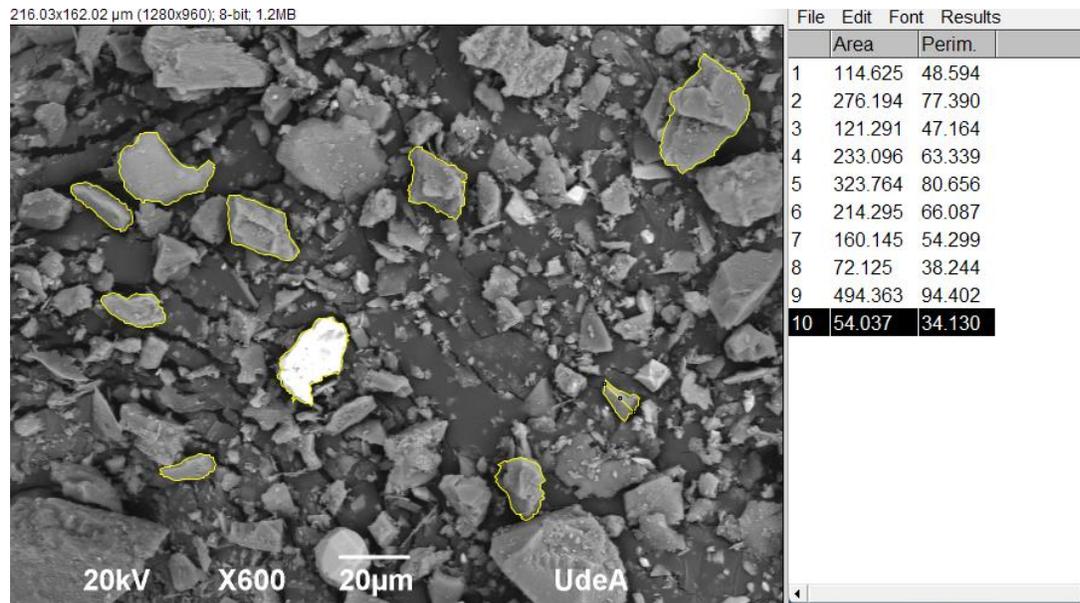
Bajo flujo hidrociclones principales.

Bajo flujoHCP						
		Área	Perímetro	D mayor	Circularidad	Redondez
IMAGEN 1	1	608,361	104,898	35,000	0,695	0,632
	2	315,475	74,533	22,000	0,714	0,830
	3	94,173	50,431	19,000	0,465	0,332
	4	331,740	79,071	26,000	0,667	0,625
	5	325,673	74,006	23,000	0,747	0,784
	6	328,578	93,388	33,000	0,473	0,384
	7	148,380	57,165	19,000	0,571	0,523
	8	331,883	79,174	24,000	0,665	0,734
	9	304,879	75,724	26,000	0,668	0,574
	10	288,499	70,990	25,000	0,719	0,588
Promedio					0,638	0,601
IMAGEN 2	1	408,480	93,076	32,000	0,593	0,508
	2	451,806	98,908	34,000	0,580	0,498
	3	602,436	122,207	34,000	0,507	0,664

	4	743,268	122,527	41,000	0,622	0,563
	5	248,335	77,127	24,000	0,525	0,549
	6	615,824	110,450	42,000	0,634	0,444
	7	263,717	75,783	23,000	0,577	0,635
	8	252,807	80,815	32,000	0,486	0,314
	9	344,445	80,054	22,000	0,675	0,906
	10	359,884	81,659	24,000	0,678	0,796
Promedio					0,588	0,588
IMAGEN 3	1	114,625	48,594	19,000	0,610	0,404
	2	276,194	77,390	23,000	0,580	0,665
	3	121,291	47,164	18,000	0,685	0,477
	4	233,096	63,339	25,000	0,730	0,475
	5	323,764	80,656	25,000	0,625	0,660
	6	214,295	66,087	22,000	0,617	0,564
	7	160,145	54,299	17,000	0,683	0,706
	8	72,125	38,244	15,000	0,620	0,408
	9	494,363	94,402	30,000	0,697	0,699
	10	54,037	34,130	11,000	0,583	0,569
Promedio					0,643	0,563

Tabla 23. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ bajo flujo HC principales.



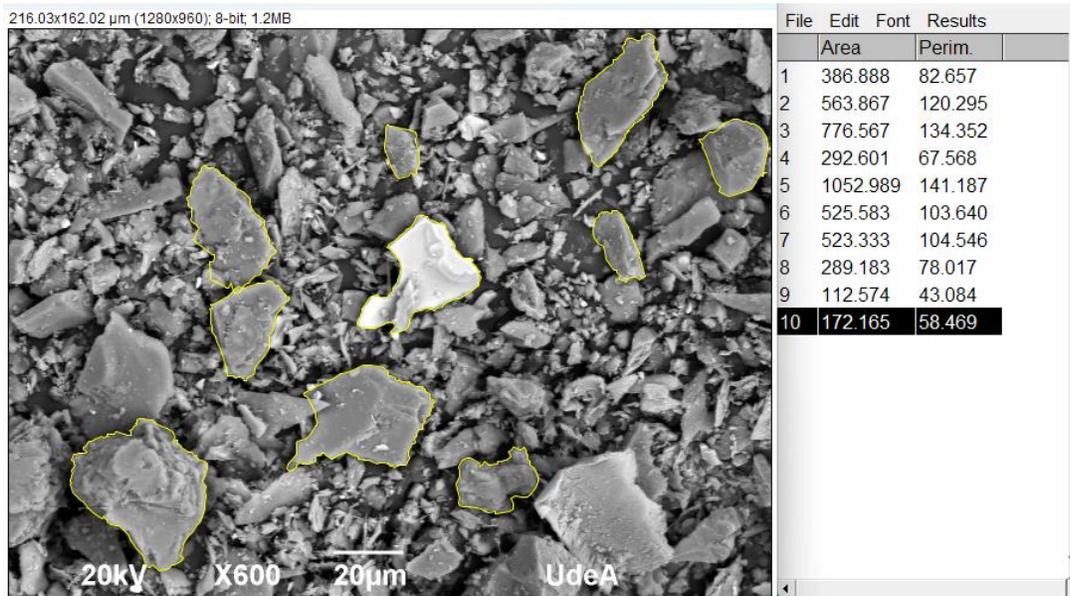
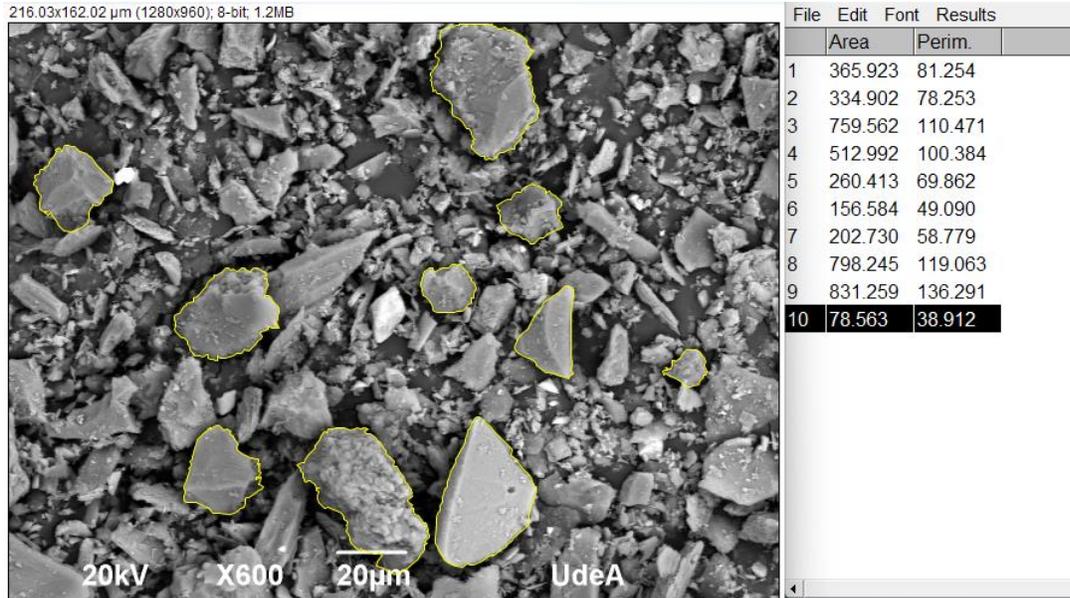


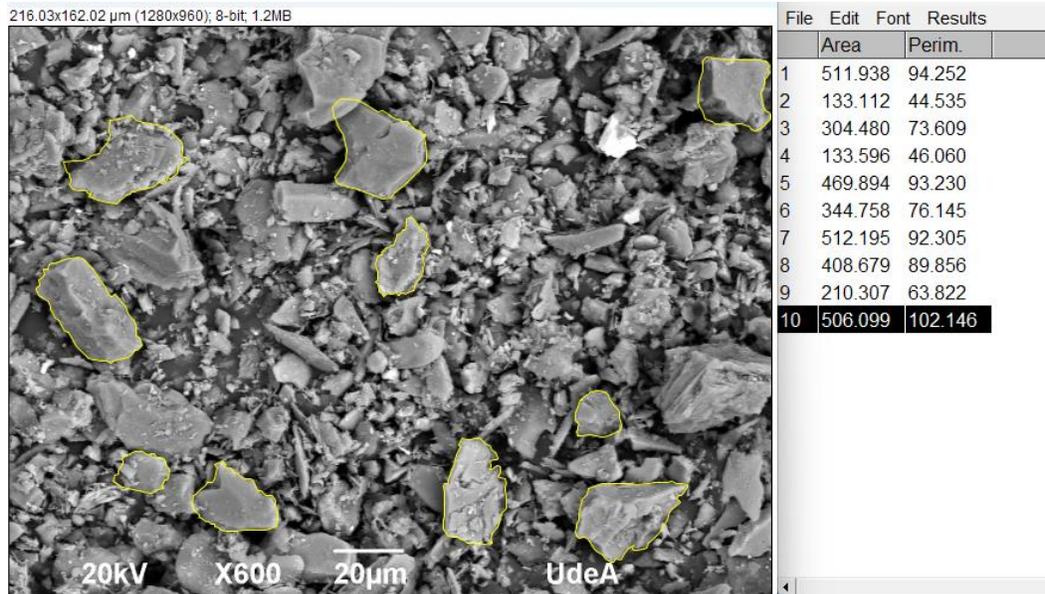
Sobre flujo hidrociclones principales.

Sobre flujo HCP						
		Área	Perímetro	D mayor	Circularidad	Redondez
IMAGEN 1	1	365,923	81,254	24,000	0,696	0,809
	2	334,902	78,253	23,000	0,687	0,806
	3	759,562	110,471	34,000	0,782	0,837
	4	512,992	100,384	26,000	0,640	0,966
	5	260,413	69,862	24,000	0,670	0,576
	6	156,584	49,090	15,000	0,817	0,886
	7	202,730	58,779	16,000	0,737	1,008
	8	798,245	119,063	37,000	0,708	0,742
	9	831,259	136,291	44,000	0,562	0,547
	10	78,563	38,912	11,000	0,652	0,827
Promedio					0,695	0,800
IMAGEN 2	1	386,888	82,657	24,000	0,712	0,855
	2	563,867	120,295	34,000	0,490	0,621
	3	776,567	134,352	32,000	0,541	0,966

	4	292,601	67,568	21,000	0,805	0,845
	5	1.052,989	141,187	39,000	0,664	0,881
	6	525,583	103,640	34,000	0,615	0,579
	7	523,333	104,546	34,000	0,602	0,576
	8	289,183	78,017	22,000	0,597	0,761
	9	112,574	43,084	13,000	0,762	0,848
	10	172,165	58,469	19,000	0,633	0,607
Promedio					0,642	0,754
IMAGEN 3	1	511,938	94,252	33,000	0,724	0,599
	2	133,112	44,535	13,000	0,843	1,003
	3	304,480	73,609	22,000	0,706	0,801
	4	133,596	46,060	15,000	0,791	0,756
	5	469,894	93,230	26,000	0,679	0,885
	6	344,758	76,145	25,000	0,747	0,702
	7	512,195	92,305	27,000	0,755	0,895
	8	408,679	89,856	27,000	0,636	0,714
	9	210,307	63,822	20,000	0,649	0,669
	10	506,099	102,146	27,000	0,610	0,884
Promedio					0,714	0,791

Tabla 24. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ sobre flujo HC principales.





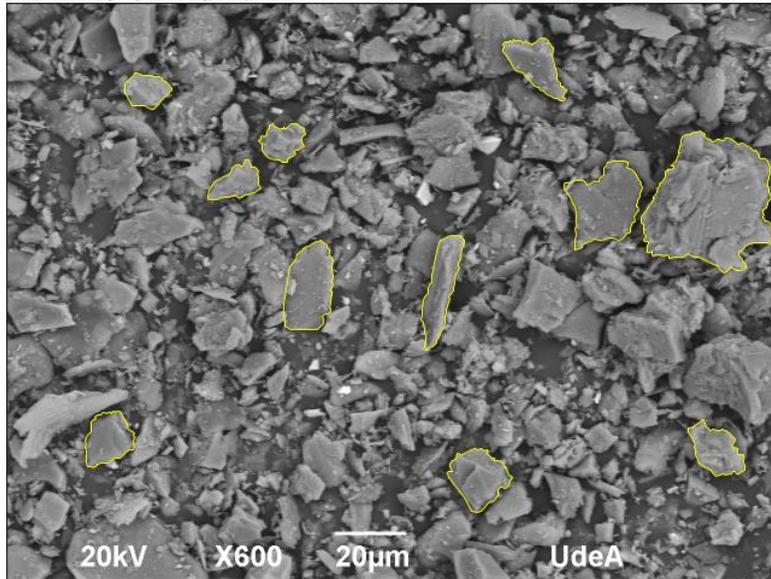
Bulk.

BULK						
		Área	Perímetro	D mayor	Circularidad	Redondez
IMAGEN 1	1	159,903	59,872	21,000	0,561	0,462
	2	196,056	58,321	17,000	0,724	0,864
	3	91,470	36,963	13,000	0,841	0,689
	4	94,099	41,392	12,000	0,690	0,832
	5	270,905	66,987	25,000	0,759	0,552
	6	96,021	43,465	15,000	0,639	0,543
	7	190,148	74,108	29,000	0,435	0,288
	8	1.003,654	143,670	39,000	0,611	0,840
	9	148,285	54,424	16,000	0,629	0,738
	10	153,317	51,079	17,000	0,738	0,675
Promedio					0,663	0,648
IMAGEN 2	1	399,065	81,905	32,000	0,748	0,496
	2	875,805	121,012	39,000	0,752	0,733
	3	806,751	127,667	42,000	0,622	0,582

	4	239,558	65,039	22,000	0,712	0,630
	5	237,098	61,875	19,000	0,778	0,836
	6	433,324	87,727	26,000	0,708	0,816
	7	119,086	46,717	16,000	0,686	0,592
	8	310,676	75,415	25,000	0,686	0,633
	9	87,654	43,466	15,000	0,583	0,496
	10	149,331	63,437	24,000	0,466	0,330
Promedio					0,674	0,615
IMAGEN 3	1	886,999	120,505	37,000	0,768	0,825
	2	653,462	110,897	35,000	0,668	0,679
	3	618,779	117,955	35,000	0,559	0,643
	4	645,463	110,547	40,000	0,664	0,514
	5	493,220	90,619	28,000	0,755	0,801
	6	230,767	59,712	18,000	0,813	0,907
	7	70,383	32,067	11,000	0,860	0,741
	8	458,170	108,291	40,000	0,491	0,365
	9	89,322	41,267	12,000	0,659	0,790
	10	170,164	56,887	18,000	0,661	0,669
Promedio					0,690	0,693

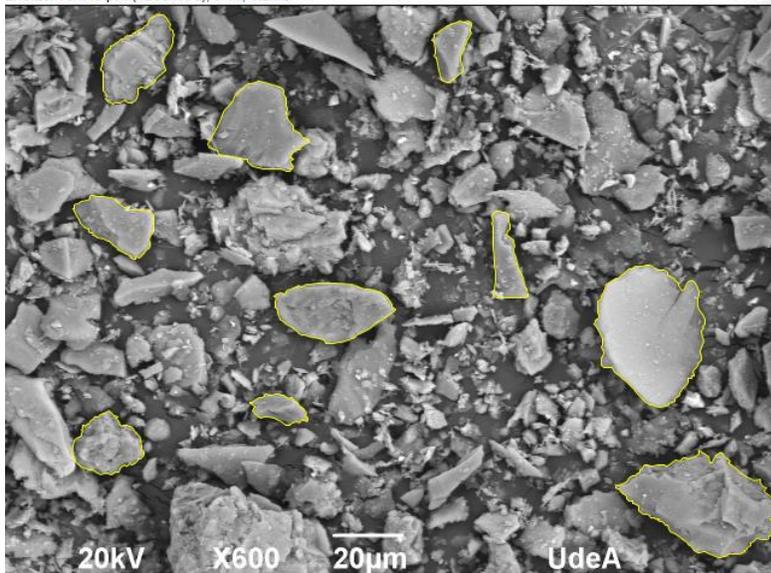
Tabla 25. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ colas Bulk.

215.20x161.40 µm (1280x960); 8-bit; 1.2MB

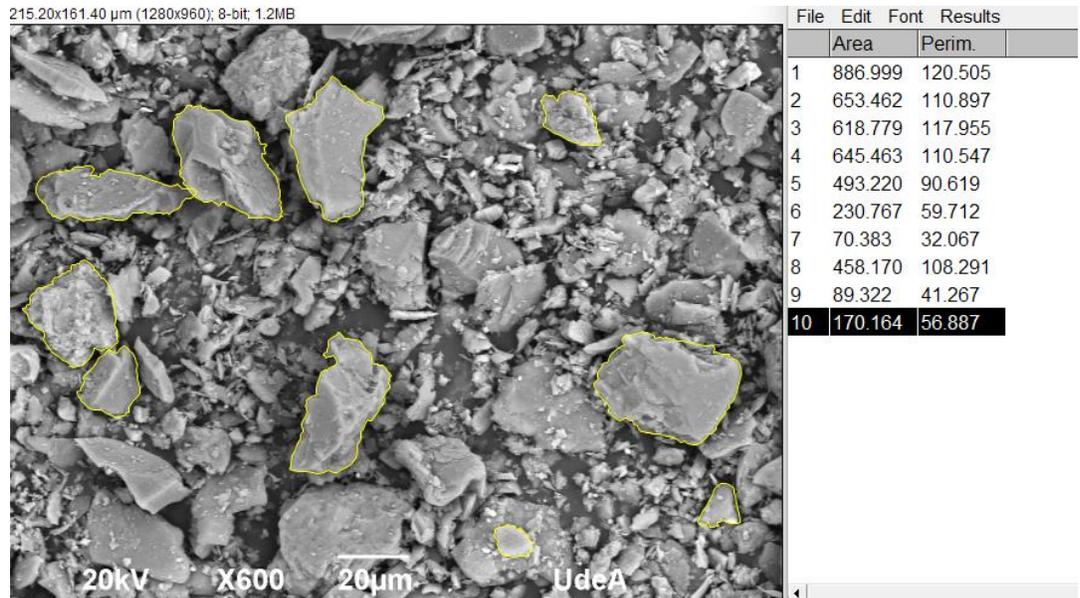


	Area	Perim.
1	159.903	59.872
2	196.056	58.321
3	91.470	36.963
4	94.099	41.392
5	270.905	66.987
6	96.021	43.465
7	190.148	74.108
8	1003.654	143.670
9	148.285	54.424
10	153.317	51.079

215.20x161.40 µm (1280x960); 8-bit; 1.2MB



	Area	Perim.
1	399.065	81.905
2	875.805	121.012
3	806.751	127.667
4	239.558	65.039
5	237.098	61.875
6	433.324	87.727
7	119.086	46.717
8	310.676	75.415
9	87.654	43.466
10	149.331	63.437

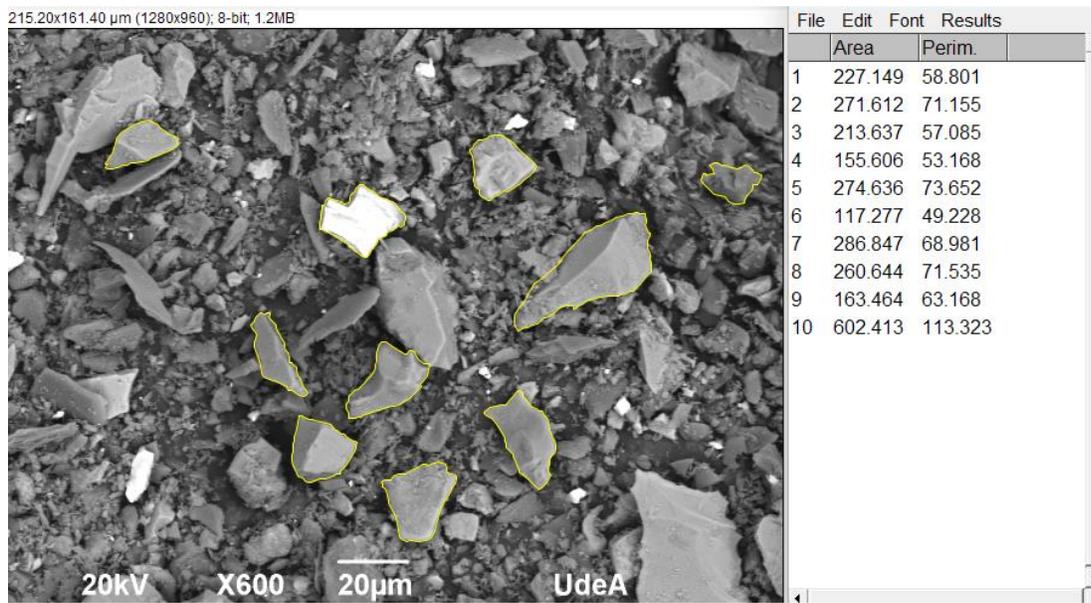
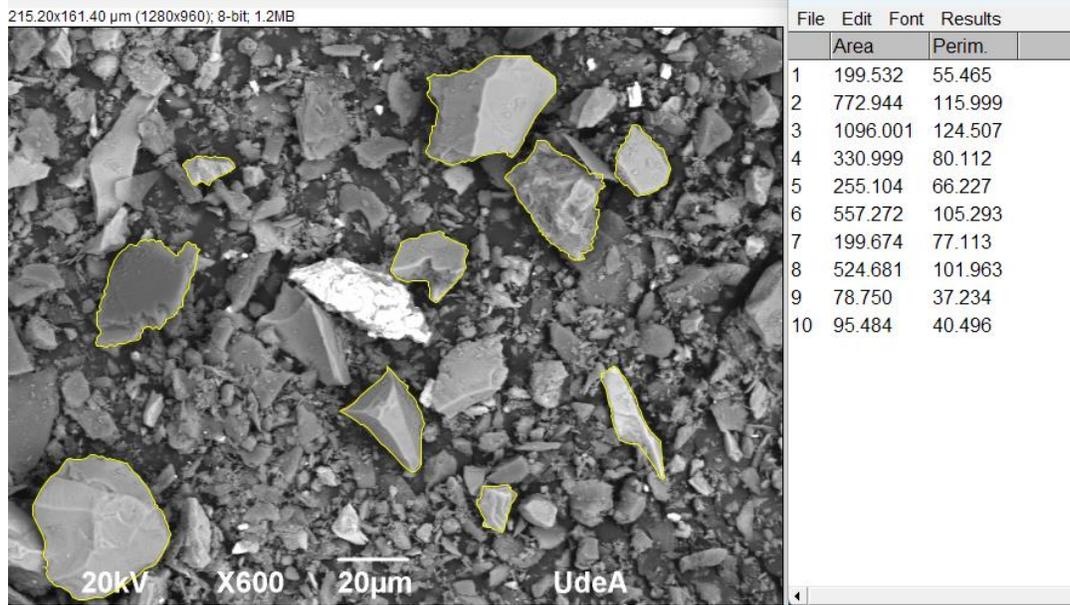


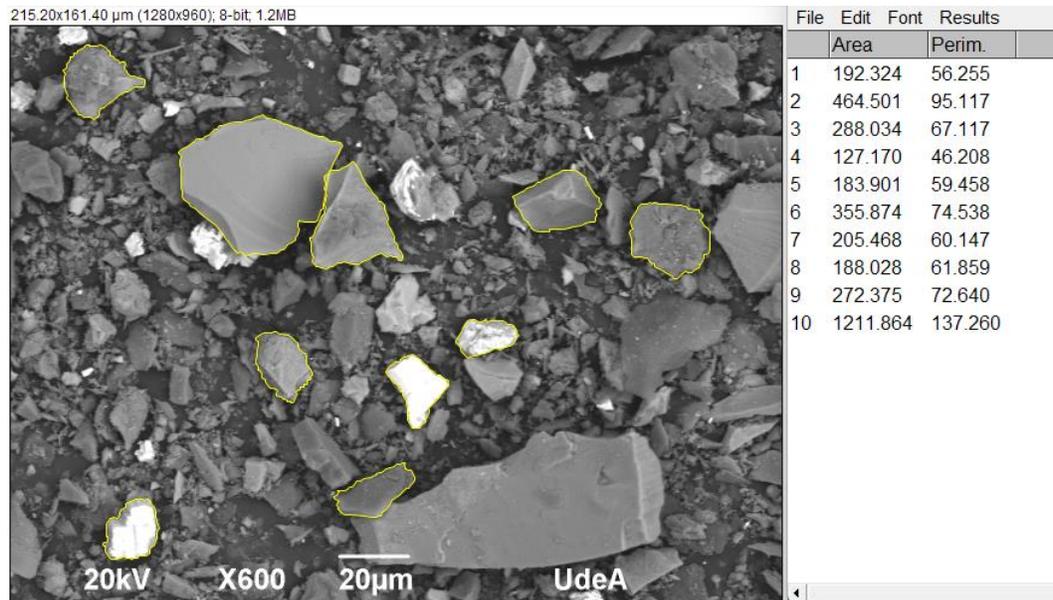
Concentrado flotación.

Concentrado Flotación						
		Área	Perímetro	D mayor	Circularidad	Redondez
IMAGEN 1	1	199,532	55,465	18,000	0,815	0,784
	2	772,944	115,999	40,000	0,722	0,615
	3	1.096,001	124,507	38,000	0,888	0,966
	4	330,999	80,112	27,000	0,648	0,578
	5	255,104	66,227	19,000	0,731	0,900
	6	557,272	105,293	32,000	0,632	0,693
	7	199,674	77,113	33,000	0,422	0,233
	8	524,681	101,963	34,000	0,634	0,578
	9	78,750	37,234	13,000	0,714	0,593
	10	95,484	40,496	12,000	0,732	0,844
Promedio					0,694	0,679
IMAGEN 2	1	227,149	58,801	16,000	0,826	1,130
	2	271,612	71,155	23,000	0,674	0,654
	3	213,637	57,085	18,000	0,824	0,840

	4	155,606	53,168	18,000	0,692	0,611
	5	274,636	73,652	24,000	0,636	0,607
	6	117,277	49,228	15,000	0,608	0,664
	7	286,847	68,981	23,000	0,758	0,690
	8	260,644	71,535	24,000	0,640	0,576
	9	163,464	63,168	21,000	0,515	0,472
	10	602,413	113,323	42,000	0,589	0,435
Promedio				0,676	0,668	
IMAGEN 3	1	192,324	56,255	18,000	0,764	0,756
	2	464,501	95,117	26,000	0,645	0,875
	3	288,034	67,117	23,000	0,804	0,693
	4	127,170	46,208	17,000	0,748	0,560
	5	183,901	59,458	19,000	0,654	0,649
	6	355,874	74,538	23,000	0,805	0,857
	7	205,468	60,147	18,000	0,714	0,807
	8	188,028	61,859	22,000	0,617	0,495
	9	272,375	72,640	22,000	0,649	0,717
	10	1.211,864	137,260	41,000	0,808	0,918
Promedio				0,721	0,733	

Tabla 26. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ concentrado de flotación.





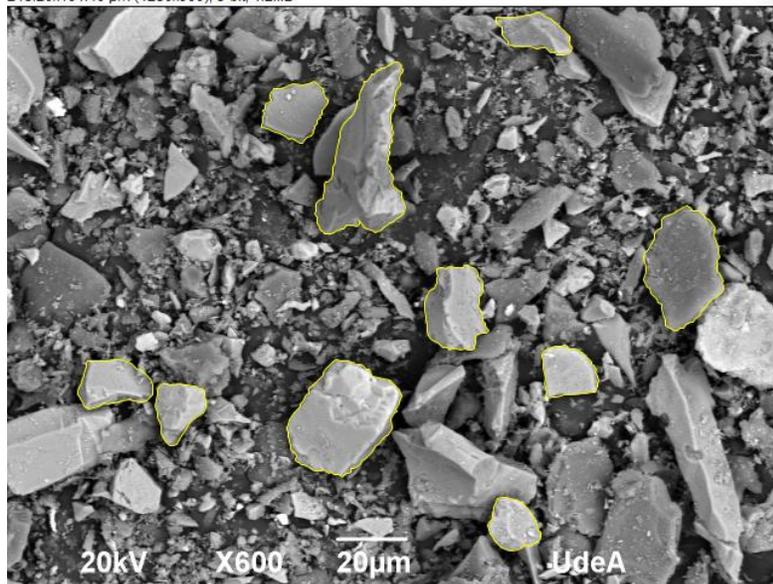
Sedimento espesador #8.

Espesador #8						
		Área	Perímetro	D mayor	Circularidad	Redondez
IMAGEN 1	1	683,764	102,036	32,000	0,825	0,850
	2	690,124	135,058	42,000	0,475	0,498
	3	314,548	72,413	22,000	0,754	0,827
	4	165,443	51,327	17,000	0,789	0,729
	5	153,062	46,390	14,000	0,894	0,994
	6	526,122	92,438	33,000	0,774	0,615
	7	212,196	59,261	19,000	0,759	0,748
	8	156,143	55,249	20,000	0,643	0,497
	9	176,354	51,487	15,000	0,836	0,998
	10	212,450	58,322	19,000	0,785	0,749
Promedio					0,753	0,751
IMAGEN 2	1	488,726	85,486	27,000	0,840	0,854
	2	257,054	65,946	22,000	0,743	0,676
	3	450,990	92,734	32,000	0,659	0,561

	4	1.091,563	131,749	40,000	0,790	0,869
	5	404,181	81,922	25,000	0,757	0,823
	6	111,285	46,536	16,000	0,646	0,553
	7	375,151	79,243	24,000	0,751	0,829
	8	68,122	32,197	10,000	0,826	0,867
	9	127,425	49,047	14,000	0,666	0,828
	10	74,114	34,179	10,000	0,797	0,944
Promedio					0,747	0,780
IMAGEN 3	1	393,270	83,833	29,000	0,703	0,595
	2	631,669	100,257	34,000	0,790	0,696
	3	821,449	116,473	35,000	0,761	0,854
	4	729,273	105,095	32,000	0,830	0,907
	5	1.033,391	151,575	47,000	0,565	0,596
	6	669,828	99,269	28,000	0,854	1,088
	7	193,794	60,938	20,000	0,656	0,617
	8	357,994	77,955	23,000	0,740	0,862
	9	224,548	64,263	23,000	0,683	0,540
	10	97,434	38,706	14,000	0,817	0,633
Promedio					0,740	0,739

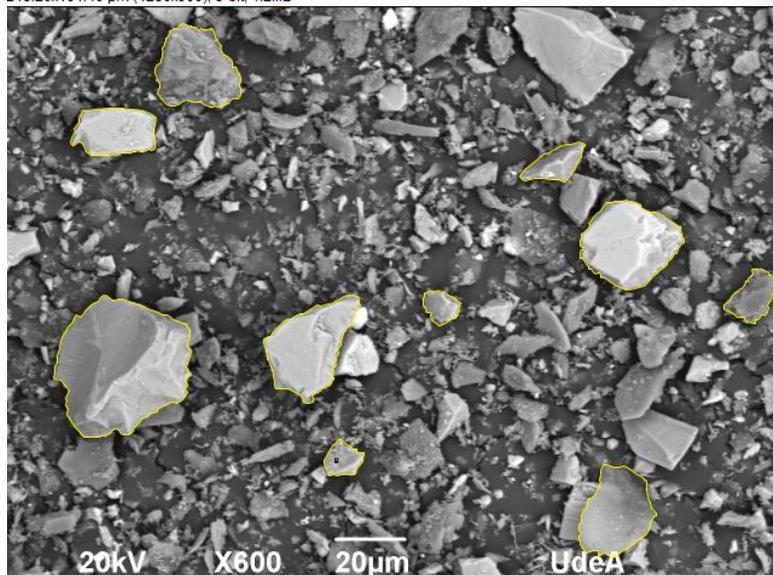
Tabla 27. Resultados procesamiento de imágenes por ImageJ espesador #8.

215.20x161.40 µm (1280x960); 8-bit; 1.2MB

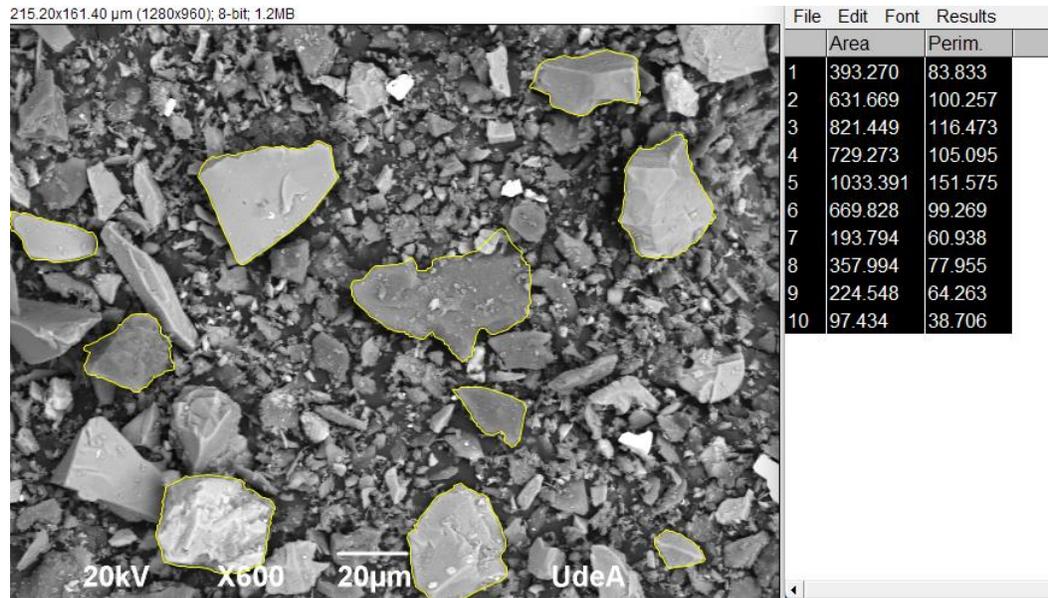


	Area	Perim.
1	683.764	102.036
2	690.124	135.058
3	314.548	72.413
4	165.443	51.327
5	153.062	46.390
6	526.122	92.438
7	212.196	59.261
8	156.143	55.249
9	176.354	51.487
10	212.450	58.322

215.20x161.40 µm (1280x960); 8-bit; 1.2MB

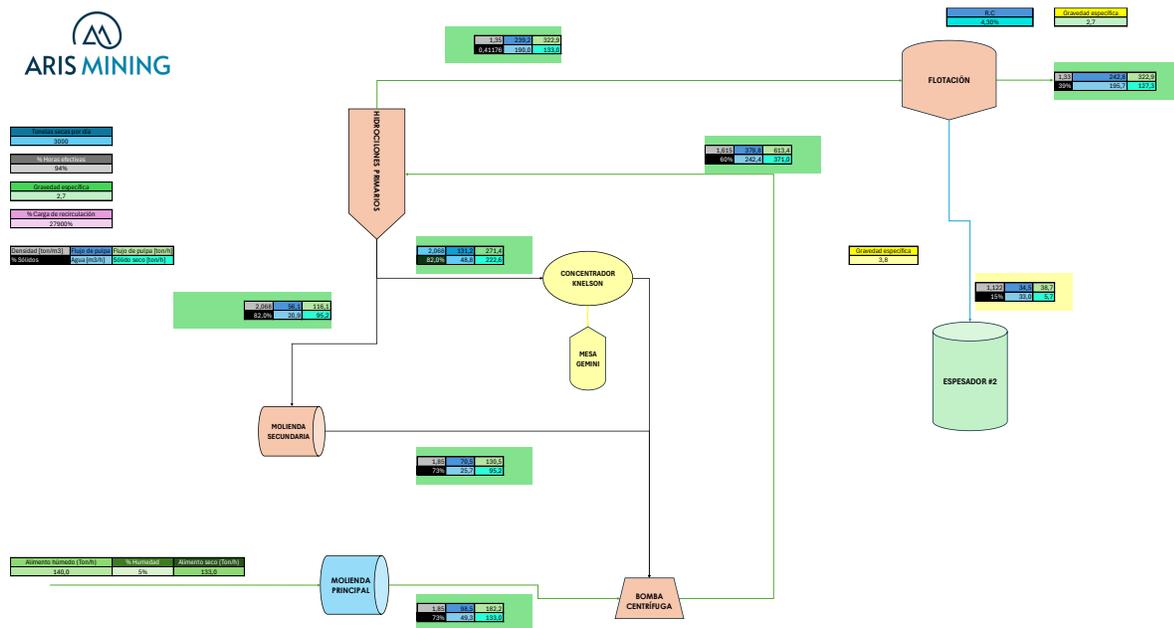


	Area	Perim.
1	488.726	85.486
2	257.054	65.946
3	450.990	92.734
4	1091.563	131.749
5	404.181	81.922
6	111.285	46.536
7	375.151	79.243
8	68.122	32.197
9	127.425	49.047
10	74.114	34.179



Vista previa modelación realizadas para el proceso de expansión.

Vista previa modelación en el circuito de molienda y flotación.



Vista previa modelación en el circuito de lixiviación y Merrill Crowe.

