

**Estudio de fisicoquímica de superficies de la flotación de minerales polimetálicos de
la zona minera de California Santander**

Yelissa Nathalia Botia Moreno

Trabajo de Grado para Optar el título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Walter Pardave Livia

Magister en Ingeniería Metalúrgica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Bucaramanga

2020

Agradecimientos

La autora de esta tesis de grado expresa su agradecimiento a:

La escuela de ingeniería Metalúrgica y a todo el personal docente por ser parte de este proceso de aprendizaje y contribuir a una formación integral.

A mi director, Msc Walter Pardavé Livia, por su paciencia y asesoría la cual guio a lo largo de la realización de este proyecto.

Al ingeniero de minas Hamel Roy Bello el cual me permitió ser parte de este proyecto y me brindo su asesoría en este proceso.

A la ingeniera Yenni Santamaría por su asesoría y compañía en la realización de este proyecto.

Al proyecto Coexistencia minera, por facilitarnos la materia prima que nos sirvió de apoyo para la realización de nuestro proyecto incursionando en nuevas áreas del conocimiento.

Ambrosio Carrillo Carrillo y Javier Gaitán técnicos de la escuela de ingeniería metalúrgica, por su buena disposición y colaboración en varias pruebas experimentales que se desarrollaron.

Al personal del laboratorio de electrometalurgia de Guatiguara, por su apoyo condicional en los ensayos y análisis de Ángulo de contacto, dándonos una ayuda para la realización de esta tesis de grado. Un gran respeto y admiración.

Finalmente, a todas las personas que participaron indirecta y directamente en el proyecto; Docentes, amigos y técnicos que acompañaron en el transcurso de la elaboración de esta tesis de grado.

Muchas gracias.

Dedicatoria

Este logro está dedicado a Dios por permitirme vivir esta experiencia, bendiciéndome con salud y dándome la fortaleza necesaria para afrontar con sabiduría todos los retos que se me presentaron a lo largo de la carrera.

A mis padres por darme la oportunidad de ingresar a la universidad y estar conmigo en todos los momentos difíciles, brindándome amor y enseñándome los valores necesarios para hacer frente a cualquier dificultad que se presentaba.

A mi hermana Laura Botía la cual representa todo lo que admiro y como siempre se lo he dicho, es mi ejemplo a seguir y una de las razones por las que ingrese a la universidad y elegí esta carrera, además de esto por su amor, paciencia, comprensión, y por estar siempre para mí cuando lo necesito.

A la familia Luna Moreno por brindarme la mano en los momentos más difíciles por los que he pasado. Gracias por creer en mí siempre les estaré infinitamente agradecida.

A mi tío Kiko y mis primos Cristian Moreno y Juan Rodríguez que siempre han estado presentes en todos los momentos de mi vida y por darme motivación para poder cumplir este sueño.

A mi amigo de la vida David Cornejo por ser esa persona incondicional que siempre está para mí en mis peores momentos y en los mejores, gracias infinitas por todo.

A mis amigos Pacho, Camila, Daniela, Nicolás, Jefferson, Hernan y Laura B por todas las vivencias hermosas que me permitieron crecer como persona.

A mis amigos de la universidad Andrea Carrillo, German Arciniegas, Gustavo, Elkin, Posso, Daniela T, Andrea G, Ricardo V, Milton, Jeison Marce y todos los que hicieron parte de este proceso. Gracias por estar conmigo, sin ellos sé que el camino hubiera sido más difícil.

A toda la comunidad IMET estudiantes, profesores, técnicos y administrativos, por permitirme conocerlos y aprender de cada uno de ellos, en especial a Patricia Rodriguez por tener tanta paciencia, amor y comprensión en su trabajo, de verdad estoy profundamente agradecida.

Al consejo de escuela por forjar valores en mí como la responsabilidad y demás habilidades que ayudaron a complementar mi formación como profesional y como persona, en especial al profe Sergio Blanco por acompañarme en todo mi proceso como representante, sin él hubiera sido muy difícil cumplir todos los logros alcanzados.

Por último, a todos mis familiares y amigos, por su apoyo incondicional y animarme a continuar siempre, por compartir su vida en todo momento.

Yelissa Nathalia Botía Moreno

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	12
1 Objetivos	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos Específicos	13
2 Marco teórico	14
2.1 Teoría de la flotación	14
2.2 Hidrofobicidad:	15
2.3 Angulo de contacto entre superficie mineral y colector	16
2.4 Selección de reactivos de flotación	18
2.4.1 Xantato isopropilico de sodio	18
2.4.2 Xantato amílico de potasio	18
2.4.3 Ditiofosfato AR-G431	19
2.4.4 Ditiofosfato AR-1404	19
3 Metodología	20
3.1 Revisión bibliográfica	20
3.2 Adquisición y muestreo del mineral:	20
3.3 Caracterización física del mineral de la mina:	20
3.4 Pruebas de hidrofobicidad y de hidrofiliidad de superficies	20
3.5 Pruebas de flotación Bulk y flotación selectiva	20
3.6 Análisis de resultados e informe final	20

4 Resultados y discusiones.....	21
4.1 Mineralogía asociada al yacimiento de coexistencia	21
4.1.1 Ensayos al fuego... ..	21
4.1.2 Análisis macroscópico del muestreo.....	21
4.1.3 Evaluación de composición mediante técnica de microscopía SEM.	22
4.1.4 Análisis de láminas delgadas.....	23
4.2 Medición del ángulo de contacto	27
4.3 Flotación bulk.....	28
4.4 Flotación selectiva.....	30
5 Conclusiones	34
Referencias bibliográficas.....	35
Apendice	37

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación xantato isopropilico de sodio	18
Tabla 2. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación xantato amílico de potasio	18
Tabla 3. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación Ditiofosfato AR-G431	19
Tabla 4. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación Ditiofosfato AR-1404	19
Tabla 16. Condiciones para flotación de cobre- Rougher	31
Tabla 17. Condiciones para flotación de cobre- Cleaner.....	31
Tabla 18. Condiciones para flotación de pirita-Rougher.....	31
Tabla 19. Condiciones para flotación de pirita-Cleaner	32

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. Mecanismo de Flotación de minerales	15
Figura 2. Balance de energía entre la superficie, líquido y gas.	18
Figura 15. Área seleccionada para el análisis SEM	27
Figura 16. Mosaico de muestra #4 correspondiente a veta 1	27
Figura 17. Comparación entre % de recuperación en las diferentes pruebas de flotación bulk. ..	29
Figura 18. Flowsheet para el circuito de flotación selectiva de espumas	31

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. Análisis macroscópico de muestreo de minerales de Coexistencia	37
Apéndice B. Minerales identificados mediante análisis macroscópico	38
Apéndice C. Análisis SEM mineral cabeza	38
Apéndice D. Análisis Sección 2-región 1-1	39
Apéndice E. Análisis S2-región 1-2	40
Apéndice F. Análisis S2-región 1-3	40
Apéndice G. Análisis S2-región 1-4	40
Apéndice H. Análisis S2-región 1-5	41
Apéndice I. Análisis S2-región 1-6	41
Apéndice J. Análisis S2-región 1-7	42
Apéndice K. Análisis S2-región 1-8	42
Apéndice L. Análisis S2-región 2	43
Apéndice M. Análisis S2-región 3	43
Apéndice N. Análisis S2-región 3	43
Apéndice O. Medida de ángulos de contacto obtenidos entre probetas de mineral y los reactivos de flotación	44
Apéndice P. Diseño de pruebas de flotación bulk	45
Apéndice Q. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Au	45
Apéndice R. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Ag	46
Apéndice S. Análisis estadístico del efecto del % de sólidos en flotación bulk	46
Apéndice T. Análisis estadístico del efecto de la granulometría en flotación bulk	47
Apéndice U. Análisis estadístico del efecto del consumo de reactivo en flotación bulk	47

Resumen

Título: Estudio de fisicoquímica de superficies de la flotación de minerales polimetálicos de la zona minera de California-Santander*

Autor: Yelissa Nathalia Botia Moreno**

Palabras Clave: FLOTACION, MINERALES POLIMETALICOS, REACTIVOS QUIMICOS.

Descripción: En el presente proyecto se realizó la caracterización y pruebas preliminares para el análisis de la fisicoquímica de superficies del mineral polimetálico de la zona minera de California-Santander, con el fin de evaluar su potencial para la extracción del mineral mediante el proceso de flotación. Se realizó la caracterización física y química del mineral mediante ensayo al fuego, análisis macroscópico, microscopía SEM y el análisis de secciones delgadas para determinar los elementos presentes en las muestras, donde se encontró que el oro (Au) está asociado a la pirita y a los sulfuros de cobre (Cu), posteriormente se realizaron las pruebas de Angulo de contacto con diferentes reactivos como el Xantato isopropílico de sodio, Xantato amílico de potasio, Ditiofosfato AR-G431 y Ditiofosfato AR-1404 para observar el comportamiento del mineral con los reactivos, donde se pudo evidenciar que el Xantato isopropílico de sodio exhibió el mejor comportamiento en las pruebas de Angulo de contacto y con base a este resultado se utilizó este reactivo en las pruebas de flotación Bulk variando la cantidad de reactivo, porcentaje de sólidos y diferentes tamaños de partícula, donde la mejor recuperación se obtuvo con el aumento del porcentaje de sólidos, un menor tamaño de mineral y un mayor contenido de reactivo; obteniendo un porcentaje de recuperación de oro de hasta del 68% y de plata hasta de 82,6%, adicional a lo anterior se realizaron pruebas de flotación selectiva por medio del cual se tuvo como objetivo, la obtención de un primer concentrado de cobre y un segundo de pirita aurífera; en ese sentido, se planteó el circuito: ROUGER - CLEANER – SCAVENGER, para cada concentrado, variando el pH, concentración y volumen de reactivos, tiempo de acondicionamiento y flotación en cada etapa.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: Magister en ingeniería metalúrgica. Walter Pardave L.

Abstract

Title: Study of physical chemistry of surfaces of the flotation of minerals polimetálicos of the mining zone of California-Santander *

Author: Yelissa Nathalia Botia Moreno**

Key Words: FLOTATION, POLYMETALLIC MINERALS, CHEMICAL REAGENTS

Description: In this project, the characterization and preliminary tests were carried out for the analysis of the physicochemical surfaces of the polymetallic mineral from the California-Santander mining area, in order to evaluate its potential for the extraction of the mineral through the flotation process. A physical and chemical characterization of the mineral was carried out through fire testing, macroscopic analysis, SEM microscopy and analysis of thin lamias in order to know the elements present in the samples, it was found that Au is associated with pyrite and Cu to the sulphides, After that, the contact angle tests were carried out with different reagents such as sodium isopropyl xanthate, potassium amyl xanthate, Dithiophosphate AR-G431 and Dithiophosphate AR-1404 to observe the behavior of the mineral with the reagents, in these results it could be observed that the isopropyl sodium xanthanth is the one that had the best performance in the contact angle tests and based on this result, this reagent was used in the bulk flotation tests varying the amount of reagent, percentage of solids and different particle size, the best recovery was obtained with an increase in the percentage of solids, a smaller mineral size and a higher reagent content ; There is a maximum recovery of gold of 68% and of silver of 82.6%, in addition to this, selective flotation tests were carried out through which the objective was to obtain a first copper concentrate and a second of auriferous pyrite; In this sense, the circuit was proposed: ROUGER - CLEANER - SCAVENGER, for each concentrate, varying the pH, amount of reagents, conditioning time and flotation in each stage.

* Degree Work (sort, research work)

** Department of Physicochemistry engineering. School of metallurgical engineering and science of the materials.

Introducción

Actualmente, el sector minero hace un aporte importante en regalías y, sin duda, es muy valioso para Colombia, en virtud a que representa el 15% de la inversión extranjera directa; el 27% de las exportaciones nacionales y cerca del 2% del PIB [2] lo cual significa que este sector va a ser de vital importancia para la reactivación económica de nuestro país [8].

Con base a lo anterior y partiendo del hecho del valor internacional del oro, la academia ha venido aumentando la investigación y análisis de las propiedades fisicoquímicas de los minerales de cada una de las zonas mineras del país, donde se contemplan las pruebas de granulometría y la caracterización mineralógica del mineral de California Santander, pruebas de fisicoquímica de superficies como lo son Angulo de contacto y las mediciones respectivas de tensión superficial, las cuales se deben realizar de la manera más cuidadosa y consistente con el fin de disminuir la incertidumbre de los ensayos y por ende obtener resultados de mayor confiabilidad que se puedan reproducir, si las pruebas tienen algún error sea por el tamaño de partícula o una mala utilización de reactivos puede provocar una pérdida del mineral concentrado.

El presente estudio tiene como objetivo establecer la mayor recuperación posible de un pre-concentrado de oro el cual va asociado a otros metales como la plata y el cobre para así poder seleccionar los reactivos más adecuados teniendo en cuenta el tiempo óptimo de flotación, el efecto de cambio en la dosis del reactivo, los porcentajes de solido de la partícula deseada y otros parámetros para el proceso.

Uno de los objetivos principales además de encontrar el reactivo más adecuado para este mineral es mejorar la recuperación de oro en un pre-concentrado de minerales en el proceso de flotación y también optimizar el consumo de reactivos, adicional establecer una estrategia en el planteamiento de pruebas experimentales para identificar las interacciones entre cada una de las variable.

1. Objetivos

4.1 Objetivo General

Establecer condiciones operativas de la flotación bulk y flotación selectiva de minerales polimetálicos de la zona minera de California Santander a partir del estudio de la interfase mineral- colector y burbuja mineralizada.

4.2 Objetivos Específicos

- 1) Caracterizar granulométricamente y mineralógicamente el mineral polimetálico de la zona minera de California Santander
- 2) Determinar la hidrofobicidad libre del mineral polimetálico y la hidrofocidad con el reactivo colector mediante pruebas a nivel de laboratorio
- 3) Establecer las condiciones operativas más adecuadas para la flotabilidad bulk y flotación selectiva del mineral polimetálico de California Santander.

2. Marco Teórico

El oro en la zona de California Santander se encuentra, generalmente en pequeñas cantidades y su mineralización da origen a la formación de diferentes yacimientos, a continuación se mostrara.

Los diferentes tipos de rocas presentes en la región de California, pueden agruparse en tres conjuntos litológicos. El primero está constituido por rocas metamórficas de alto grado, complejamente deformadas y representan las rocas más antiguas de la zona. El segundo conjunto agrupa los cuerpos intrusivos, los stocks y diques de roca porfirítica. Conformando el tercer conjunto y localizadas al norte de California, se encuentran rocas sedimentarias del Cretáceo [4].

En la zona de estudio se encuentra el oro encapsulado entre la bornita y la pirita lo cual nos dice que su recuperación no es eficiente por medio de mesa concentradora Wifley, además de la problemática ambiental por el uso de mercurio para la etapa final de limpieza.

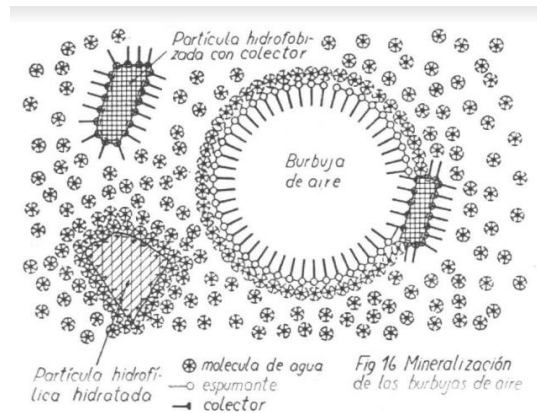
La flotación como alternativa para la eliminación del uso del mercurio y máxima recuperación de oro con un capital mínimo de inversión y al mismo tiempo obtener el ingreso neto más alto ya que se tienen ventajas como costos operativos bajos porque se puede usar equipos más pequeños como lo son el molino de bolas lo cual disminuye el consumo de bolas, forros y energía, uso de tanques pequeños así como otros equipos de menor tamaño. El costo de inversión es bajo, y el mantenimiento es más simple [1].

2.1 Teoría de la flotación

La flotación, es un proceso fisicoquímico, en el cual se aprovechan las propiedades termodinámicas de los minerales, considerando su habilidad para hidratarse o no. Para la

comprensión del proceso, es necesario, reconocer 3 fases presentes 2 interfaces y un punto triple [3].

Figura 1. Mecanismo de Flotación de minerales



Fuente: (Carmina Oyarzun, 2019)

2.2 Hidrofobicidad:

Para mejorar la eficiencia de separación de minerales valiosos de ganga se necesita saber la característica de humectación de las superficies minerales, para esto es útil el Angulo de contacto que proporciona la característica hidrofóbica en las superficies solidas minerales gracias a la relación que existe con la flotabilidad de los minerales [5].

La calidad de la superficie y su limpieza es importante a la hora de la medición del ángulo de contacto sobre superficies planas, estas medidas son difíciles e inciertas cuando el ángulo es menor a 20°, debido a la alta sensibilidad al error experimental [5].

En las superficies planas y sólidas se utiliza una medida directa del ángulo, viendo el perfil de la gota. Un telescopio goniómetro se puede utilizar para ver la gota puesta en superficie plana y medir el perfil del contacto. Una imagen de la gota en reposo o de la adhesión de la burbuja se puede proyectar en una pantalla y trazar los contornos, midiéndose el ángulo con un transportador, esto se debe ir registrando permanentemente. La precisión se refuerza por el uso

de aumentos relativamente altos (hasta 50 veces) que permiten el examen detallado de la intersección del perfil de caída y la superficie sólida [5].

2.3 Ángulo de contacto entre superficie mineral y colector

Para obtener información sobre la hidrofobicidad de las partículas y su relación con los grupos iónicos del agua del mineral se tiene que analizar la termodinámica de la flotación [3].

En los sistemas bifásicos como lo son: sólido-líquido, sólido-gas o líquido-gas, una característica importante es que en la interfase tienen una gran cantidad de enlaces rotos, estos producen una actividad química superficial [3]

Si en un punto se tienen dos fases α y β y una interface M, entre las dos fases la energía libre G será [3]:

$$dG = dG^{\alpha} + dG^{\beta} + dG^M \quad (1)$$

Se puede determinar para las fases α , β y para la interface M, propiedades termodinámicas, también es necesario observar la energía libre de cada fase y de la interfase[3]:

Para la fase α :

$$dG^{\alpha} = -S^{\alpha} dT + P^{\alpha} dV + \sum n_i^{\alpha} dn_i \quad (2)$$

Para la fase β :

$$dG^{\beta} = -S^{\beta} dT + P^{\beta} dV + \sum n_i^{\beta} dn_i \quad (3)$$

Para la interface M:

$$dG^M = -S^M dT + \gamma dA + \sum n_i^M dn_i \quad (4)$$

Ahora teniendo la tensión superficial γ :

$$dG = dG^{\alpha} + dG^{\beta} + dG^M \quad (5)$$

$$dG = -S^{\alpha} dT + P^{\alpha} dV + \sum n_i^{\alpha} dn_i + -S^{\beta} dT + P^{\beta} dV + \sum n_i^{\beta} dn_i + -S^M dT + \gamma dA + \sum n_i^M dn_i$$

Se toma como parámetro que la temperatura, el volumen y la composición sean fijos:

$$dG = \gamma dA \quad (6)$$

Por medio de la siguiente ecuación se puede relacionar la energía libre superficial y la tensión superficial, donde E y A son la energía libre y el área de la interfase[10] :

$$\gamma = \left[\frac{dG}{dA} \right]_{T,P,n} \quad (7)$$

γ : tensión superficial, dinas/cm

G: energía libre, ergios/cm²

A: área, cm²

Las siguientes ecuaciones se dan para la adhesión partícula- burbuja de aire, el primer caso es cuando la partícula y la burbuja están separadas y el segundo caso es cuando la burbuja y la partícula están unidas:

$$G_1^S = \gamma^{LG} + \gamma^{SL} \quad (8)$$

$$G_2^S = \gamma^{SG} \quad (9)$$

A continuación, se tiene la ecuación para la energía de adhesión:

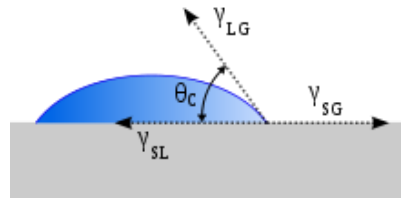
$$\Delta G_{adh}^0 = \gamma^{SG} - \gamma^{SL} - \gamma^{LG} \quad (10)$$

Solamente la tensión liquido-gas γ^{LG} es medible.

El ángulo de contacto es el parámetro que mide la mojabilidad o hidrofobicidad, y éste, es el ángulo formado entre la tangente a la gota y la superficie plana del sólido, a partir de del concepto de tensión superficial entre un líquido y un sólido y con la ecuación de Young se puede relacionar el ángulo de contacto (θ) de una gota de líquido (L) depositado sobre una superficie plana sólida (S) [3].

La siguiente imagen [9] muestra el balance de energía superficial que existe entre la superficie, líquido y gas, si $\Delta G_{adh}^0 < 0$ la adhesión ocurre espontáneamente.

Figura 2. Balance de energía entre la superficie, líquido y gas.



Fuente: (ATRIA INNOVATION, 2016)

2.4 Selección de reactivos de flotación

1) Xantato isopropílico de sodio

Tabla 1. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación xantato isopropílico de sodio

Campo de aplicación	Propiedades	Modo de empleo
Este xantato debido a su elevado poder colector se utiliza en la flotación de minerales complejos de plomo-zinc y cobre-hierro en los cuales los principales minerales sulfurados son calcopirita, calcoita, enargita, galena, pirita y pirrotina. Otra de sus aplicaciones incluye la concentración de cobre nativo, plata, oro y los sulfuros de hierro que contienen cobalto o níquel, así como la recuperación de pirritas de hierro	Los Xantatos no son espumantes y por lo tanto pueden emplearse en cualquier proporción necesaria, sin peligro de producir espumación excesiva. Esto hace posible que, mediante el uso de agentes espumantes no colectores en combinación con los xantatos, se logre un control altamente flexible y separado de la acción colector y espumante, lo cual es una gran ventaja para mantener las condiciones adecuadas de flotación, durante los cambios de mineral. Los xantatos son soluciones ácidas con un pH inferior a 6.0	La preparación de diluciones para su dosificación es recomendable por cuanto al agregarse resulta más exacto y un mejor de control de la dosificación del reactivo.

Fuente: Hoja técnica productos FLOTTEC 2018

2) Xantato amílico de potasio

Tabla 2. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación xantato amílico de potasio

Campo de aplicación	Propiedades	Modo de empleo
Este xantato, es muy empleado generalmente en aquellas operaciones de flotación que requieren el	Los Xantatos no son espumantes y por lo tanto pueden emplearse en cualquier proporción necesaria, sin peligro	La preparación de diluciones para su dosificación es recomendable por

<p>más alto grado de poder colector. Se usa en flotación de minerales sulfurosos de cobre, plomo, zinc, níquel, cobalto, etc.</p> <p>Colector típico para la flotación de sulfurosos manchados o minerales oxidados de cobre y plomo, se aplica con especial éxito en la flotación de la pirita que contiene oro.</p>	<p>de producir espumación excesiva.</p> <p>Esto hace posible que, mediante el uso de agentes espumantes no colectores en combinación con los xantatos, se logre un control altamente flexible y separado de la acción colectoras y espumante, lo cual es una gran ventaja para mantener las condiciones adecuadas de flotación, durante los cambios de mineral. [11]</p>	<p>cuanto al agregarse resulta más exacto y un mejor de control de la dosificación del reactivo.</p>
---	--	--

Fuente: Hoja técnica productos FLOTTEC 2018

3) Ditiófosfato AR-G431

Tabla 3. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación Ditiófosfato AR-G431

<u>Campo de aplicación</u>	<u>Propiedades</u>	<u>Modo de empleo</u>
<p>Es un promotor excelente para plata, combina un buen poder colector con buena selectividad contra los sulfuros de hierro. Posee al igual que los otros Ditiófosfatos una considerable selectividad con respecto a la pirita en circuito alcalino. Este reactivo es especialmente útil en la flotación de calcopirita en presencia de pirita cuando se desea su selectividad.</p>	<p>El ditiófosfato AR-G431 es un colector especialmente para menas de plomo y plata. Este reactivo es usado en la flotación de plata y para incrementar la recuperación de cobre como subproducto [12]</p>	<p>Aplicar directamente.</p>

Fuente: Hoja técnica productos FLOTTEC 2018

4) Ditiófosfato AR-1404

Tabla 4. Propiedades, modo de empleo y campo de aplicación Ditiófosfato AR-1404

<u>Campo de aplicación</u>	<u>Propiedades</u>	<u>Modo de empleo</u>
<p>Es ampliamente usado en circuitos alcalinos para minerales empañados y secundarios de cobre, plomo, zinc y metales preciosos. También se ha usado con éxito en la flotación de pirita en circuitos ácidos con pH de 4 a 6, probándose ser muy eficaz, por lo que se considera a este colector como un promotor excelente para la flotación de pirita aurífera.</p>	<p>Este reactivo es usado en la flotación de minerales oxidados de cobre después de la sulfurización. Se usa también este promotor como colector secundario conjuntamente con xantatos y ditiófosfatos en la flotación de minerales sulfurosos de cobre, plomo y zinc. [13]</p>	<p>Aplicar directamente.</p>

Fuente: Hoja técnica productos FLOTTEC 2018

3. Metodología.

3.1 Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica consiste en consultar artículos, revistas y publicaciones referentes al tema del proyecto el cual es la flotación de polimetales de oro y cobre. Esta es una etapa que no solo se desarrollara en la etapa inicial, sino que se hará consulta y revisión constante a lo largo de todas las etapas del proyecto.

3.2 Adquisición y muestreo del mineral:

Las muestras serán suministradas directamente por la empresa minera. Se realizara su respectivo muestreo y almacenamiento para evitar alteraciones de las muestras.

3.3 Caracterización física del mineral de la mina:

Se realiza una caracterización mediante pruebas preliminares de beneficio de minerales tales como: trituración, molienda, análisis granulométrico y microscopía.

3.4 Pruebas de hidrofobicidad y de hidrofiliidad de superficies

Luego de la caracterización del mineral se realiza pruebas de tensión superficial y ángulo de contacto para conocer la fisicoquímica de superficie del mineral y conocer cuál es el reactivo más adecuado para su flotación.

3.5 Pruebas de flotación Bulk y flotación selectiva

Se realizaran pruebas de flotación Bulk y flotación selectiva para conocer cuánto oro se obtiene con cada reactivo.

3.6 Análisis de resultados e informe final

Se analizan los resultados obtenidos de las pruebas experimentales, se escribe el libro del proyecto de grado y se sustenta oralmente.

4. Resultados y discusiones.

4.1 Mineralogía asociada al yacimiento de coexistencia

4.1.1 Ensayos al fuego

Para determinar el contenido metálico de los concentrados minerales, así como de los minerales de cabeza (alimentación al molino), se realizó el ensayo al fuego al mineral, el cual consiste en producir una fusión de la muestra usando reactivos y fundentes adecuados para obtener dos fases líquidas: una escoria constituida principalmente por silicatos complejos y una fase metálica constituida por plomo, el cual colecta los metales de interés (Au y Ag) de la muestra. El desarrollo de la metodología de este ensayo se realizó en el Laboratorio de Pirometalurgia UIS, realizando 2 pruebas por duplicado, donde se obtuvieron los siguientes tenores para el compósito:

4,58 g/ton de Au.

17,2 g/ton de Ag.

4.1.2 Análisis macroscópico del muestreo

El análisis macroscópico de las muestras recibidas en el laboratorio, presentan como mineral predominante al cuarzo, seguido por feldespatos, arcillas, sulfuros, pirita, en menor proporción, calcopirita, magnetita, bornita, sericita, moscovita y porcentajes menores de tierras raras.

Para evaluar la mena del yacimiento, se utilizó técnicas de petrografía y estereoscopia, con el fin de determinar las principales asociaciones de los metales preciosos de interés: el oro y

la plata. La ganga por su parte, se encontró que está compuesta en mayor porcentaje por cuarzo, feldespatos alterados y arcillas.

Por otro lado, se identificó que el mineral portador del oro es la pirita y los sulfuros de cobre, según los resultados de microscopía electrónica de barrido SEM, en mayor porcentaje oro de tipo electrum (Au-Ag), oro asociado a telurios y algunas partículas de oro nativo. Este mineral se encuentra como inclusión en la pirita y rellenando fracturas.

Para el caso del cobre se estableció que los minerales portadores son la calcopirita, la bornita y la covelita. En la Tabla 5A, presenta el análisis macroscópico de las muestras realizado en el laboratorio de petrografía, de la Escuela de Geología UIS.

Para mejor comprensión, tener en cuenta las abreviaciones: Py: pirita; Qtz: cuarzo; Mag: Magnetita; Pl: plagioclasa; Ep. Epidota; bn: bornita; kao: kaolinita; ftp- K: feldespato potásico; Cp: calcopirita.

Sumado a lo anterior, en la Tabla 6B, se presenta un resumen de la composición global media de los principales minerales presentes en la zona de coexistencia.

4.1.3 Evaluación de composición mediante técnica de microscopía electrónica de barrido - SEM.

Se realizaron al mineral una serie de análisis mediante la técnica de microscopía de barrido en el Laboratorio de la UIS, Sede Guatiguará, con el fin de determinar la composición mineralógica y a la vez visualizar de una manera más acertada la ocurrencia del oro presente en la mena del depósito mineral, asociado al programa de coexistencia minera. Estas pruebas validan la información del estudio macroscópico realizado al mineral en un primer evento.

Basados en los resultados obtenidos en el análisis SEM del mineral cabeza, se pudo asociar los elementos dominantes con determinado mineral, para establecer así, el tipo de compuesto asociado. Los resultados se muestran en la Tabla 7C.

4.1.4 Análisis de láminas delgadas

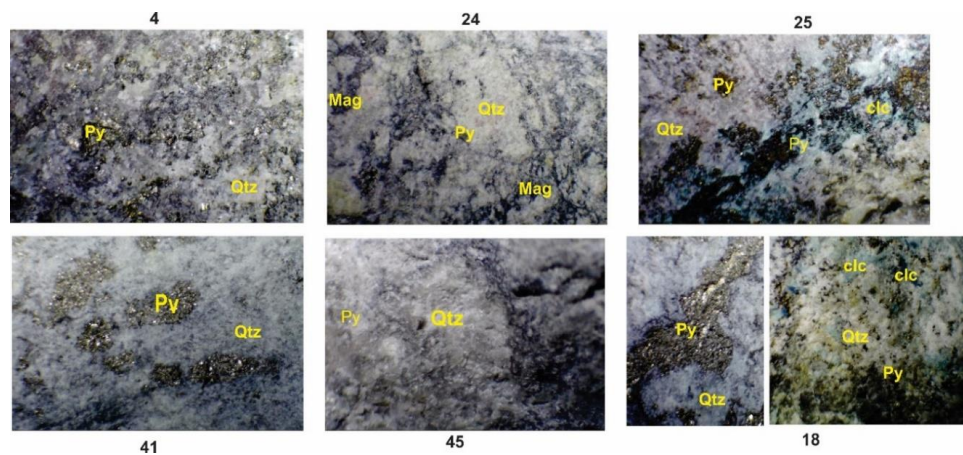
Para el análisis de láminas se selecciona una muestra de roca de interés para extraer una sección o una lámina delgada y así poder obtener información mineralógica que permita la caracterización de una determinada zona de estudio, estas láminas tienen un espesor aproximado de 30 μm y permiten la descripción microscópica de las rocas. La descripción microscópica consiste en la determinación y descripción de los minerales constituyentes de la roca, las asociaciones, aspectos texturales, secuencias de formación mineral, porcentajes cualitativos, alteraciones y finalmente la clasificación de la roca.

Para el presente estudio se realizaron seis secciones delgadas las cuales además del análisis petrográfico con microscopio de luz transmitida se estudiarán mediante análisis en microscopio electrónico de barrido (SEM) con el fin de verificar el estado de los minerales metálicos de interés (Au-Ag) en el depósito de mena. La microscopía electrónica de barrido (SEM) a diferencia del microscopio de luz transmitida permite observar las características petrográficas de estos minerales que al ser opacos no pueden ser vistos en luz transmitida y se hace necesario utilizar un microscopio de luz reflejada o en su defecto otras técnicas de análisis como el SEM, el cual da una estimación de los elementos presentes en un punto específicamente elegido para el análisis.

Se seleccionaron por cada lámina 4 zonas de interés en las cuales se esperaba la presencia de Au y Ag, el tiempo que se estimó para el estudio de cada sección en el laboratorio de microscopía fue de 3 horas, las suficientes para garantizar una correcta determinación de los

minerales presentes. Este tipo de análisis permite observar también la relación entre los minerales o fases minerales, aquellos minerales con los cuales se encuentra asociado el Au y Ag en este yacimiento. En la figura 3 se observa los análisis SEM realizados para las muestras elegidas para análisis de láminas delgadas, se escogen dichas muestras debido a su alta concentración de especies valiosas.

Figura 3. SEM de muestras elegidas (Muestras 4, 24, 25, 41, 45, 18) para sección delgada obtenidas en estereomicroscopio del parque tecnológico UIS Guatiguará



Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Las secciones delgadas fueron realizadas para muestras con altos tenores de Au, Ag y Cu. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

En esta primera muestra se observa calcopirita presentándose como inclusión en la pirita que corresponde al cristal de mayor proporción observado en el Figura 4D, para esta primera región se identificaron otros minerales que se describirán a continuación.

Wittichenita: La wittichenita es un sulfuro anhidro de cobre y bismuto, Aparece en vetas de alteración hidrotermal junto con otros minerales del bismuto. Este es el mineral encontrado en Sección 2-1-2 (Figura 5E).

En esta región S2-1-3 (Figura 6F) se observa un cristal de pirita fracturado (gris claro) en el cual se observan algunas partículas más claras con tamaños de 2 –10 μm que puede corresponder a algún tipo de oro, en las siguientes imágenes se aclara esta observación.

En la sección 2 region 1-4 (Figura 7G) se puede observar que en este punto de la primera región se encuentra una especie mineralógica de minerales de teluro por cuya composición podría tratarse de Petzita o Silvanita, presentando un tamaño de 7.627 μm , en la tabla 8 podemos observar como el Au se asocia a minerales de Te.

Tabla 8. Oro asociado a minerales de Te

Mineral	Composición	Ref.
Paratelerita*	TeO ₂	(37)
Denningita*	(Ca,Mn) (Mn,Zn) Te ₄ O ₁₀	(38)
Spiroffita*	(Mn,Zn) ₂ Te ₃ O ₈	(24)
Petzita*	Ag ₃ AuTe ₂	(4 y 5)
Silvanita**	AgAuTe ₄	(4 y 5)
Calaverita**	AuTe ₇	(4 y 5)

Fuente: Recursos y alternativas de tratamiento para los minerales de teluro de Sonora (México). S. Aguayo; E. Pérez y M.A. Encinlas. 1995

En esta región S2-1-5 (Figura 8H) nuevamente encontramos minerales de teluro que podría tratarse igualmente de Silvanita.

Telurita: Seguido a la especie mineral anterior se encuentra esta especie con una concentración de Teluro diferente, el mayor porcentaje es de este elemento, usando la Figura 9I

mencionada anteriormente se podría clasificar como Telurita o Teluro nativo con algunas impurezas a causa de error en el proceso.

Se observa en la sección 2 región 1-7 (Figura 10J) a la pirita, conformando el mineral principal de la muestra (gris claro) y es el sulfuro que se encuentra en mayor concentración

Feldespatos K: En la sección 2 región 1-8 (Figura 11K) según las características composicionales de esta región (gris oscuro) observadas mediante microscopia electrónica se puede inferir que se trata de feldespatos potásico o algún aluminosilicato.

La asociación mineral en la región S2-2 (Figura 12L) la componen sericita, pirita, calcopirita, teluro. En esta región se pueden observar varias partículas que composicionalmente se relaciona a los teluros encontrados en la región anterior; además se visualiza su dimensión promedio desde 2 a 4 μm .

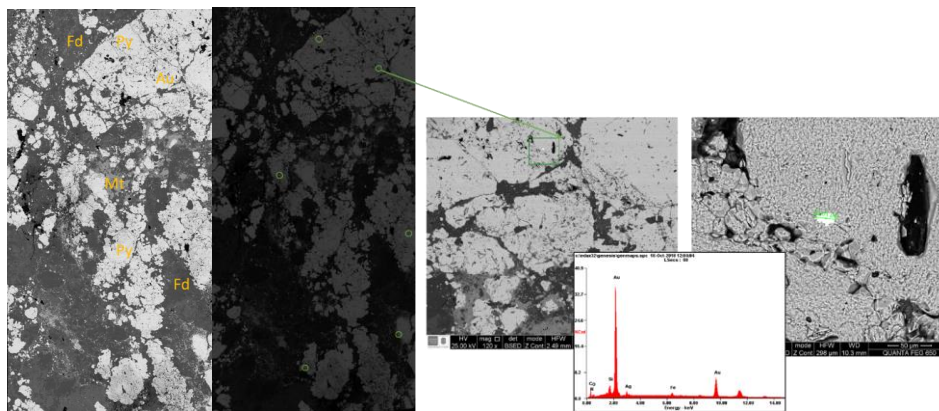
En la región S2-3 (Figura 13M) se observa una especie mineral con Titanio y vanadio

Igualmente, en la región 3 (Figura 14N) se encuentra una especie mineral con Ti-Ba-V y presencia de tierras raras como La, Ce, Nd, Pr, Sr.

Luego de realizar un muestreo puntual para la sección delgada número 2 correspondiente a la muestra número 18 con 12,65 ppm de Au, se realizó un mosaico de la sección delgada 1 correspondiente a la muestra 4 con 44,3 ppm de Au, para crear este mosaico de imágenes en el microscopio electrónico de barrido se tomaron 21 imágenes, 3 en sentido vertical y 7 en la horizontal, posteriormente estas se solaparon para generar un mosaico completo de una parte de la sección, elegida por contener la mayor parte de sulfuros.

Figura 15. Área seleccionada para el análisis SEM

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Figura 16. Mosaico de muestra #4 correspondiente a veta 1

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Finalmente se ratifica la presencia de oro refractario de pirita auroargéntifera asociada a teluros metálicos, y oro encapsulado dentro de la pirita y los sulfuros de cobre. El análisis SEM permitió observar las finas partículas que contienen los minerales de interés asociados a teluros e incluidos en pirita refractaria, estos minerales presentan tamaños entre 2-7 micrómetros.

4.2 Medición del ángulo de contacto

El ángulo de contacto, entre los reactivos de flotación de recolección y el mineral, fue medido sobre el mineral dispuesto en las láminas delgadas, este proceso se llevó a cabo en el

laboratorio de electrometalurgia de Guatiguará en el Centro de investigación Gimba; Se utilizaron estas láminas debido a que por medio de los análisis SEM que se hicieron sobre ellas, se encuentra un enriquecimiento de minerales de interés; desde este punto hay que considerar, que los ángulos que han resultado, si bien no son hidrofóbicos, debido a las condiciones de pureza y pulido de las muestras, si consideran una base del análisis para la flotación bulk de minerales. Los resultados que se han obtenido, se presentan a continuación en la Tabla 90.

Al realizarse la prueba de ángulo de contacto con diferentes tipos de colectores a unas placas de mineral se encontró que el mayor valor de ángulo de contacto ($62,6^\circ$) se consiguió con XANTATO ISOPROPILICO DE SODIO, para ello, se elige este reactivo para realizar pruebas de flotación bulk.

4.3 Flotación bulk

La flotación bulk se realiza al mineral con el objeto de flotar toda la parte valiosa en un mismo concentrado. Se utilizaron para estas pruebas un sistema experimental 2^3 , variando el porcentaje de sólidos, la granulometría y el consumo de colector.

Los parámetros utilizados fueron:

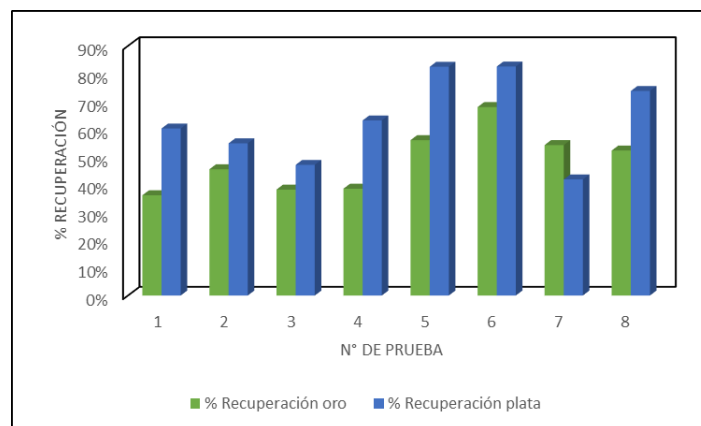
Porcentaje en sólidos: 30 y 35%
Granulometría: 65% <200M y 80% <100M
Colector: Xantato isopropilico de Sodio Z-11
Consumo de colector: 21 g/T y 35 g/T
Espumante: MIBC:
Consumo del espumante: 17 g/T

pH: 9,5 a 10,5

El diseño de las pruebas para el análisis de la flotación en Bulk, se realiza en base a 8 pruebas tal como se presentan en la Tabal 10P.

En los Tablas 11Q-12R se presentan los resultados de las diferentes pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para el Oro y la Plata.

Figura 17. Comparación entre % de recuperación en las diferentes pruebas de flotación bulk.



Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

La figura comparativa 17, nos presenta a primera vista que las pruebas 6 y 5 arrojan las condiciones más favorables para este tipo de flotación, es decir con las variables: 35% en sólidos y una granulometría 65% pasante malla 200. Sin embargo, se ha realizado un análisis estadístico más puntual, para cada una de las variables involucradas (Tablas 13S-15U), de ese modo, se encuentra que:

- A medida que aumenta el porcentaje de sólidos desde 30 a 35% se obtiene mayor recuperación de especies: para el Au aumenta un 18% y para la plata 13%.

- A medida que la granulometría fue mayor, se obtuvo un aumento considerable de recuperación: el oro aumenta un 5% y la plata un 14%

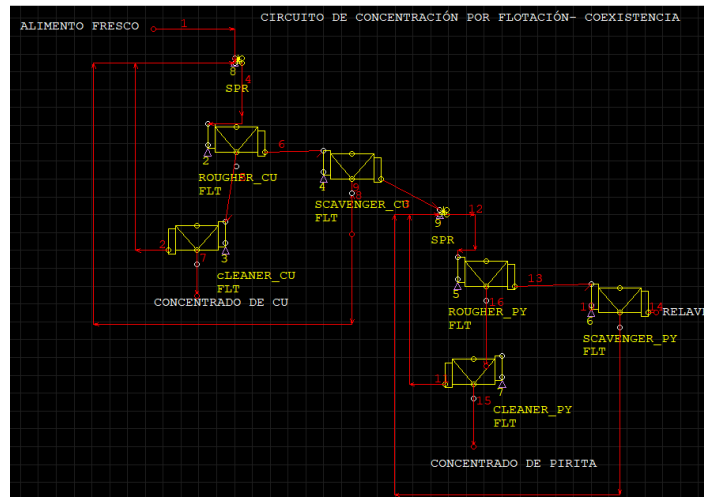
- A medida que agregamos mayor contenido de reactivo colector, mayor recuperación se alcanza, así al pasar desde 21 g/t a 35gpT de colector aumentamos la recuperación de oro y plata en 5 y 11% respectivamente.

De esa manera, se obtienen que las recuperaciones en la flotación bulk, es mejorada principalmente con el aumento del % de sólidos, un menor tamaño de mineral y un mayor contenido de reactivo; se encuentra un máximo de recuperación de oro del 68% y de la plata de 82,6%; aunque son valores buenos, han sido los mejores resultados obtenidos en el laboratorio, por lo cual es recomendable realizar una flotación selectiva en el cual se logre una recuperación más efectiva para el mineral de coexistencia.

4.4 Flotación selectiva

De acuerdo a las características del mineral de coexistencia, se plantea un proceso de flotación selectiva por medio del cual se tiene por objetivo, la obtención de un primer concentrado de cobre y un segundo de pirita aurífera; en ese sentido, se plantea el circuito: ROUGER - CLEANER – SCAVENGER, para cada concentrado, tal como se presenta en el flowsheet de la figura 18.

Figura 18. Flowsheet para el circuito de flotación selectiva de espumas



Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Ahora bien, considerando la flotación selectiva como un proceso diferencial, es importante identificar las variables de flotación de minerales, en ese caso, hablamos de reactivos, pH y tiempos de acondicionamiento y flotación en cada etapa. Esas variables metalúrgicas se presentan en las tablas 16-19 para cada etapa de flotación.

Tabla 15. Condiciones para flotación de cobre- Rougher

pH	5
CuSO ₄ (1%)	50 g/TM
Xantatoz-6	80 g/TM
MIBC	17 g/TM
Tiempo de acondicionamiento	7 min
Tiempo de flotación	15 min

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Tabla 16. Condiciones para flotación de cobre- Cleaner

pH	5
Xantato	4.2 g/TM
MIBC	3 g/TM
Tiempo de acondicionamiento	5 min
Tiempo de flotación	15 min

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Tabla 17. Condiciones para flotación de pirita-Rougher

Ph	11.0
Z-11 (1%)	30 g/TM
AR-1242	50g/TM
MIBC	17g/TM
Tiempo de acondicionamiento	6 min
Tiempo de flotación	12 min

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Tabla 18. Condiciones para flotación de pirita-Cleaner

Ph	11.0
AR-1242	5g/TM
MIBC	3g/TM
Tiempo de acondicionamiento	6 min
Tiempo de flotación	12 min

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Para el circuito de pirita, el pH se logra mediante adición de cal.

Al realizar los análisis de ensayo al fuego para cada concentrado, se obtiene un concentrado de cobre que incluye el 20% del oro total, mientras el de pirita contiene el restante

80%; De igual manera para la plata la partición entre los concentrados es de 45%/55% respectivamente.

5. Conclusiones

Se consiguió caracterizar el mineral de la zona de California Santander mediante ensayo al fuego, análisis macroscópico de muestreo, SEM, análisis de láminas delgadas y análisis petrográfico encontrando que la presencia de oro refractario de pirita auroargentífera está asociada a teluros metálicos, y el oro se encuentra encapsulado dentro de la pirita y los sulfuros de cobre, además el análisis SEM permitió corroborar lo mencionado observando las finas partículas que contienen los minerales de interés asociados a teluros e incluidos en pirita refractaria, estos minerales presentan tamaños entre 2-7 micrómetros. Por medio de ensayo al fuego se obtuvieron tenores para el composito de 4,58g/ton de Au y 17,2g/ton de Ag.

Con los datos que se obtuvieron de la caracterización del mineral se permitió realizar pruebas para determinar la hidrofobicidad del mineral y del colector por medio de la prueba de ángulo de contacto el cual se obtuvo el mejor resultado con el Xantato isopropílico de sodio de 62,6°.

Se logró establecer en el laboratorio las condiciones operativas más adecuadas para la flotación Bulk obteniendo una recuperación de 68% de Au y 82,6% de Ag , aunque el porcentaje de recuperación fue bueno se realizó una flotación selectiva obteniendo un primer concentrado de cobre y un segundo de pirita aurífera planteando así un circuito ROUGER-CLEANER-SCAVENGER con una recuperación para el primer concentrado de 20% de Au y 45% Ag y para el segundo concentrado de 80% de Au y 55% de Ag lo cual nos dice que es más eficiente la flotación selectiva que la flotación Bulk.

Referencias Bibliográficas

- [1] 911 Metallurgist. (2017). Recuperación de Sulfuros con Oro por Flotación y Cianuración. *911 Metallurgist*, 5.
- [2] Asociación Colombiana de minería. (9 de Julio de 2020). *Sector minero, clave en reactivación y repotenciación económica del país*. Obtenido de Asociación Colombiana de minería: <https://acmineria.com.co>
- [3] Gianthony De Jesus, D. J. (2017). *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE FLOTACIÓN EN LA PLANTA CONCENTRADORA XSTRATA TINTAYA S.A. AREQUIPA, PERU*.
- [4] Mendoza, H., & Jaramillo, L. (1687). Geología y geoquímica del área de California, Santander. *INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES GEOLOGICO-MINERAS*, 15.
- [5] Tobon Suarez, C. M. (2013). *Estudio de la hidrofobicidad de Oro nativo y su efecto en la flotación espumante directa*. Medellín, Colombia : Universidad Nacional de Colombia .
- [6] ÁLVAREZ-RODRÍGUEZ, MENÉNDEZ-AGUADO, ROSA DZIOBA, COELLO-VELÁZQUEZ,. (2013). *RAW MATERIALS EVALUATION IN A SILICA PROCESSING PLANT TO INCREASE THE ENERGY EFFICIENCY IN GRINDING PROCESS* (Vol. 80).
- [7] Arenas, J. E. (2004). *Litología y Petrología de las Metamorfitas Carbonatadas y Metasedimentitas Asociadas de la Formación Silgará, Faja Noroeste de Mutiscua*

(*Macizo de Santander*. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias.

- [8] Asociacion Colombiana de mineria. (9 de Julio de 2020). *Sector minero, clave en reactivación y repotenciación económica del país*. Obtenido de Asociacion Colombiana de mineria: <https://acmineria.com.co>
- [9] ATRIA INNOVATION. (24 de Octubre de 2016). *ATRIA INNOVATION*. Obtenido de ¿Qué es el ángulo de contacto?: <https://www.atriainnovation.com>
- [10] B.A. Wills & T.J. Napier – Munn. (2006). *Mineral Processing Technology*.
- [11] Blanc, E. (1975). *Tecnología de los Aparatos de Fragmentación y de Clasificación Dimensional*. Madrid: Laureano Fueyo.
- [12] Bond-F-C. (1961). *Crushing-and-Grinding-Calculations*.
- [13] Bustamante, Oswaldo; Gaviria, Ana. (2008). *Concentración de minerales*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de minas, Medellin.

APENDICE

Apéndice A. Análisis macroscópico de muestreo de minerales de Coexistencia

# MUESTRA	COLOR	COMPOSICION MINERALOGICA			ALTERACION	OBSERVACIONES
	Color	Composición	Minerales mena	Minerales ganga		
3	Gris rosaceo	Felsica	Py 10% Mag 5%	Qtz 75% Kao10%	Cuarzo-sericitica	Posiblemente neis con alteracion hidrotermal que ha silisificado la roca
4	Gris claro	Intermedia	Py 15% Pirita gruesa rellenando fracturas, pirita diseminada	Qtz 70% Kao 15%	Cuarzo-sericitica	Posible gneis con mineralización, presenta alteracion argilica intermedia
6	Blanco grisaceo	Félsica	Py10% diseminada y rellenando fracturas	Kao 80% Qtz 10%	Argilica avanzada	Posiblemente neis con alteracion hidrotermal, alteracion argilica
7	Blanco-rosaceo	Felsica	Py 10%	Qtz 40% Ftp- K 30% Kao 20%		Posiblemente Granito
9	Blanco grisaceo	Felsica	Py10% Pirita gruesa rellenando fracturas, pirita diseminada Magnetita 3%	Qtz 65% Kao 25%	Argilica avanzada	Posible neis alterado hidrotermalmente con relleno de fracturas y alteracion argilica
11	Gris-rosacea	Felsica	Mag 10%	Fpt-K 35% Qtz 45 % Fl 10%	Cuarzo-sericitica	Granito
12	Gris	Felsica	Py 17%	Qtz 80% Cic 3%	Argilica avanzada	Brecha magmatica-hidrotermal con presencia de cuarzo vuggy y calcanita como mineral secundario.
18	Grisaceo	Intermedia	Py 20% como relleno de fracturas y diseminada	Qtz 70% Kao 10%	Cuarzo-sericitica	Posiblemente neis biotitico con fuerte alteracion argilica intermedia
19	Blanco	Felsica	Py 15% rellenando fracturas	Qtz 85 %	Cuarzo-sericitica	Roca alterada hidrotermalmente (brecha)
21	Gris	Intermedia	Py 20%	Qtz 67% Cic8% bn 5%	Cuarzo-sericitica	Fragmento siliceo con un alto contenido de pirita
24	Gris	Intermedia	Py 10% Mag 20%	Qtz 70%	Cuarzo-sericitica	Brecha hidrotermal, aumenta el contenido de oxidos(magnetita) en relación a los sulfuros.
25	Gris	felsica	Py 10%	Qtz 85% Cic 3% bn2%	Cuarzo-sericitica	Roca alterada hidrotermalmente , reemplazamiento de los minerales originales por cuarzo.
31	Blanco	Felsica	Py 5%	Kao 95%	Argilica	Posiblemente anortosita
36	Blanca rosacea	Felsica	Py 10%	Fl Ftp Qtz	Argilica	Granodiorita con alteración del feldespato
38	Blanco	Felsica	Py3% Mag 2%	Fl 30% Ftp-K 35% Qtz 30%	Argilica	Granodiorita con alteración de feldespato
39	Blanco rosaceo	Felsica	Py 15%	Fl 30% Ftp40% Qtz 20%		Granodiorita
41	Gris blancuzco	Felsica	Py 15%	Qtz 85%	Cuarzo-sericitica	Roca con alteracion hidrotermal

Tabla 5A. Análisis macroscópico de muestreo de minerales de Coexistencia

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice B. Minerales identificados mediante análisis macroscópico

MINERAL	FORMULA	PORCENTAJE
Cuarzo	SiO_2	50%
Sericita	$KAl_3(AlSi_3O_{10})(OH)_2$	15%
Pirita	FeS_2	12%
Arcillas	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	10%
Feldespato	$(KNaCaBaNH_4)(SiAl)_4O_8$	5%
Bornita	Cu_5FeS_4	4%
Calcopirita	$CuFeS_2$	3%
Covelita	CuS	0,99%
Tierras raras	$La - Ce - Pr - Nd$	0,01%

Tabla 6B. Minerales identificados mediante análisis macroscópico

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice C. Análisis SEM mineral cabeza

Muestra	Mineral	Categoría	Formula química	Dureza	Densidad [g/cm ³]
EDS_M1_001	Zr	Nesosilicatos	$ZrSiO_4$	7,5	4,6-4,7
EDS_M1_002	Py	Sulfuros	FeS_2	6-6,5	4,95-5,10
EDS_M1_003	Qtz	Silicatos	(SiO_2)	7	2,65
EDS_M1_004	Py	Sulfuros	FeS_2	6-6,5	4,95-5,10
EDS_M1_005	Bn	Sulfuros	Cu_5FeS_4	3-3,25	4,9 a 5,3
EDS_M1_006	Cp	Sulfuros	$CuFeS_2$	3-5,4	4,19
EDS_M1_007	Enarg	Sulfuros	Cu_3AsS_4	3	4,45

EDS_001_008	Qtz	Silicatos	(SiO ₂)	7	265
EDS_M1_009	Py	Sulfuros	FeS ₂	66,5	4,95-5,10
	Qtz	Silicatos	(SiO ₂)	7	265
	Ep	Silicatos	CaFe ²⁺ Al ₂ (Si ₂ O ₇)(SO ₄)O(OH)	6-7	32y3,5
EDS_M1_0010	Cp	Sulfuros	CuFeS ₂	35-4	4,19
	Qtz	Silicatos	(SiO ₂)	7	265
EDS_M1_0011	Kao	Filosilicatos	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2	26
	Qtz	Silicatos	(SiO ₂)	7	265
EDS_M1_0012	Te	Elementonativo	Te	225	6,24
EDS_M1_0014	Kao	Filosilicatos	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	2	26
	Qtz	Silicatos	(SiO ₂)	7	265
	Py	Sulfuros	FeS ₂	66,5	4,95-5,10

Tabla 7C. Análisis SEM mineral cabeza

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice D. Análisis Sección 2-región 1-1

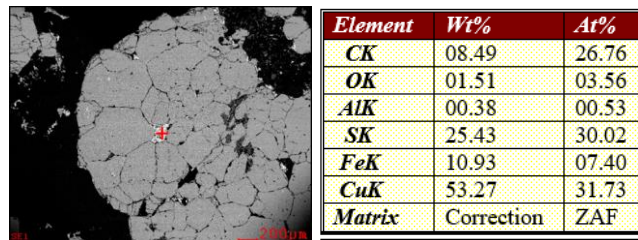
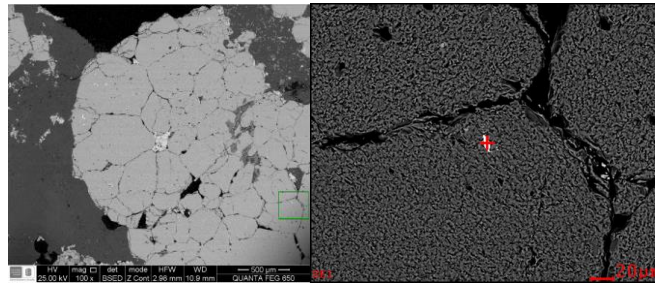


Figura 4D. Análisis Sección 2-región 1-1

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice E. Análisis S2-región 1-2



Element	Wt%	At%
CK	08.02	35.46
OK	01.15	03.82
AlK	00.47	00.92
SK	17.31	28.67
FeK	09.13	08.68
CuK	10.69	08.93
BiL	53.22	13.52
Matrix	Correction	ZAF

Figura 5E. Análisis S2-región 1-2
Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice F. Análisis S2-región 1-3

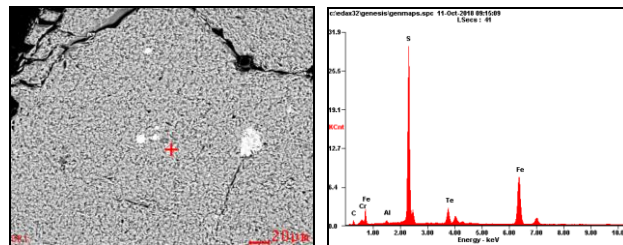
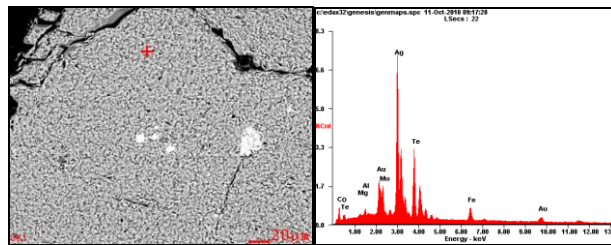


Figura 6F. Análisis S2-región 1-3
Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice G. Análisis S2-región 1-4



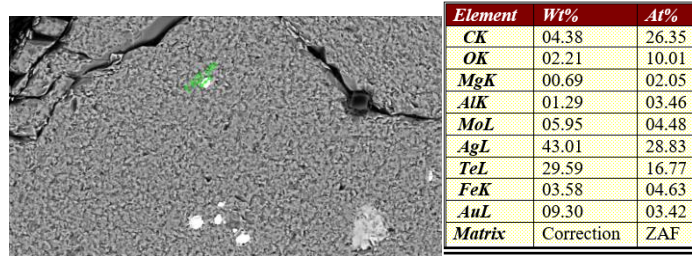


Figura 7G. Análisis S2-región 1-4

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice H. Análisis S2-región 1-5

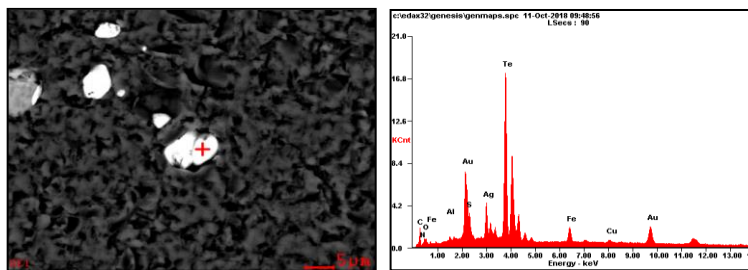
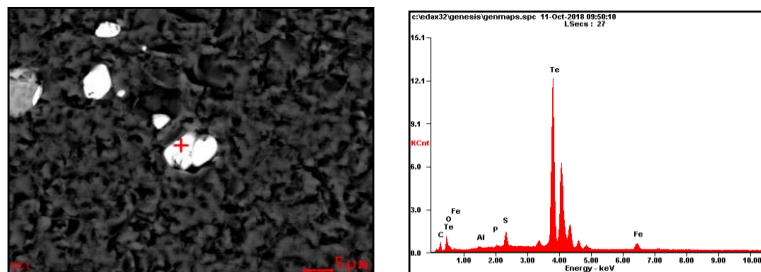


Figura 8H. Análisis S2-región 1-5

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice I. Análisis S2-región 1-6



Element	Wt%	At%
CK	04.10	26.94
OK	00.99	04.89
AlK	00.52	01.52
PK	00.44	01.11
SK	02.71	06.67
TeL	88.15	54.51
FeK	03.09	04.36
Matrix	Correction	ZAF

Figura 9I. Análisis S2-región 1-6

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice J. Análisis S2-región 1-7

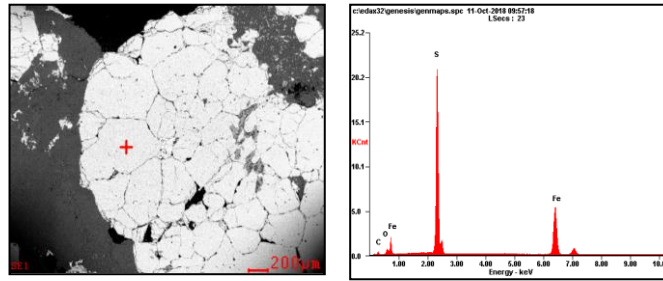
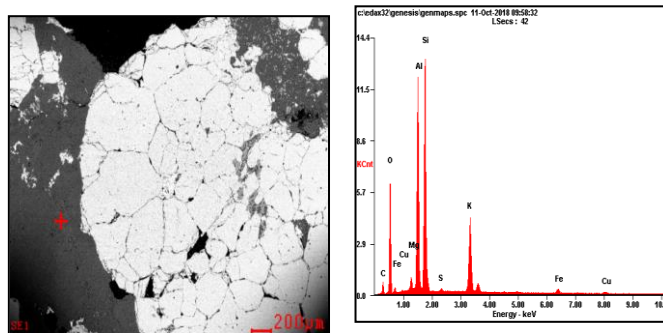


Figura 10J. Análisis S2-región 1-7

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice K. Análisis S2-región 1-8



Element	Wt%	At%
CK	08.66	15.04
OK	34.12	44.47
MgK	01.27	01.09
AlK	18.18	14.05
SiK	26.43	19.62
SK	00.34	00.22
KK	08.97	04.78
FeK	01.24	00.46
CuK	00.79	00.26
Matrix	Correction	ZAF

Figura 11K. Análisis S2-región 1-8

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice L. Análisis S2-región 2

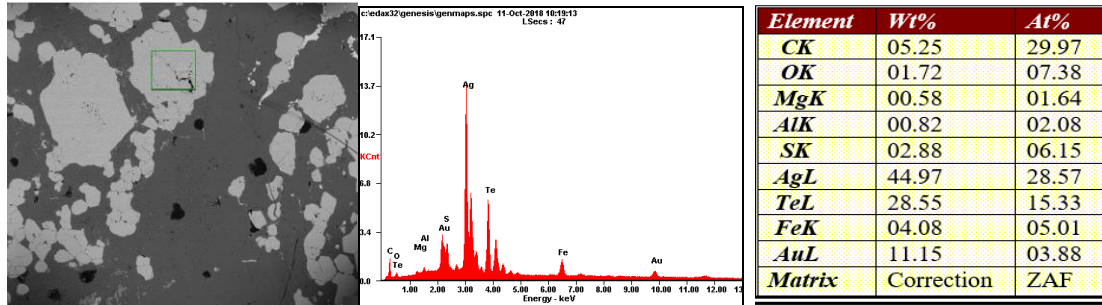


Figura 12L. Análisis S2-región 2

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice M. Análisis S2-región 3

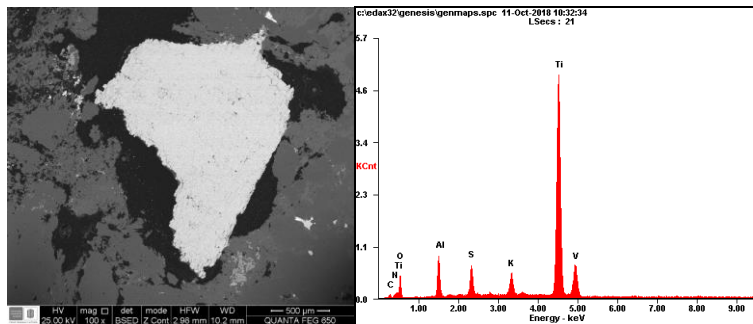


Figura 13M. Análisis S2-región 3

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice N. Análisis S2-región 3

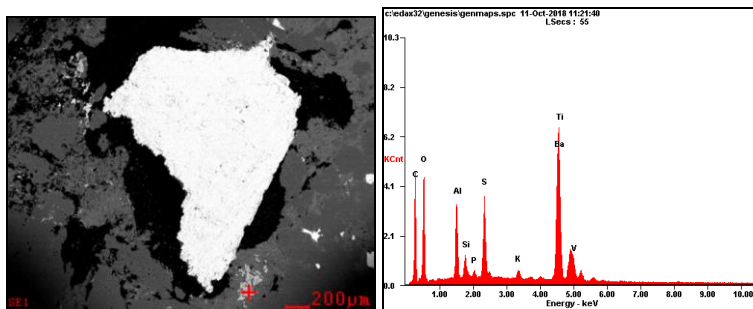
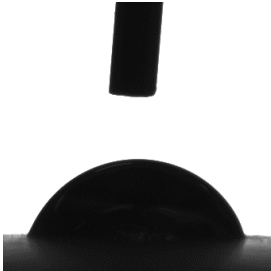
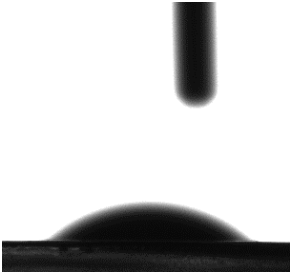
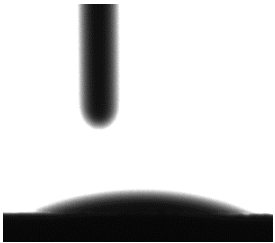
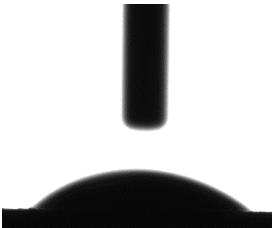


Figura 14N. Análisis S2-región 3

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice O. Medida de ángulos de contacto obtenidos entre probetas de mineral y los reactivos de flotación

<p>Xantato isopropílico de sodio</p> 	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Probeta 1ª</td> <td>48,5</td> </tr> <tr> <td>Probeta 1b</td> <td>47,9</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2ª</td> <td>62,6</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2b</td> <td>72</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3ª</td> <td>51,9</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3b</td> <td>52,7</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta 1ª	48,5	Probeta 1b	47,9	Probeta 2ª	62,6	Probeta 2b	72	Probeta 3ª	51,9	Probeta 3b	52,7
Probeta 1ª	48,5												
Probeta 1b	47,9												
Probeta 2ª	62,6												
Probeta 2b	72												
Probeta 3ª	51,9												
Probeta 3b	52,7												
<p>Xantato amílico de potasio</p> 	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Probeta 1ª</td> <td>54,5</td> </tr> <tr> <td>Probeta 1b</td> <td>35,5</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2ª</td> <td>52,3</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2b</td> <td>41,1</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3ª</td> <td>52,1</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3b</td> <td>31,7</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta 1ª	54,5	Probeta 1b	35,5	Probeta 2ª	52,3	Probeta 2b	41,1	Probeta 3ª	52,1	Probeta 3b	31,7
Probeta 1ª	54,5												
Probeta 1b	35,5												
Probeta 2ª	52,3												
Probeta 2b	41,1												
Probeta 3ª	52,1												
Probeta 3b	31,7												
<p>Ditiofosfato AR-G431</p> 	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Probeta 1ª</td> <td>20,1</td> </tr> <tr> <td>Probeta 1b</td> <td>4,2</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2ª</td> <td>22,3</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2b</td> <td>8,5</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3ª</td> <td>6,1</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3b</td> <td>17,1</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta 1ª	20,1	Probeta 1b	4,2	Probeta 2ª	22,3	Probeta 2b	8,5	Probeta 3ª	6,1	Probeta 3b	17,1
Probeta 1ª	20,1												
Probeta 1b	4,2												
Probeta 2ª	22,3												
Probeta 2b	8,5												
Probeta 3ª	6,1												
Probeta 3b	17,1												
<p>Ditiofosfato AR-1404</p> 	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>Probeta 1ª</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>Probeta 1b</td> <td>13,2</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2ª</td> <td>42</td> </tr> <tr> <td>Probeta 2b</td> <td>27,6</td> </tr> <tr> <td>Probeta 3ª</td> <td>32,2</td> </tr> </tbody> </table>	Probeta 1ª	26	Probeta 1b	13,2	Probeta 2ª	42	Probeta 2b	27,6	Probeta 3ª	32,2		
Probeta 1ª	26												
Probeta 1b	13,2												
Probeta 2ª	42												
Probeta 2b	27,6												
Probeta 3ª	32,2												

	Probeta 3b	22,2
--	------------	------

Tabla 90. Medida de ángulos de contacto obtenidos entre probetas de mineral y los reactivos de flotación

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice P. Diseño de pruebas de flotación bulk

PRUEBA	% SÓLIDOS		GRANULOMETRÍA		CONSUMO COLECTOR	
	30%	35%	65% < 200#	80% < 100#	3 GOTAS	5 GOTAS
1	X		X		X	
2	X		X			X
3	X			X	X	
4	X			X		X
5		X	X		X	
6		X	X			X
7		X		X	X	
8		X		X		X

Tabla 10P. Diseño de pruebas de flotación bulk

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice Q. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Au

PRUEBA	Alimento	Ley de cabeza	Concentrado	Ley de concentrado	Colas	Ley de colas	Recuperación
	Kg	g/T	Kg	g/T	Kg	g/T	%
1	1	4.58	0.22	18	0.78	3.22	36%
2	1	4.58	0.26	19.26	0.74	2.80	46%
3	1	4.58	0.28	15	0.72	3.20	38%
4	1	4.58	0.26	16.3	0.74	3.16	39%
5	1	4.58	0.21	29.35	0.79	2.21	56%
6	1	4.58	0.21	35.6	0.79	1.61	68%
7	1	4.58	0.19	31.41	0.81	2.28	54%
8	1	4.58	0.19	30.27	0.81	2.37	52%

Tabla 11Q. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Au

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice R. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Ag

PRUEBA	Alimento	Ley de cabeza	Concentrado	Ley de concentrado	Colas	Ley de colas	Recuperación
	Kg	g/T	Kg	g/T	Kg	g/T	%
1	1	11	0.22	76.66	0.78	4.78823	60%
2	1	11	0.26	59.11	0.74	5.52686	55%
3	1	11	0.28	47.11	0.72	6.53697	47%
4	1	11	0.26	68	0.74	4.51551	63%
5	1	11	0.21	110	0.79	2.09809	83%
6	1	11	0.21	110.12	0.79	2.0873	83%
7	1	11	0.19	61.7	0.81	6.91034	42%
8	1	11	0.19	108.7	0.81	3.11914	74%

Tabla 12R. Resultados pruebas en función de las leyes de concentrado y colas para Ag

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice S. Análisis estadístico del efecto del % de sólidos en flotación bulk

30%		35%	
Resumen Estadístico para Rec Au		Resumen Estadístico para Rec Au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	39,5575	Promedio	57,63
Mediana	38,355	Mediana	55,14
Desviación Estándar	4,12959	Desviación Estándar	7,05492
Coefficiente de Variación	10,4395%	Coefficiente de Variación	12,2418%
Mínimo	36,0	Mínimo	52,28
Máximo	45,52	Máximo	67,96
Rango	9,52	Rango	15,68
Sesgo Estandarizado	1,26184	Sesgo Estandarizado	1,40519
Curtosis Estandarizada	1,1743	Curtosis Estandarizada	1,2691
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	56,3425	Promedio	70,18
Mediana	57,56	Mediana	78,13
Desviación Estándar	7,03959	Desviación Estándar	19,3224
Coefficiente de Variación	12,4943%	Coefficiente de Variación	27,5326%
Mínimo	47,11	Mínimo	41,87
Máximo	63,14	Máximo	82,59
Rango	16,03	Rango	40,72
Sesgo Estandarizado	-0,650974	Sesgo Estandarizado	-1,42322
Curtosis Estandarizada	-0,173096	Curtosis Estandarizada	1,21747

Tabla 13S. Análisis estadístico del efecto del % de sólidos en flotación bulk

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice T. Análisis estadístico del efecto de la granulometría en flotación bulk

65% < 200#		80% <100#	
Resumen Estadístico para Rec au		Resumen Estadístico para Rec au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	51,3775	Promedio	45,81
Mediana	50,775	Mediana	45,405
Desviación Estándar	13,7526	Desviación Estándar	8,64696
Coefficiente de Variación	26,7678%	Coefficiente de Variación	18,8757%
Mínimo	36,0	Mínimo	38,18
Máximo	67,96	Máximo	54,25
Rango	31,96	Rango	16,07
Sesgo Estandarizado	0,172292	Sesgo Estandarizado	0,0353846
Curtosis Estandarizada	-0,445071	Curtosis Estandarizada	-2,34096
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	70,0525	Promedio	56,47
Mediana	71,365	Mediana	55,125
Desviación Estándar	14,5889	Desviación Estándar	14,6538
Coefficiente de Variación	20,8257%	Coefficiente de Variación	25,9497%
Mínimo	54,89	Mínimo	41,87
Máximo	82,59	Máximo	73,76
Rango	27,7	Rango	31,89
Sesgo Estandarizado	-0,0936464	Sesgo Estandarizado	0,265244
Curtosis Estandarizada	-2,18051	Curtosis Estandarizada	-1,24804

Tabla 14T. Análisis estadístico del efecto de la granulometría en flotación bulk

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019

Apéndice U. Análisis estadístico del efecto del consumo de reactivo en flotación bulk

21 g/t		35 g/t	
Resumen Estadístico para Rec au		Resumen Estadístico para Rec au	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	46,115	Promedio	51,0725
Mediana	46,215	Mediana	48,9
Desviación Estándar	10,4843	Desviación Estándar	12,5803
Coefficiente de Variación	22,7352%	Coefficiente de Variación	24,6322%
Mínimo	36,0	Mínimo	38,53
Máximo	56,03	Máximo	67,96
Rango	20,03	Rango	29,43
Sesgo Estandarizado	-0,0101283	Sesgo Estandarizado	0,730943
Curtosis Estandarizada	-2,30415	Curtosis Estandarizada	0,30375
Resumen Estadístico para Rec de plata		Resumen Estadístico para Rec de plata	
Recuento	4	Recuento	4
Promedio	57,9275	Promedio	68,595
Mediana	53,67	Mediana	68,45
Desviación Estándar	18,1105	Desviación Estándar	12,1123
Coefficiente de Variación	31,2641%	Coefficiente de Variación	17,6577%
Mínimo	41,87	Mínimo	54,89
Máximo	82,5	Máximo	82,59
Rango	40,63	Rango	27,7
Sesgo Estandarizado	0,86534	Sesgo Estandarizado	0,0436073
Curtosis Estandarizada	0,115099	Curtosis Estandarizada	-0,754342

Tabla 15U. Análisis estadístico del efecto del consumo de reactivo en flotación bulk

Fuente: Pardavé, Santamaría, Botía 2019