



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Mecanismo de separación de feldespato de aluminosilicatos en relaves mineros con potencial geometalúrgico

Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales
Medellín, Colombia
2021

Mecanismo de separación de feldespato de aluminosilicatos en relaves mineros con potencial geometalúrgico

Gabriela Jacqueline Contreras Sinchi

Tesis de investigación presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Minerales

Director:

Ph.D., Moisés Oswaldo Bustamante Rúa

Línea de Investigación:

Beneficio de Minerales

Grupo de Investigación:

Instituto de Minerales Cimex (IMM CIMEX)

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Materiales y Minerales

Medellín, Colombia

2021

*A Gabriel Emiliano y Gali Quitian,
el dueño de mi corazón, y mi gran amor...*

Declaración de obra original

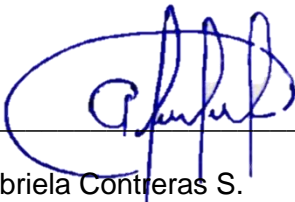
Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.



Gabriela Contreras S.

675045

Fecha 01/05/2021

Agradecimientos

A Dios, pilar fundamental de mi vida y de mi familia.

A mis padres, maestros y amigos quienes, con su granito de arena, supieron decir y estar presentes de la mejor manera a pesar de la distancia.

A mis queridos profesores Oswaldo Bustamante, Néstor Rojas, presentes desde el inicio de mi vida profesional, quienes cada día admiro más por la calidad de personas que reflejan con solo transmitir sus conocimientos.

Al Instituto de Minerales CIMEX, quien abre sus puertas y acoge a todos sus alumnos como hijos y enseña el valor de la amistad.

A mi profesor de vida y compañero, Gali Quitian quien sin pensar simplemente está ahí incondicionalmente.

A mi motor de vida, mi hijo Gabriel que me enseña el valor del tiempo y la sencillez de los detalles, y como la sonrisa sincera de un niño puede mover hasta el último sentimiento negativo de una persona.

Simplemente a todos, gracias por ser y estar.

Resumen

El estudio del comportamiento de aspectos físico-químicos en la flotación de feldespato muestra la posibilidad de generar fuentes de minerales industriales derivados de productos de desecho de la industria minera que presenten un potencial geometalúrgico como materia prima en la industria del vidrio y cerámica, así, a través de la comprensión del mecanismo de adsorción de colectores aminas bajo ciertos escenarios se pueden generar diferentes aplicaciones industriales. Para el estudio se tomaron muestras de relave proveniente de minería metálica y FD-K con una pureza del 94.5 %, y la caracterización correspondiente determina un potencial geometalúrgico. Por medio de flotación espumante convencional se evalúa la influencia de minerales accesorios presentes en el relave y el estudio de los colectores aminas; Aero 3030C, Reagent-S9549 y Dodecilamina. Los escenarios propuestos definen la interacción de pH básico con los colectores aminas, utilización de iones contaminantes, ensayos de laboratorio en celda Partridge Smith, ángulo de contacto y caracterización fisicoquímica; determinando una hidrofobización del mineral indicando valores superiores de ángulo de contacto con Dodecylamina, 115.88° correspondiente a pH básico 10. El comportamiento de la carga superficial del FD-K frente a una contaminación con iones de Al^{+3} , Fe^{+3} y Mn^{+2} , muestra cambios en el potencial zeta, tomando valores positivos en medio ácido, trasladando el ZPC del feldespato potásico con presencia de Al^{+3} , de 1-2 hasta valores de 5. Al estudiar la energía libre superficial de feldespato usando la teoría DLVO, se muestra una variación significativa que implica el incremento en la tensión interfacial haciendo que se produzca una hidrofobización selectiva. Finalmente, los parámetros fisicoquímicos evaluados muestran una buena flotabilidad del feldespato con colectores aminas a pH básico a través de flotación espumante en Celda Partridge-Smith con tiempos de acondicionamiento y flotación de 7 y 3 minutos, respectivamente, obteniendo valores superiores de recuperación del mineral al incrementar el pH; alcanzando valores de hasta el 90 % con colector Aero 3030C y con la utilización de iones contaminantes como activadores.

Palabras claves: Feldespato, Potencial zeta, ángulo de contacto, Tensión superficial, Energía libre superficial, Celda Partridge Smith, Microflotación.

Mechanism of separation of feldspar from aluminosilicates from mining tailings with geometallurgical potential

Abstract

The study of the behavior of physicochemical aspects in feldspar flotation shows the possibility of generating sources of industrial minerals derived from waste products of the mining industry that present a geometallurgical potential as raw material in the glass and ceramics industry, thus, through the understanding of the adsorption mechanism of amine collectors under certain scenarios, different industrial applications can be generated. For the study, samples of tailings from metallic mining and FD-K with a purity of 94.5 % were taken, the corresponding characterization determines a geometallurgical potential. By means of conventional froth flotation, the influence of accessory minerals present in the tailings is evaluated and the study of the amine collectors Aero 3030C, Reagent-S9549 and Dodecylamine is determined. The proposed scenarios define to evaluate the interaction of basic pH with the amine collectors, use of contaminant ions, laboratory tests in Partridge Smith cell, contact angle and physicochemical characterization; determining a hydrophobization of the mineral with higher values with Dodecylamine, 115.88° corresponding to basic pH 10. The behavior of the surface charge of FD-K against contamination with Al^{+3} , Fe^{+3} and Mn^{+2} ions, shows changes in the zeta potential, taking positive values in acid medium, moving the ZPC of potassium feldspar with the presence of Al^{+3} , from 1-2 to values of 5. When studying the surface free energy of feldspar using the DLVO theory, a significant variation is shown that implies the increase in the interfacial tension causing a selective hydrophobization to occur. Finally, the physicochemical parameters evaluated show a good floatability of feldspar with amine collectors at basic pH through foaming flotation in Partridge-Smith Cell with conditioning and flotation times of 7 and 3 minutes, respectively, obtaining higher values with increasing pH; reaching values up to 90 % with Aero 3030C collector and with the use of contaminant ions as activators.

Keywords: Feldspar, Zeta potential, contact angle, surface tension, surface free energy, Partridge Smith cell, microflotation.

Contenido

	Pág.
1. Estado del arte	6
1.1 Antecedentes	6
1.2 Geología Económica	8
1.2 Minerales Industriales	9
1.2.1 Silicatos.....	10
1.2.2 Feldespatos	12
1.3 Fundamentos de flotación	16
1.3.1 Procesos de obtención de feldespato.....	17
1.4 Parámetros fisicoquímicos de flotación	20
1.4.1 Hidrofobicidad	20
1.4.2 Reactivos Colectores	25
1.4.3 Potencial Zeta	29
1.4.4 Iones Contaminantes	31
1.5 Doble capa eléctrica	32
1.5.1 Principios fundamentales	32
1.6 Energía libre Superficial.....	34
1.6.1 Teoría de Owens, Went / Fowkes	34
1.7 Teoría DLVO	36
1.7.1 Teoría de la doble capa eléctrica DLVO	36
2. Materiales y métodos	38
2.1 Muestra Mineral	38
2.2 Caracterización Geometalúrgica	41

2.2.1	Caracterización Mineral.....	41
2.3	Reactivos Químicos	43
2.4	Ángulo de Contacto.....	44
2.4.1	Método gota sésil (sessile drop).....	46
2.5	Potencial Zeta	46
2.5.1	Potencial Zeta con Iones Contaminantes	47
2.6	Tensión Superficial y Energía libre superficial	48
2.7	Flotación Espumante Convencional Celda Denver.....	49
2.8	Flotación Espumante Celda Partridge – Smith	50
3.	Resultados y Discusión	55
3.1.	Caracterización físico – química de relaves minero cupríferos	55
3.1.1	Humedad y Densidad	55
3.1.2	Análisis de (FRX), (DRX), (SEM) y (MOPP).....	56
3.2.	Ángulo de Contacto.....	63
3.3.	Potencial Zeta	65
3.4.	Tensión superficial y Energía libre superficial.....	68
3.5.	Flotación espumante en Celda Denver.....	69
3.6.	Flotación espumante en Celda Partridge-Smith	71
4.	Conclusiones y recomendaciones	76
4.1	Conclusiones.....	76
4.2	Recomendaciones.....	78
	Bibliografía	79

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1-1: Estructura básica de silicatos	10
Figura 1-2: Estructura compleja de los tectosilicatos	11
Figura 1-3: Series de composición de Feldespatos.....	13
Figura 1-4: ZPC de feldespato potásico.....	14
Figura 1-5: Diagrama catiónico de feldespato – Albita.....	15
Figura 1-6: Diagrama catiónico de feldespato – Ortoclasa.....	16
Figura 1-7: Mecanismo de flotación.	17
Figura 1-8: Diagrama de flujo de tratamiento de feldespato.....	19
Figura 1-9: Ángulo de contacto	23
Figura 1-10: Proceso de adhesión partícula - burbuja	24
Figura 1-11: Colector en contacto con la superficie mineral	25
Figura 1-12: Clasificación de colectores.....	26
Figura 1-13: Modelo de adsorción de Gaudin – Fuerstenau (sistema cuarzo - DDA) 28	
Figura 1-14: a) Ángulo de contacto en función del pH con DDA. b) Diagrama de dominio para soluciones acuosas de cloruro de dodecilamonio	31
Figura 1-15: Presencia de iones contaminantes en la superficie de feldespato potásico.....	32
Figura 1-16: a) Modelo de la doble capa eléctrica y b) Variación del potencial a través de la doble capa (interface sólido – agua).....	33

Figura 1-17: Curva de energía que se forma al sustraer la curva de atracción de la curva de repulsión.....	36
Figura 2 1: Muestra mineral N°1 para medición de ángulo de contacto. a) Superficie expuesta de feldespato (vista superior briqueta y b) Briqueta con partículas (vista frontal).....	39
Figura 2-2: Muestra mineral N°2 para medición de energía libre superficial. a) Superficie expuesta de feldespato (vista superior briqueta) y b) Briqueta con partículas (vista frontal).....	39
Figura 2-3: Muestra de mineral para medición de ángulo de contacto con superficie plana natural.....	40
Figura 2-4: Muestra mineral para flotación espumante. Tamaño de la muestra +850 µm (20 mallas ASTM).	40
Figura 2-5: a) Microfotografía de textura general de partículas de feldespato y b) Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. (SEM).....	41
Figura 2-6: Microfotografía (MOPP) de la muestra de relave minero.....	43
Figura 2-5: Gota de agua destilada sobre superficie mineral. a) Superficie briqueta y b) Superficie plana natural.....	45
Figura 2-6: Medición de la tensión superficial de líquidos	48
Figura 2-7: Flotación Convencional en Celda Denver.....	50
Figura 2-8: Esquema del procedimiento de microflotación en celda Partridge – Smith.....	51
Figura 2-9: Partícula de feldespato hidrofobizada en contacto con una burbuja de Nitrógeno antes de ascender.....	52
Figura 2-10: Proceso de flotación en celda Partridge – Smith.....	53
Figura 2-11: Curva de calibración de flujo de N ₂ vs Graduación del flujómetro (LPM).....	54
Figura 3-1: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra de relave por DRX..	57
Figura 3-2: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (Feldespato) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.....	58

Figura 3-3: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (punto 2) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.....	59
Figura 3-4: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (feldespato) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.....	60
Figura 3-5: Microfotografía de la textura general de partículas de la muestra de relave en 3 diferentes puntos y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.....	61
Figura 3-6: Microfotografía (MOPP) de la muestra de relave minero (MOPP).....	63
Figura 3-7: Ángulo de contacto de los reactivos de flotación sobre la superficie de Ortoclasa. a) Θ de Dodecilamina, b) Θ de Aero 3030C, c) Θ de Reagent S-9549 y d) Θ de agua sobre superficie sin hidrofobizar.....	65
Figura 3-8: Curva de potencial de feldespato potásico (Ortoclasa).....	66
Figura 3-9: Curva de potencial de feldespato con la interacción de iones contaminantes superficiales.....	67
Figura 3-10: Energía libre superficial del feldespato.....	69
Figura 3-11: Ángulo de contacto en función del valor de pH.....	71
Figura 3-12: Recuperación de mineral feldespático (Ortoclasa) con diferentes colectores aminos en intervalos de pH alcalino.....	72
Figura 3-13: Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Aeromine 3030C.....	73
Figura 3-14: Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Reagent S-9549.....	74
Figura 3-15: Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Dodecilamina	74

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Clasificación de grupos de aminas.....	27
Tabla 1-2: Equipos utilizados en la Caracterización Mineral	42
Tabla 1-3:Reactivos colectores utilizados previamente en flotación convencional en Celda Denver.	44
Tabla 1-4: Parámetros para medición de Potencial Zeta.....	47
Tabla 1-5: Pruebas de flotación en Celda Denver	50
Tabla 2-1: Equipos utilizados en la Caracterización Mineral.....	42
Tabla 2-2: Reactivos colectores utilizados previamente en flotación convencional en Celda Denver.....	44
Tabla 2-3: Parámetros para medición de Potencial Zeta.....	46
Tabla 2-4: Líquidos utilizados para medir energía libre superficial.....	48
Tabla 2-5: Pruebas de flotación en Celda Denver.....	50
Tabla 3-1. Resultados de las pruebas de humedad y densidad de compuesto de relave cuprífero	55
Tabla 3-2. Análisis FRX para muestra de relave.....	56
Tabla 3-3: Mineralogía global de la muestra de cabeza del relave minero.....	56
Tabla 3-4: Composición química de partículas de feldespatos.....	58
Tabla 3-5: Composición química de partículas una partícula mineral.....	59
Tabla 3-6: Composición química de partículas una partícula de feldespatos.....	60
Tabla 3-7: Composición química de partículas una partícula de feldespatos.....	61

Tabla 3-8:	Composición de la muestra.....	62
Tabla 3-9:	Medición de ángulo de contacto de los reactivos de flotación sobre la superficie mineral hidrofobizada.....	64
Tabla 3-10:	Tensiones de líquido.....	68
Tabla 3-11:	Características de Energía Superficial y sus componentes.....	68
Tabla 3-12:	Ángulo de contacto sobre superficie hidrofobizada.....	69
Tabla 3-13:	Resultados de flotación de especies de feldespato de relaves mineros.....	70
Tabla 3-14:	Resultados de flotación por etapas (Cleaner) de especies de feldespato de relaves mineros.....	70

Introducción

El feldespató, un aluminosilicato o silicato de estructura (“*framework silicate*”), formado por la sustitución parcial de silicio por aluminio, es un mineral industrial utilizado como materia prima en la fabricación de diversos grados de vidrios y cerámicos que contempla cerámica de alta gama, fibra de vidrio, entre otros; que lo convierte en una especie mineral de gran importancia, cuyo consumo representa alrededor del 95% en esta industria en particular (Manser, 1975).

Al ser una especie mineral de alta demanda, su consumo industrial ha hecho que en las últimas décadas se implemente una búsqueda de nuevas fuentes de recursos mineral, acudiendo a yacimientos antes no considerados; haciendo que se desarrollen investigaciones enfocadas hacia el beneficio y recuperación de feldespató en dichos lugares, bordeando la posibilidad de analizar materiales de desecho minero, que puede tener un potencial industrial en especies feldespáticas, visualizando un beneficio posterior de este mineral, aportando a la necesidad del consumo del mismo en la industria antes mencionada. Todo ello hace que se considere una economía circular que trae consigo beneficios ambientales potencialmente atesorados para la industria minera

Por otro lado, los relaves de minería metálica, compuestos principalmente de silicatos, son una ventana dentro de un escenario de economía circular para recuperar filosilicatos, especialmente feldespató potásico y sódico, de fuerte interés en la industria cerámica, del vidrio, con un crecimiento incesante en la actualidad. Como menciona (Kuzvart, s,f), se visualiza un nuevo enfoque desde el siglo pasado, y se revalorizan materiales y ahora reservas descartadas de minerales que pueden ser fuentes de calidad para uso industrial.

Como son enfoques nuevos, el desarrollo de la industria busca alternativas no convencionales para dar mayor alcance de obtención de mineral de calidad. Los feldespatos han sido por varios años procesados a través de concentración por flotación espumante, aunque su selectividad no sea alta (Manser, 1975), al tener una densidad relativamente igual al de cuarzo (SiO_2), la separación entre las dos especies usando tecnología de concentración gravitacional es prácticamente imposible, mientras que la flotación espumante tiene el reto de ser selectiva en la separación, por la similaridad composicional de los feldespatos con otros aluminosilicatos o el mismo cuarzo; por tal motivo, existe la posibilidad de contener una cantidad de sílice excedente que puede llegar a modificar las propiedades físicas del mineral (León & Tepán, 2011). Siendo así, este exceso de sílice libre perfila defectos superficiales en la presentación de productos finales, como tal, se considera un feldespato de calidad regular.

Sin embargo, a través de un enfoque fisicoquímico de sus propiedades, se muestra ciertos parámetros que se pueden considerar y mejorar notablemente la recuperación de feldespato. Es por ello que, a través de un mecanismo de flotación simple en el que se analiza la especie mineral de interés bajo ciertos escenarios se detalla ciertas propiedades de la química de superficies que se pueden analizar a escala laboratorio (Manser, 1975) y se analiza la dificultad de separación entre especies.

Como mencionan varios investigadores que han estudiado la flotación de ciertos silicatos (Ari, 2001) (Banik, Suresh, Mandre, & & Engineering, 2002) (Laverde, y otros, 2004) (Rattanakawin & Thacom, 2019), entre otros, la recopilación de datos generalmente sigue siendo un poco escasa, por ello se plantea realizar mayores aportes a estas investigaciones que pueden ampliar la visión en el área con innovaciones para el avance en el trabajo de flotación de minerales silicatos. Es así que esta investigación se centra en el estudio de un mineral de desecho minero metálico que contiene feldespato potásico (KAlSi_3O_8) conocido como Ortoclasa por medio de una caracterización y un estudio de las propiedades fisicoquímicas minerales frente a diferentes escenarios con parámetros de análisis de algunas variables como pH, reactivos colectores, presencia e influencia de iones

contaminantes en la superficie mineral, potencial zeta y energía libre superficial, que influyen principalmente en el proceso de flotación espumante con la implementación de la celda Partridge Smith a escala laboratorio, presentando una posible aplicación en la industria .

Objetivos

OBJETIVO GENERAL

Estudio del mecanismo de separación de feldespato de aluminosilicatos en material proveniente de relaves mineros.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Caracterización de relaves mineros de minería metálica para definir potenciales geometalúrgicos con fines industriales.

Evaluación a escala laboratorio de parámetros físico-químico que admitan la hidrofobización selectiva del feldespato respecto a otros aluminosilicatos.

Evaluar la interacción físico-química de feldespato en relaves mineros utilizando la teoría DLVO.

1.Estado del arte

1.1 Antecedentes

La flotación de feldespato se ha venido estudiando desde hace algunas décadas por los principales países productores de estos minerales de uso industrial, como Turquía que domina el mercado, conjuntamente con Italia, España, Estados Unidos, México, entre otros; dentro de estas investigaciones cabe mencionar que estudios de (Heyes, Allan, Bruckard, & Sparrow, 2012; Klyachin, 1969; Smith & Scott, 1990) , entre otros, han contribuido de manera significativa al conocimiento y desarrollo de tecnologías para la obtención de materias primas de feldespato a través de mecanismos que se conocen en la actualidad y que la industria los sigue utilizando como principios fundamentales del proceso.

Las principales fuentes del mineral provienen de rocas feldespáticas de forma directa, cuya extracción y procesamiento no contiene un proceso muy complicado, sin embargo, en uno de los Boletines de la Sociedad Española, 1988, acerca de la industria de cerámica y vidrio se menciona que, en el afán de satisfacer la necesidad de materias primas, se ha visto un estímulo para el tratamiento de otros tipos de rocas, con un contenido de minerales accesorios que contemplan un tratamiento diferente al conocido hasta la fecha, no obstante, se han convertido en una opción viable el aprovechamiento de estos yacimientos por la presencia de mineral útil que con el correcto tratamiento existe la posibilidad de obtener un material de una buena calidad. (Benito, 2019), (Laverde, y otros, 2004), entre otros, mencionan alternativas de beneficio mineral y procesamiento de mineral obteniendo materias primas de calidad.

A raíz de los primeros estudios publicados se han desarrollado investigaciones muy interesantes acerca de la flotación de feldespatos y la aplicación de diferentes reactivos colectores, depresantes, modificadores, etc. (Rattanakawin & Thacom, 2019). Sin embargo, particularmente, como Argüelles et. al, 2014, en su investigación mencionan la importancia de las variables que influyen en procesos de separación del feldespato, dónde radican las propiedades superficiales como la carga superficial mineral, la adhesión de reactivos y la química de superficies en general como actores principales que dominan sobre las propiedades físicas y que han determinado mejoras notables; enmarcan estudios más allá de evaluar nuevas fuentes minerales, basándose en las propiedades fisicoquímicas involucradas en el proceso de recuperación y concentración.

Es importante destacar que investigaciones recientes determinan la importancia de buscar nuevas alternativas de recuperar estos minerales con la aplicación de las propiedades físico-químicas de las partículas de tamaños muy finos (Sulaymonova, y otros, 2018), ya que las reservas de rocas pegmatíticas y arenas feldespáticas han ido disminuyendo, por lo que las investigaciones buscan implementar procesos de recuperación mineral de residuos que contienen tamaños de grano muy finos que en un principio se consideraron como parte de un material de ganga (Benito, 2019). En la actualidad, dentro de la minería se ha manifestado reutilizar estos productos de desecho mineral que tienen bajas leyes pero que se manejan en grandes volúmenes, por lo tanto, pueden llegar a determinar cantidades considerables de material fino con un potencial considerable con los mismos fines.

Como respuesta a estas condiciones de aprovechamiento según el estudio de (Zanellia, y otros, 2018), en las últimas décadas el reciclaje de desechos se ha convertido en un tema de gran importancia para la sostenibilidad ambiental de las operaciones mineras, mejorando la eficiencia en la utilización de recursos naturales. Siendo así, los minerales industriales se han convertido en uno de los objetivos de beneficio posterior para la obtención de materias primas para distintas industrias.

Varios estudios (Benito, 2019), (León & Tepán, 2011), (Novoa & Vargas, 2013) determinan una investigación ligada a una caracterización de material feldespático con implementación del proceso de flotación convencional incluyendo la influencia de ciertas variables de operación que se mantienen en determinar el rendimiento de reactivos, variando concentraciones, tiempos de acondicionamiento; que estiman el proceso de recuperación (Mantilla, Pedraza, & Laverde, 2008). Se encuentran limitadas en contribuir estudios más detallados sobre mecanismos que evalúen la interacción físico-química de las especies feldespáticas en determinados escenarios metalúrgicos que pueden llegar a determinar una selectividad a través de la hidrofobización de la superficie mineral aplicando teorías fijadas a tamaño de partículas relativamente finas.

En (Ari, 2001) se realiza un estudio enfocado en el mecanismo de adsorción de aminas y las aplicaciones industriales en el beneficio de flotación de silicatos con algunos feldespatos, entre ellos ortoclasa, incluyendo cuarzo en el que manifiesta ciertas propiedades superficiales obtenidas a través de un análisis diferente a estudios anteriores con métodos más directos, centrando la atención en la comprensión de las regiones específicas de adsorción de las aminas más utilizadas en la industria.

1.2 Geología Económica

El término Globalización y Geología económica se encuentra ligados desde el siglo pasado a raíz, en rasgos breves, de una autosuficiencia en materias primas estratégicas que invade a los opuestos en las guerras, así en años posteriores nace la idea de buscar un uso eficiente de materiales, reciclaje, sustitución (Kuzvart, s,f) la utilización de materiales más económicos y que tengan propiedades físicas que aporten en la producción de materiales para el desarrollo continuo de un lugar.

Todo esto conlleva a un nuevo enfoque que involucra revalorizar reservas descartadas de minerales antes descategorizados por no ser parte de la lista de metales preciosos de gran

valor. Sin dudar, su valor es más elevado, pero su extracción y producción son muy elevados y la inversión en los mismos se ha convertido en un impedimento para la minería. Es por ello que la industria de materiales industriales eleva su nivel y evidencia que da beneficios iguales o mayores con menores inversiones de maquinaria y hasta capital. Ahora no solo esa es una de las razones más importantes que impulsa el crecimiento de la industria, sino que en la actualidad ya empiezan a invadir esos enfoques de eficiencia de materiales reciclados hacia la misma minería metálica, es decir, en los residuos que produce como una aplicación de técnicas metalúrgicas para la recuperación de minerales industriales presentes en relaves de minería metálica.

Indiscutiblemente, hoy en día se habla de un desarrollo sostenible y de la búsqueda de nuevas fuentes de recursos que vayan de la mano del cuidado del medio ambiente, y esto incluye buscar un mejor almacenamiento y uso de los productos de desecho que se generan en una industria. Por ello nace la posibilidad de estudiar los relaves mineros con el fin de encontrar subproductos que benefician ambas partes involucradas y que además satisfaga la necesidad de un producto demandado. Inclusive aporta a la investigación científica y el conocimiento de nuevas alternativas de recuperación y concentración de minerales industriales, ya que las reservas actuales de minerales en roca van tornando hacia la escasez.

1.2 Minerales Industriales

Un material, roca o mineral de origen natural que llega a tener un valor económico se define como un mineral industrial por ciertas propiedades físicas que lo hacen útil para diferentes fines (Lehtinen, 2015) Principalmente la industria de la cerámica y el vidrio han hecho uso ampliamente de estos minerales para diferentes productos e incluso la producción de materias primas.

El sector minero en Colombia en términos de producción de feldespato en las últimas cifras del 2019, tiene como principales departamentos productores a Tolima, quien lidera la producción de feldespato, Norte de Santander y Antioquia. Según el (UPME, 2020), se tuvo un total de 161.518 toneladas de producción mineral en 2019.

Como se ha denotado en las últimas décadas el incremento de la utilización de estas materias primas demanda optar por importaciones; en Colombia, los principales importadores de materias primas para cerámica y vidrio y la industria derivada en general de Feldespato, lidera Suministros de Colombia S.A.S con un 33.4%, seguido de Locería Colombiana S.A.S con 24.4%, Cerámica Italia S.A. con 20.8 y otras industrias con el 21.7% de presencia en el mercado de consumo de productos de origen de ciertos países como España, Estados Unidos, México y otros (Veritrade, 2015)

1.2.1 Silicatos

Un silicato es un compuesto con estructura cristalina de tetraedros de SiO_4 , aislado o unido por uno o más átomos de oxígeno que adquiere una carga negativa para formar grupos, cadenas, láminas o estructuras tridimensionales con elementos metálicos. Generalmente se encuentran clasificados según su estructura en Nesolilicatos, Sorosilicatos, Ciclosilicatos, Inosilicatos, Filosilicatos (Manser, 1975), donde la unidad fundamental de todas las estructuras es el ion ortosilicato. En la figura 1-1. Se observa el ion ortosilicato y

Figura 1-1: Estructura básica de silicatos



Fuente: Estructura de los silicatos – Quiroga M.

Los tectosilicatos son los silicatos de estructura más compleja, es cristalina en la que los tetraedros forman una estructura tridimensional, en la figura 1-2. Se aprecia su estructura.

Figura 1-2: Estructura compleja de los tectosilicatos



Fuente: Estructura de los silicatos – Quiroga M.

La sustitución del 25% de silicio por aluminio y la introducción en esta red de iones de metales alcalinos da lugar a minerales de feldspatos, mientras que si se supera el 50% reemplazando el silicio por aluminio se produce un feldespatoide (Manser, 1975)

1.2.2 Feldespatos

Los feldespatos son silicatos pertenecientes al grupo de los tectosilicatos, son recursos industriales presentes de manera abundante en la corteza terrestre, constituidos principalmente por Na, Ca y K; éstos conforman el 60% de la corteza, principalmente las plagioclasas (KAlSi_3O_8) con un 45%, pues son ellas las constituyentes primarias de las rocas ígneas (Duque Escobar, 2016). El feldespato tiene una dureza de 6.0 a 6.5, peso específico entre 2.56 a 2.77, de lustre vítreo y su color puede variar desde blanco o incoloro hasta distintos tonos de rosa, amarillo, verde o rojo, pero principalmente blanco, crema o rosa (Manser, 1975).

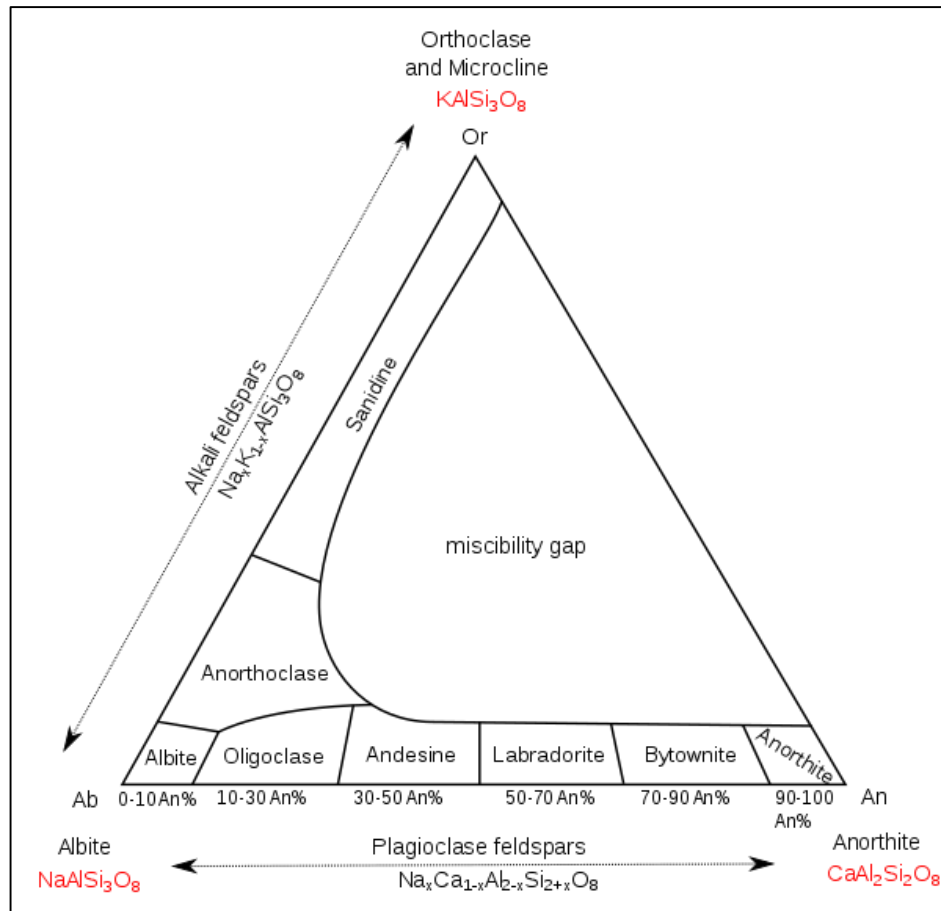
Se usa el término químicamente, como aluminosilicato que lleva una combinación de K, Na o Ca, y en otros casos una mezcla de estos. Se conoce como feldespato potásico (Ortoclasa y Microclina, KAlSi_3O_8), feldespato sódico (Albita, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y feldespato cálcico (Anortita, $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$) (Ari, 2001)

Las propiedades del feldespato que lo hacen útil para aplicaciones industriales son el contenido de álcali y alúmina, principalmente para la fabricación de cerámicas y esmaltes, el feldespato sódico es muy apreciado por su capacidad fundente superior a la de feldespato potásico, que controla el grado de vitrificación. Aunque si se habla de la refractariedad de un material, aumenta con la presencia de FD-K en un producto cerámico. En general, es conocido la fabricación de porcelana eléctrica de alto voltaje con feldespato potásico y por parte de las industrias del vidrio se interesan por el alto contenido de alúmina y la presencia de álcalis, es decir que la proporción álcali / alúmina especifica su aplicación final (Ari, 2001).

Generalmente se presentan como $\text{W, Al (Al, Si) Si}_2\text{O}_8$, donde W puede ser Na, K, Ca y raramente Ba. Los feldespatos están compuestos por una red continua tridimensional de

SiO_4 y AlO_4 , tetraedros con cationes monovalentes y / o divalentes cargados positivamente en los intersticios de esta red cargada negativamente. Se pueden dividir en varias series de composición, como se indica en la figura 1-3, con una alta influencia de la temperatura, los feldspatos de sodio y calcio en oligoclasa y andesina es arbitrario, mientras que una forma de temperatura baja de la microclina de feldespato potásico (Manser, 1975).

Figura 1-3: Series de composición de Feldspatos



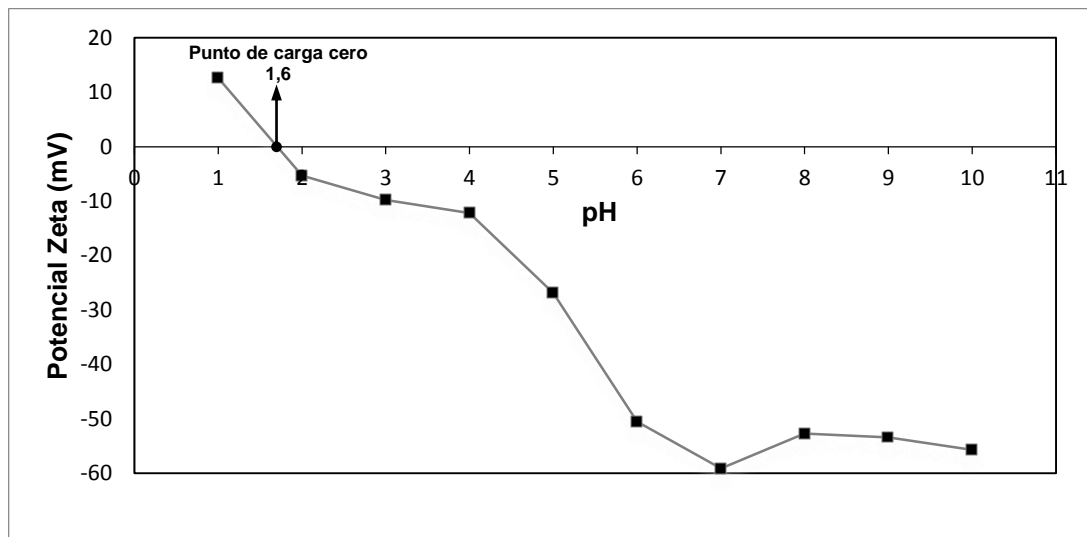
Fuente: Diagrama de fase ternaria de los feldspatos (900° C). Greenwood, A. Earnshaw – Chemistry of Elements (1998) – p. 357

Potencial zeta de feldespato

El punto de carga cero (ZPC) del feldespato toma valores de 1.4 hasta 1.6. En la figura 1-3., se aprecia la curva de potencial de feldespato con mineral de pureza del 94.5%. De

acuerdo a sus propiedades químicas la sustitución de cationes monovalentes de la superficie por hidrógeno se produce en condiciones ácidas suaves y se conoce que la lixiviación selectiva de aluminio de la red de silicato tiene lugar por debajo de pH 4.0 (Manser, 1975)

Figura 1-4: ZPC de feldespato potásico



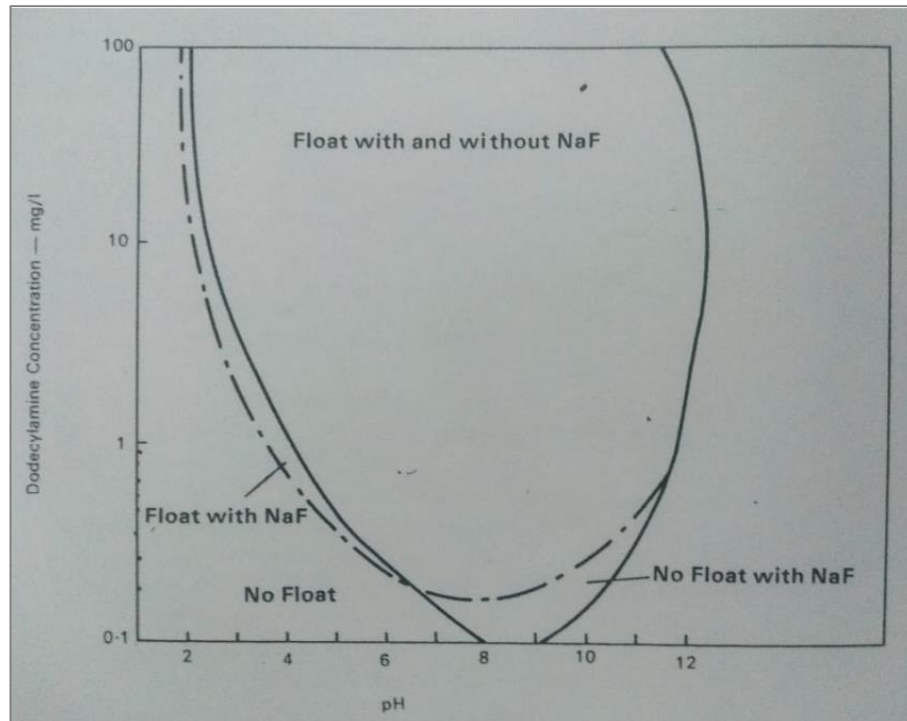
Fuente: Elaboración propia

Características de flotación

Las especies de feldespato incluyendo a la ortoclasa, no flotan si no hay una activación con cationes usando colectores aniónicos. Ahora, de acuerdo al diagrama catiónico de un feldespato potásico se observa que no es tan sensible a cambios en el valor de pH, mientras que en la mayoría de feldespatos el pH óptimo de flotación toma valores básicos entre 8.0 y 9.0 en el caso de albita, y de 10.0 hasta 11.0 para oligoclasa y labradorita. En estos escenarios no tan ácidos se presencia una activación suave con 20 ppm de NaF en todos los tipos de feldespato (Manser, 1975).

En la figura 1-4. y en la figura 1-5 se muestran los diagramas catiónicos de Albita en comparación con el de Ortoclasa con reactivo DDA y NaF.

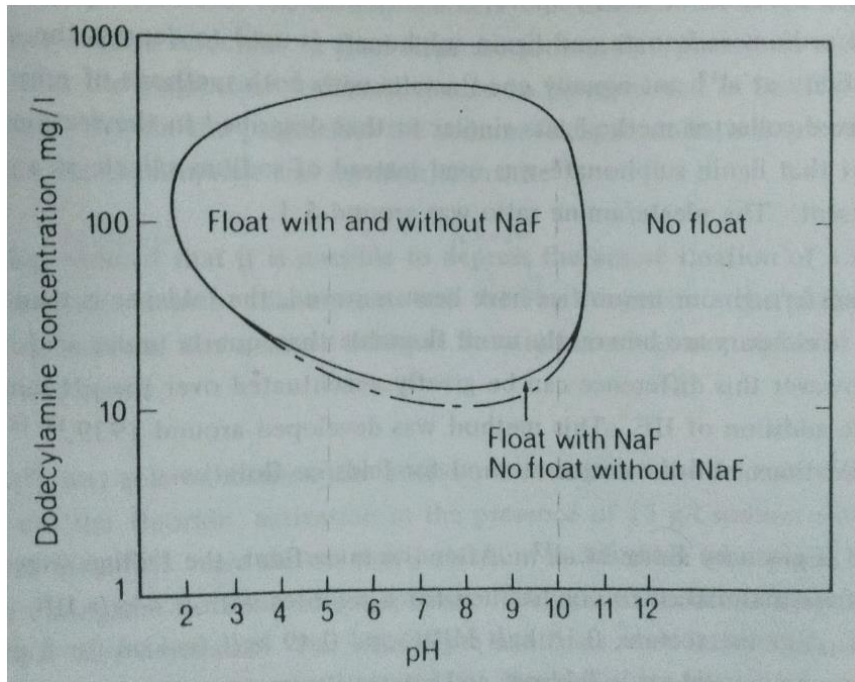
Figura 1-5: Diagrama catiónico de feldespato – Albita



Fuente: Handbook of silicate flotation – R. M., Manser (1975)

Con los diagramas se identifica zonas de flotación de minerales de feldespato tipo potásico en presencia de NaF con dosificaciones de colector Dodecilamina con interacción de pH en función de la concentración del reactivo (mg/l).

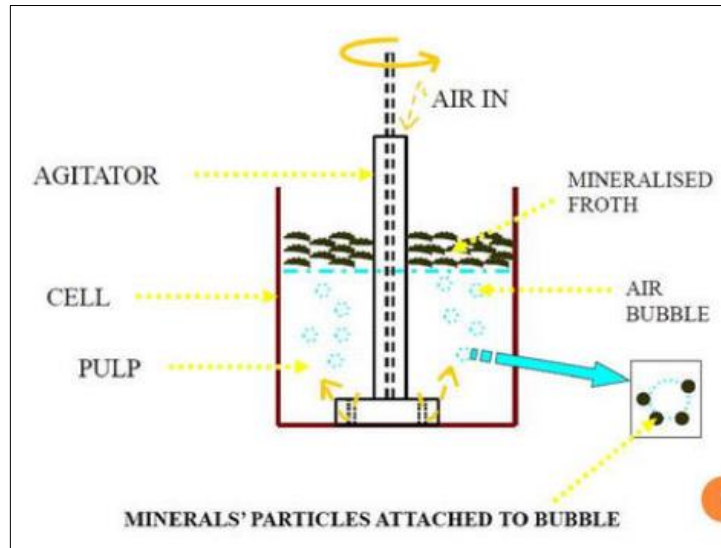
Figura 1-6: Diagrama catiónico de feldespato – Ortoclasa



Fuente: Handbook of silicate flotation – R. M., Manser (1975)

1.3 Fundamentos de flotación

La flotación es un proceso fisicoquímico dentro de la concentración de minerales que trabaja en suspensiones acuosas con el fin de separar partículas "hidrófobas" (repelentes o sin afinidad química con el agua) de partícula "hidrofílicas"(afines químicamente con el agua), asistida con inyección de burbujas de aire. Puede ser un proceso selectivo con base en la propiedad de hidrofobicidad; esta puede ser natural de una superficie de un mineral o inducida por medio de la adsorción de sustancias surfactantes. La flotación es un proceso complejo que implica estudios de fenómenos de hidrodinámica y fisicoquímica de superficies, con interacción entre varios factores, tales como la naturaleza química de los reactivos de flotación, componentes del equipo y componentes de operación (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2008). En la figura 1-1 se muestra el proceso de flotación y la interacción de los factores del proceso.

Figura 1-7: Mecanismo de flotación.

Fuente. Role of Surfactants in Mineral Processing: An Overview - Fundamentals of froth flotation

El proceso de flotación por espuma, que utiliza la diferencia en la hidrofobicidad de los minerales, se emplea en varias industrias (procesamiento de minerales y otras) para el procesamiento de tamaños relativamente finos, aprovechando las diferencias en las propiedades físico-químicas de la superficie entre minerales valiosos y ganga, para eliminar las impurezas de diferentes minerales para producir un concentrado de buena calidad (Pattanaik & Venugopal, 2019).

1.3.1 Procesos de obtención de feldespato

Manser, 1975 menciona en su libro una recopilación de algunos estudios destacados en la flotación de feldespato, donde se ha trabajado fundamentalmente con el mecanismo de activación de fluoruro a pH muy bajos; algunos de ellos incluyen:

- Limpieza de superficies minerales disolviendo capas amorfas.
- Formación de SiF_6^{2-} en solución, que luego se reabsorbe en los átomos de aluminio de la superficie.

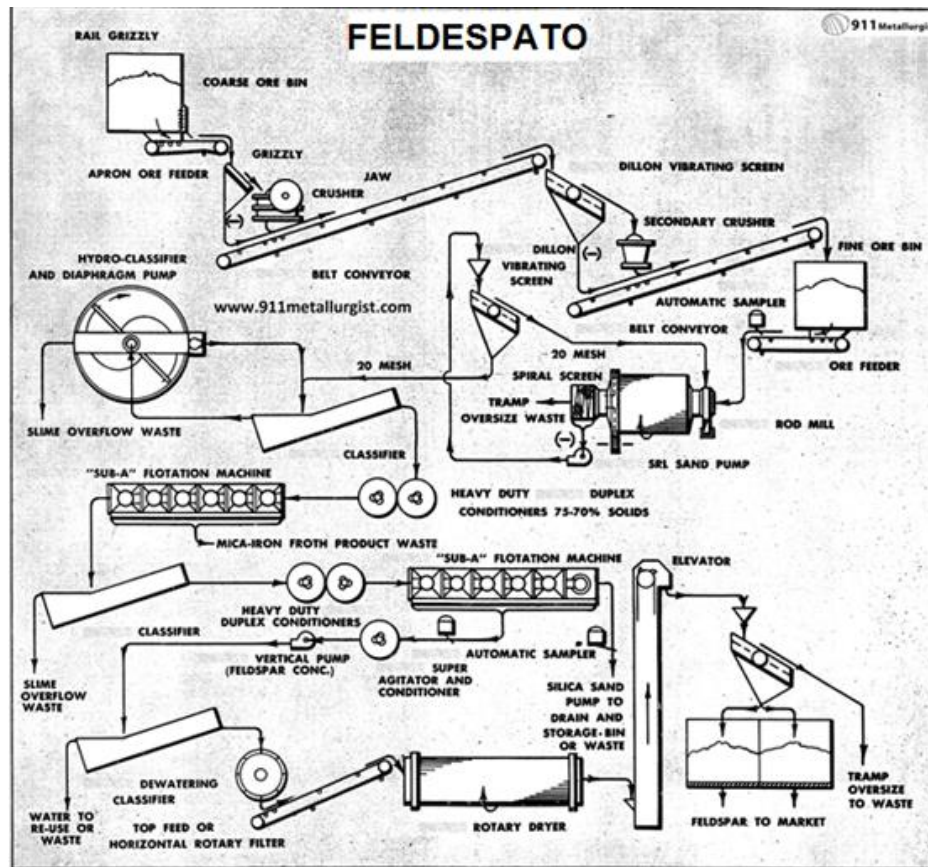
- Formación de complejo de amina SiF_6^{2-} en solución, que absorbe átomos de aluminio de la superficie.
- Formación de complejos de aluminio- fluoruro cargados negativamente en la superficie del mineral.
- Complejamiento de cationes determinantes de potencial multivalentes en solución.
- Formación de una capa de silicofluoruro de sodio o potasio en la superficie del mineral.

En ellos se observa el aumento de potencial zeta negativo en la superficie asociado a una mayor adsorción de iones de aluminio en solución, la activación de fluoruro en valores de pH de 2.0 a 2.5 y al trabajar con el complejo $(\text{RHN}_2) \text{SiF}_6$ se obtiene una fuerte flotación a pH 5.0, distinto a lo que sucede a pH 2.0 a 3.0 donde no se produce el mismo resultado.

La flotación espumante ha sido el proceso más conocido para el procesamiento de feldespato, que busca separar contaminantes e impurezas para mantener la alúmina (Al_2O_3) en un 19%, incluso en minerales de bajo grado de feldespato. En la figura 1-8., se puede apreciar los diferentes procesos previos por los cuales un mineral de feldespato tiene que pasar para llegar hasta la etapa de concentración por flotación, que por lo general es extraído desde un tajo abierto y transportado a la planta para tratarlo a través de un circuito abierto convencional con un sistema de reducción de tamaño y molienda. A partir de esta etapa se concentra el mineral por flotación y se lleva a cabo en circuitos ácidos, ya sea con H_2SO_4 o HF.

El diagrama de flujo muestra un primer banco de celdas de flotación que elimina las impurezas, aunque en algunos casos se flota la mica, seguido de la flotación de minerales de hierro. Después de la eliminación de las impurezas, los relaves de esta etapa de flotación son deslamadas y el producto deslamado es condicionado a alta densidad para deprimir la sílice. (David, 2016)

Figura 1-8: Diagrama de flujo de tratamiento de feldespato.



Fuente. Sitio web Foro 911 Metallurgist, Procesamiento de Feldespato

La aplicación de la flotación para la separación del feldespato de otros minerales de su composición tales como cuarzo, minerales arcillosos, mica, ilmenita, rutilo, anatasa y magnetita, así como la separación de los minerales feldespato de manera individual, es un mecanismo de separación y recuperación de feldespato que utiliza colectores y activadores aniónicos o catiónicos con la determinación de variables como el pH, tiempo de acondicionamiento, entre otras, siendo el proceso más eficiente utilizado en la actualidad (Heyes et al., 2012)

Varios autores mencionan a la flotación selectiva de cuarzo como la mejor opción de separación de feldespato, (Klyachin, 1969) menciona que el enriquecimiento de cuarzo, materia prima de feldespato, es por flotación en un medio ácido basado en ácido

fluorhídrico o sus sustitutos utilizando colectores de cationes de amina. La mejor separación del feldespato y el cuarzo se obtiene a pH 2.0 - 2.5, que se produce mediante la introducción de 2.0 - 2.5 kg de HF por tonelada de materia prima, dando una concentración en la pulpa de 500 - 600 g/ m³.

Este mecanismo se ha mantenido con ciertas modificaciones, sin embargo, contribuciones en busca de nuevas alternativas han facilitado el uso de otros reactivos en presencia de escenarios físico químicos diferentes a los iniciales, e incluso la posibilidad de utilizar minerales de baja ley que contienen porcentajes destacados de interés que se definen en la línea de reprocesamiento de minerales.

1.4 Parámetros fisicoquímicos de flotación

1.4.1 Hidrofobicidad

La base de la flotación por espuma es la diferencia en la humectabilidad de diferentes minerales. Las partículas varían desde aquellas que son fácilmente humectables con agua (hidrófilas) hasta aquellas que son repelentes al agua (hidrófobas). Si una mezcla de partículas hidrofóbicas e hidrofílicas se suspende en agua y se burbujea aire a través de la suspensión, las partículas hidrofóbicas tenderán a adherirse a las burbujas de aire y flotarán a la superficie. La capa de espuma que se forma en la superficie luego se cargará fuertemente con el mineral hidrófobo y se puede eliminar como un producto separado. Las partículas hidrófilas tendrán mucha menos tendencia a adherirse a las burbujas de aire, por lo que permanecerán en suspensión y serán eliminadas (Kawatra & Eisele, 1992).

La termodinámica juega un papel preponderante en la hidrofobicidad de las partículas en el proceso de flotación, siendo la energía libre superficial la que permite relacionar el área de las partículas y la tensión superficial del líquido, a temperatura, presión y número de

moles constantes, siendo entonces la tensión superficial una medida del trabajo requerido para aumentar la superficie en 1 cm^2 (ver ecuación (1.1)) (Finch & Wills, 2016)

$$\gamma = \left[\frac{dG}{dA} \right]_{T,P,n} \quad (1.1)$$

Las fuerzas superficiales permiten la interacción entre los reactivos en solución y las partículas sólidas. Por ello con la ayuda de un reactivo se busca una mayor adhesión de las partículas sólidas a la fase gaseosa que a la líquida para alcanzar una flotación selectiva. (Fuerstenau, Jameson, & Yoon, 2007)

En la adhesión, burbuja – sólido, al entrar en contacto se genera un ángulo, que es formado por las dos fases y es conocido como ángulo de contacto, denominado como Θ , que describe la hidrofobicidad mineral del sólido (Bustamante Rúa, Gaviria Cartagena, & Restrepo Baena, 2008). Thomas Young a través de la ecuación 1.2 propone que este valor se relaciona con la tensión superficial, la cual determina un balance de fuerzas en las tres fases presentes (agua, sólido y aire) (Finch & Wills, 2016). Según (Kawatra & Eisele, 1992) la unión de las burbujas a la superficie está determinada por las energías interfaciales entre las fases sólida, líquida y gaseosa (ver Ecuación (1.2)).

$$\gamma_{S/A} = \gamma_{S/W} - \gamma_{W/A} \cos\theta \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

donde $\gamma_{S/A}$ es la energía superficial de la interfaz sólido/aire, $\gamma_{S/W}$ es la energía superficial de la interfaz sólido/agua, $\gamma_{W/A}$ es la energía superficial de la interfaz agua/aire y θ es el ángulo de contacto. La tensión líquido – aire ($\gamma_{W/A}$) es la única que se puede medir de forma directa Así Young despejando de (1.2) define la siguiente ecuación 1.3:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{S/A} - \gamma_{S/W}}{\gamma_{W/A}} \quad (1.3)$$

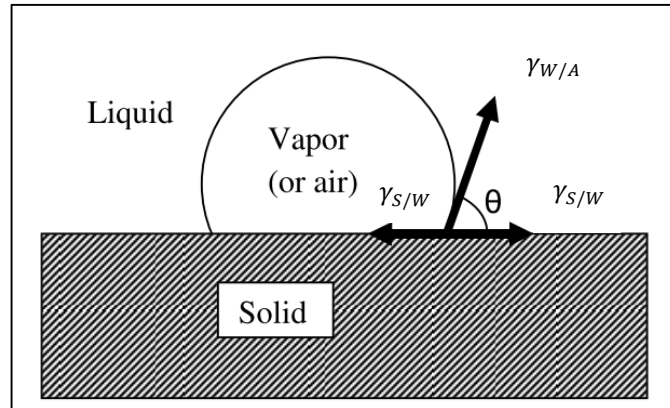
Si el ángulo de contacto es muy pequeño, la burbuja no se adhiere a la superficie, mientras que un ángulo de contacto muy grande da como resultado una unión muy fuerte de la burbuja. Un ángulo de contacto cercano a los 90 ° es suficiente para una flotación de espuma efectiva en la mayoría de los casos (Kawatra & Eisele, 1992)

Se dice entonces, a partir de la ecuación (1.3) se derivan las siguientes ecuaciones: Cuando el mineral es completamente hidrófilo (ver ecuación (1.4)), cuando el mineral es hidrófilo parcialmente (ver ecuación (1.5)) y cuando el mineral es hidrófobo (ver ecuación (1.6)). Así mediante diferentes ensayos a escala laboratorio se puede determinar la afinidad del mineral al líquido. (Mercedes & Suárez, 2013)

$$\gamma_{S/A} - \gamma_{S/W} = \gamma_{W/A} \rightarrow \cos \theta = 1 \rightarrow \theta = 0^\circ \quad (1.4)$$

$$\gamma_{S/A} - \gamma_{S/W} = \gamma_{W/A} \rightarrow \cos \theta < 1 \rightarrow \theta > 0^\circ \quad (1.5)$$

$$\gamma_{S/A} - \gamma_{S/W} = \gamma_{W/A} \rightarrow \cos \theta = 0 \rightarrow \theta = 90^\circ \quad (1.6)$$

Figura 1-9: Ángulo de contacto

Fuente. Froth Flotation - Fundamental Principles

Durante el proceso de adhesión de una partícula con una burbuja de aire, la capa que las separa puede cambiar a medida que la burbuja se aproxima a la superficie del mineral, por lo que hay tres etapas durante el proceso de flotación:

- Predomina la hidrodinámica: El acercamiento de la burbuja al sólido debido a la atracción o turbulencia del proceso. La película de agua es completamente estable, su energía libre se incrementa a medida que la burbuja se aproxima al mineral.
- Predomina interacción de fuerzas moleculares (Van der Waals) y eléctricas: El adelgazamiento de la película de agua entre la burbuja y la partícula hasta la ruptura se originan de la interacción de las dobles capas que hay en torno al sólido y de hidratación de cualquier grupo hidrófilo existente. La película de agua es inestable y la energía libre disminuye a medida que se acerca a la superficie mineral.
- Se define el ángulo de contacto: Ruptura de la película de agua entre el sólido y la burbuja y se establece un equilibrio de contacto.

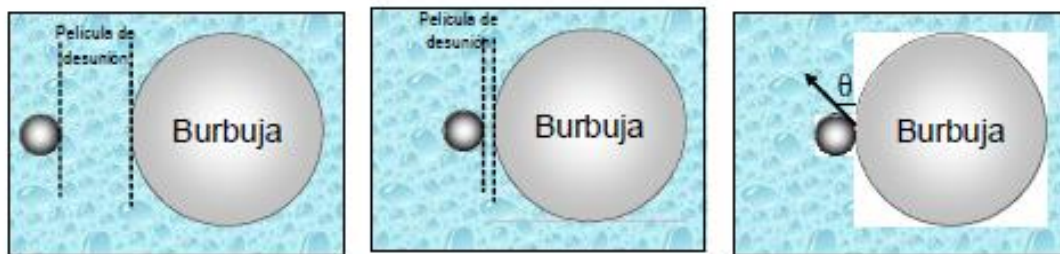
Es necesario una fuerza para romper la interfase sólido – burbuja conocido como trabajo de adhesión (W_{adh}) (ver ecuación (1.7)) y es el trabajo necesario para separar en las interfases sólido – aire, aire – agua y sólido – agua, conocida como ecuación de Dupré:

$$W_{adh} = \Delta G_{adh} = \gamma_{W/A} + \gamma_{S/W} - \gamma_{S/A} \quad (1.6)$$

Si se sustituye la ecuación de Young en la ecuación anterior se expresa la energía libre en términos de Θ (ver ecuación (1.7)). Por lo tanto, a mayor ángulo de contacto, mayor es la variación de la energía libre y la adhesión se vuelve más espontánea. Por el contrario, si $\Theta = 0^\circ$, el trabajo de adhesión es nulo y el sólido se vuelve hidrófilo. (Bustamante Rúa, Gaviria Cartagena, & Restrepo Baena, 2008)

$$\Delta G_{adh} = \gamma_{W/A}(\cos\theta - 1) \quad (1.7)$$

Figura 1-10: Proceso de adhesión partícula - burbuja



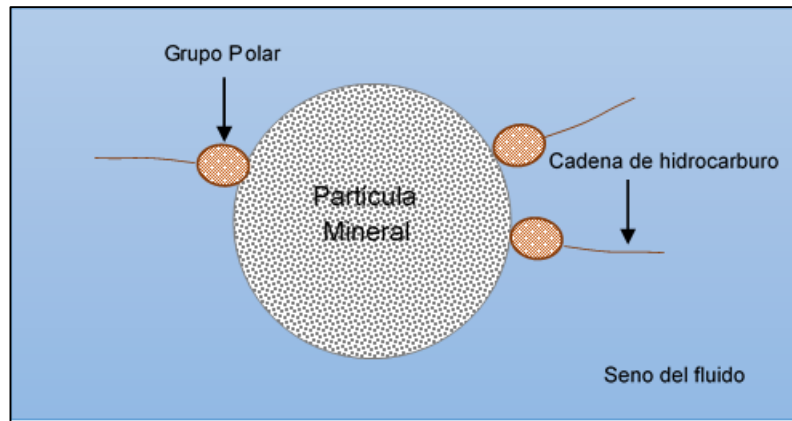
Fuente: (Bustamante Rúa, Gaviria Cartagena, & Restrepo Baena, Notas de clase de la asignatura: Concentración de Minerales, 2008)

Tomando en cuenta todo esto, se determina que algunos tensoactivos ayudan a formar la película hidrófoba en la superficie mineral, incrementando el ángulo de contacto como en la figura 1-10, y su adsorción mantiene en equilibrio la película, conjuntamente con la adhesión que permite al sólido mantenerse aglomerado con las burbujas de aire para generar en su ascenso una espuma enriquecida produciendo el proceso de flotación selectivo.

1.4.2 Reactivos Colectores

Los colectores son sustancias químicas orgánicas con una estructura molecular que se divide en un grupo polar que puede reaccionar con los grupos iónicos del agua y uno no polar que es un radical hidrocarbonado, que no reacciona con el agua, tomando la acción de repelerla (Figura 1.11). De acuerdo a esta definición se utilizan para inducir hidrofobicidad a una superficie mineral. La estructura y composición de cada colector determina su actividad con los dipolos del agua, y su adsorción dependerá del tiempo de acondicionamiento para que la cinética de reacción ocurra. En el proceso, el grupo no polar, la cadena de hidrocarburos (R) se orienta hacia la fase acuosa y el grupo polar sobre la superficie mineral generando la adsorción (fisisorción o quimisorción). Siendo así evidente una hidrofobización de la partícula. (Bulatovic, 2014)

Figura 1-11: Colector en contacto con la superficie mineral

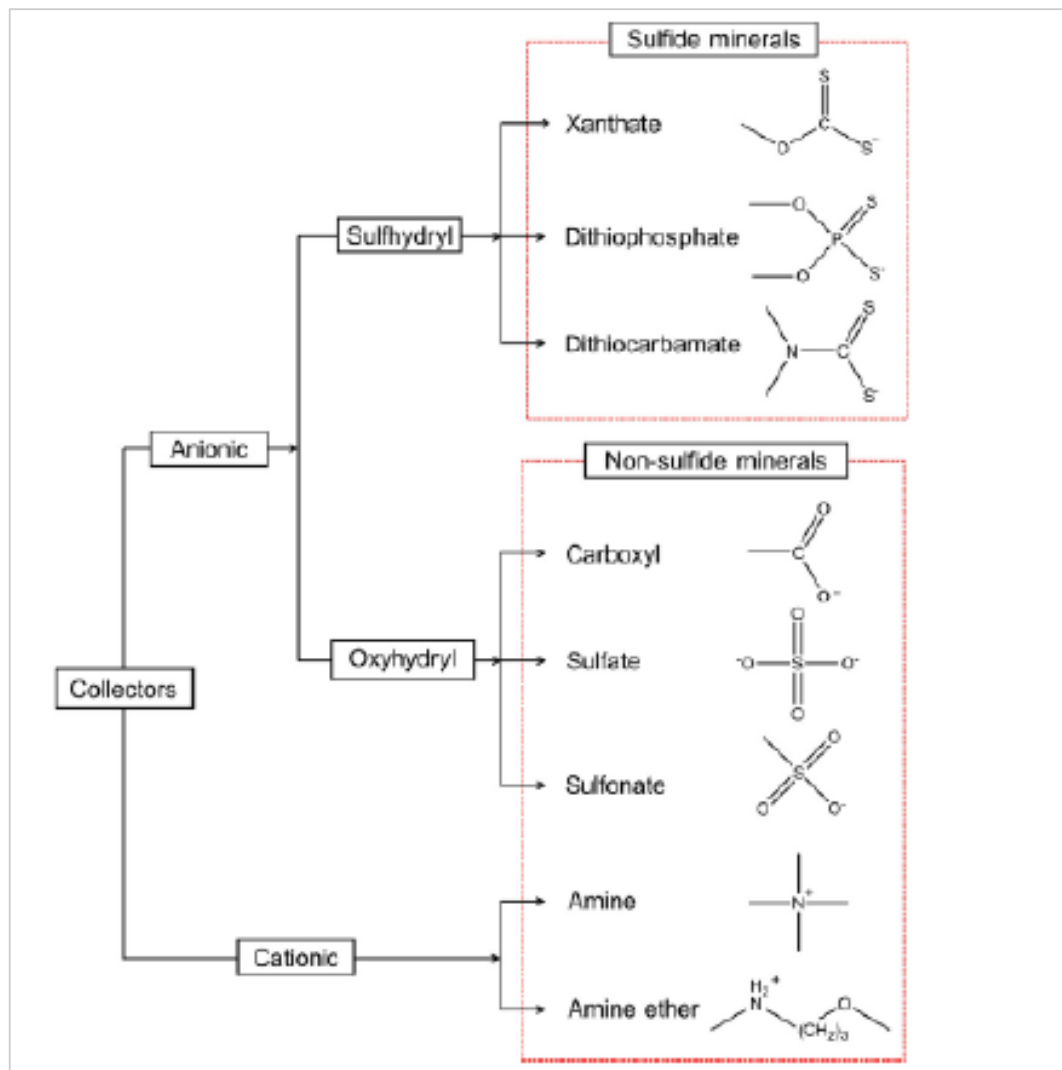


Fuente: Elaboración propia – Notas de clase

La adsorción de los colectores sobre un mineral depende de algunos factores como la carga superficial y la composición química superficial del mineral, la química en solución del mineral, de los surfactantes y del solvente. Si el sólido adsorbe iones del colector y la cadena hidrocarbonada se mantiene hacia el seno de la solución, la partícula hidrofobizada asciende selectivamente.

Los colectores se pueden clasificar como colectores aniónicos o catiónicos, de acuerdo a su aplicación y su ión determinante como se muestra en la Figura 1.12.

Figura 1-12: Clasificación de colectores



Fuente: (Finch & Wills, 2016)

Colectores Catiónicos

Son compuestos orgánicos que tienen una carga positiva y son altamente utilizados en la flotación de silicatos. Representan este grupo las aminas que tienen la estructura general:



Las aminas han sido utilizadas ampliamente como colectores de flotación en rangos de pH (1.5 – 11). La mayoría se pueden considerar como amoníaco con uno o más átomos de hidrógeno reemplazados por una cadena de hidrocarburo. Según el reemplazamiento se clasifican en los siguientes grupos (Bulatovic, 2014):

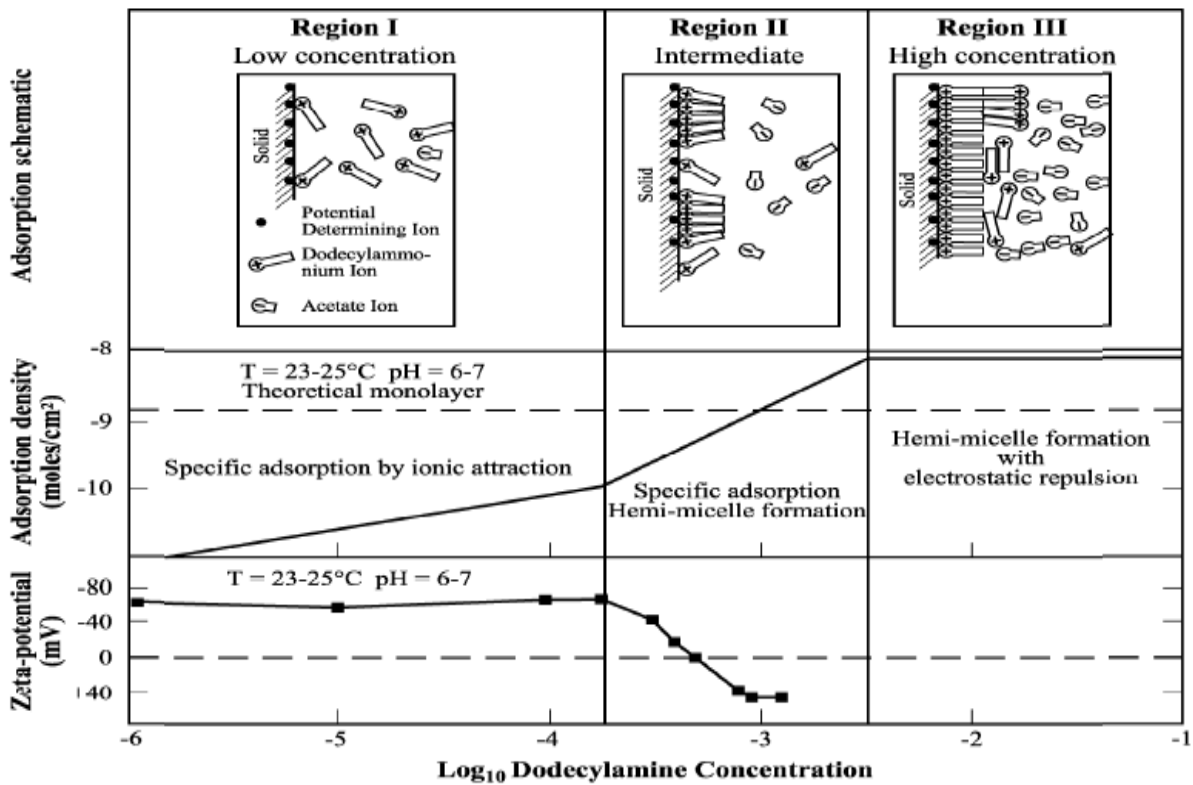
Tabla 1-1: Clasificación de grupos de aminas

$\begin{array}{c} \text{H} - \text{N} \begin{array}{l} / \text{H} \\ \backslash \text{H} \end{array} \end{array}$	Amoníaco
$\begin{array}{c} \text{R} - \text{N} \begin{array}{l} / \text{H} \\ \backslash \text{H} \end{array} \end{array}$	Amina Primaria
$\begin{array}{c} \text{R} - \text{N} \begin{array}{l} / \text{H} \\ \backslash \text{R} \end{array} \end{array}$	Amina Secundaria
$\begin{array}{c} \text{R} - \text{N} \begin{array}{l} / \text{R}'' \\ \backslash \text{R}' \end{array} \end{array}$	Amina Terciaria

(Manser, 1975) menciona como colector catiónico común a la amina primaria que contiene entre 12 y 18 átomos de carbono en su cadena. Dodecilamina es una amina primaria ($C_{12}H_{15}NH_2$) que ha sido utilizada como un colector catiónico en la flotación de ortoclasa con el uso de NaF. Como el uso de HF no es tan conveniente ya que se trabaja pH relativamente ácidos, se busca reducir su uso con NaF trabajando a pH básicos de acuerdo al diagrama catiónico de feldespatos – Ortoclasa como se muestra en la Figura 1-6.

Es así también como (Ari, 2001) en su trabajo analiza los diferentes escenarios de adsorción de aminas en la superficie mineral de algunos silicatos y las propiedades de las capas adsorbidas para diferentes usos industriales. Al ser las aminas primarias altamente solubles se utilizan regularmente, a pH ácidos, se encuentran ionizadas, mientras el silicato está cargado negativamente. En estas condiciones y a concentraciones bajas de DDA, el sistema tiene una baja adsorción y poca flotabilidad. De acuerdo a estas consideraciones el ángulo de contacto que presenta es relativamente pequeño. En la región II se aprecia un cambio en la adsorción de amina a una cierta concentración. Sin embargo, es notorio que, a concentraciones altas, y en condiciones neutras y ligeramente alcalinas, la hidrofobicidad disminuye.

Figura 1-13: Modelo de adsorción de Gaudin – Fuerstenau (sistema cuarzo - DDA)



Fuente: Flotation of silicate (Tesis Doctoral)

Siendo así, se puede considerar tomar en cuenta las condiciones de la región III para flotar otro silicato, como un feldespato, en el que, si la hidrofobicidad del cuarzo disminuye, se puede trabajar para hidrofobizar en condiciones alcalinas con feldespato utilizando como reactivo colector, Dodecilamina con una concentración constante y analizar la cinética de reacción en el proceso de flotación.

1.4.3 Potencial Zeta

La evaluación de la hidrofobicidad de las partículas se puede realizar mediante la medición del potencial Zeta de los principales minerales. (Mantilla, Pedraza, & Laverde, 2008) mencionan como parte de los análisis con el fin de desarrollar nuevas estrategias de flotación, el estudio de las propiedades superficiales de los diferentes minerales en contacto con los reactivos en medio acuoso, que generan teorías sostenibles sobre la humectabilidad de minerales. Dichos estudios pueden incluir análisis de carga superficial, adsorción de reactivos, medición de ángulos de contacto, entre otros. La medición de potencial zeta es una técnica que proporciona la información suficiente de la distribución de carga superficial en la interfase sólido/agua. Es en este sentido el estudio del potencial superficial puede ser utilizado para la evaluación y conocimiento de los procesos de separación por flotación espumante.

En suspensiones acuosas de minerales, las partículas adquieren carga eléctrica superficial debido al desbalance eléctrico generado por la rotura de enlaces en la superficie, por lo que se genera una concentración de iones en la solución en la cercanía de la superficie de las partículas, y a su vez ésta concentración disminuye al incrementar la distancia entre las partículas, provocando una diferencia de potencial entre la superficie de la partícula y el seno de la solución.

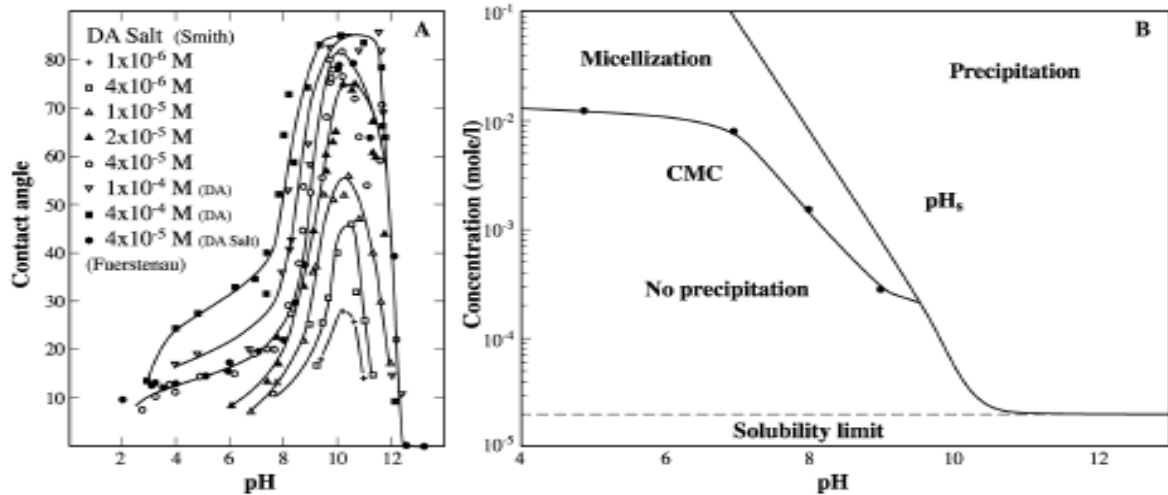
En metalurgia cuando se habla de flotación de minerales el potencial eléctrico es el de mayor importancia, puesto que cuando una partícula tiene un movimiento relativo con

respecto a una solución acuosa, esta partícula arrastra o retiene a los iones de la doble capa compacta, de tal forma que el potencial de esta partícula, en las condiciones señaladas, es el potencial – zeta. Se han manifestado en las últimas décadas como interés destacado los diferentes aspectos de la fisicoquímica de la superficie, donde el análisis de los fenómenos de teorías relacionados con la llamada doble capa eléctrica o simplemente doble capa y la carga eléctrica superficial plasma una importancia para la interpretación de las propiedades de la superficie de un mineral. (Bustamante Rúa & Gaviria Cartagena, 2008)

pH en la flotación espumante

En la flotación de silicatos se ha mantenido durante el tiempo un proceso bajo condiciones ácidas para obtener la selectividad entre especies de silicato presentes en una mena mineral. Ciertamente, en flotación el pH juega un papel importante ya que la selectividad depende del equilibrio entre las concentraciones de reactivo y las condiciones del proceso. Sin embargo, de acuerdo a diagramas de adsorción de aminas como colectores de feldespato, se puede manifestar ciertas regiones de hidrofobicidad en condiciones alcalinas que se pueden aprovechar para la flotación de especies de feldespato, ya que en esta región el cuarzo es menos hidrófobo. Si esto es posible, el uso de HF se mantendría mínimo, siendo reemplazado por NaF que tiene menor impacto para la industria.

Figura 1-14: a) Ángulo de contacto en función del pH con DDA. b) Diagrama de dominio para soluciones acuosas de cloruro de dodecilamonio



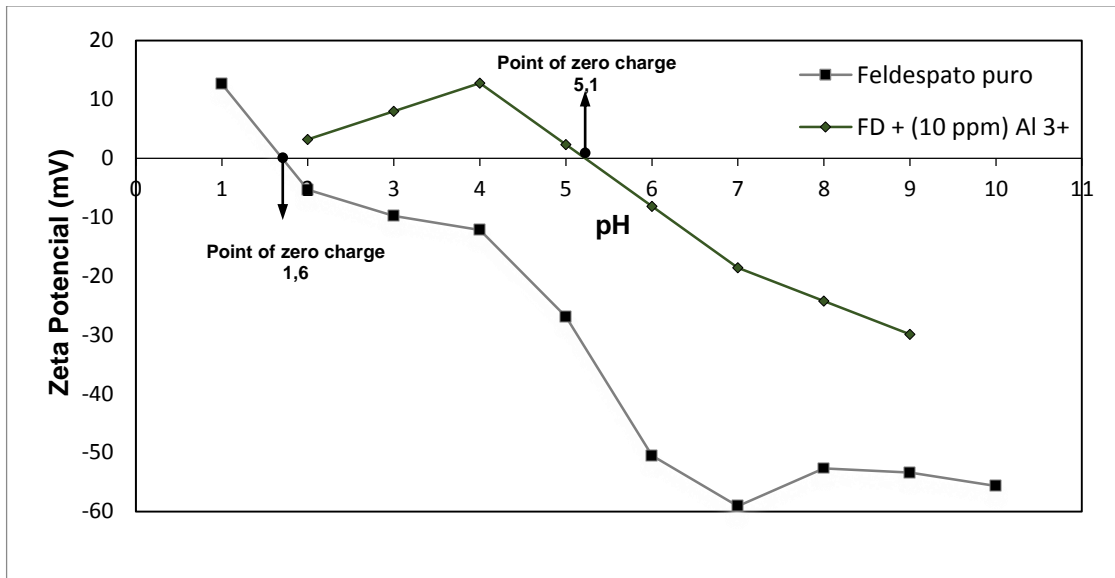
Fuente: Flotation of silicate (Tesis Doctoral) (Ari, 2001)

1.4.4 Iones Contaminantes

La presencia de ciertos iones puede hacer que la carga superficial de un mineral pueda cambiar o no sustancialmente. Si la superficie del mineral posterior a un proceso de reducción de tamaño cambia, la rotura de cristales puede presentar superficies en las que los cationes (Al³⁺, Mg²⁺, Fe³⁺, Mn²⁺, etc.) predominan como sitios de alta energía y en la que los colectores de carga opuesta (aniónica) pueden adsorberse (Manser, 1975). Si los cationes mencionados pueden adsorberse sobre la superficie mineral, pueden invertir la carga negativa de un mineral. En la figura 1.15, se muestra la carga superficial que tiene un feldespato de alta pureza, que al tener un punto de carga cero, a pH muy bajos tiene la necesidad de trabajar en condiciones muy ácidas si se requiere una flotación selectiva de este mineral. Si, por el contrario, se presenta la curva de feldespato potásico con ZPC de pH 5.1, es posible flotar a pH básico, volviendo el proceso de flotación selectivo de otros aluminosilicatos, tomando en cuenta que el ZPC del cuarzo en valores de pH de 2.5 – 3, se encuentra más alejado del valor que se reporta de feldespato. Siendo esto posible se

puede utilizar estos iones contaminantes como activadores para la flotación de feldespato potásico con la utilización de colectores catiónicos a pH alcalinos.

Figura 1-15: Presencia de iones contaminantes en la superficie de feldespato potásico



Fuente: Elaboración propia

1.5 Doble capa eléctrica

1.5.1 Principios fundamentales

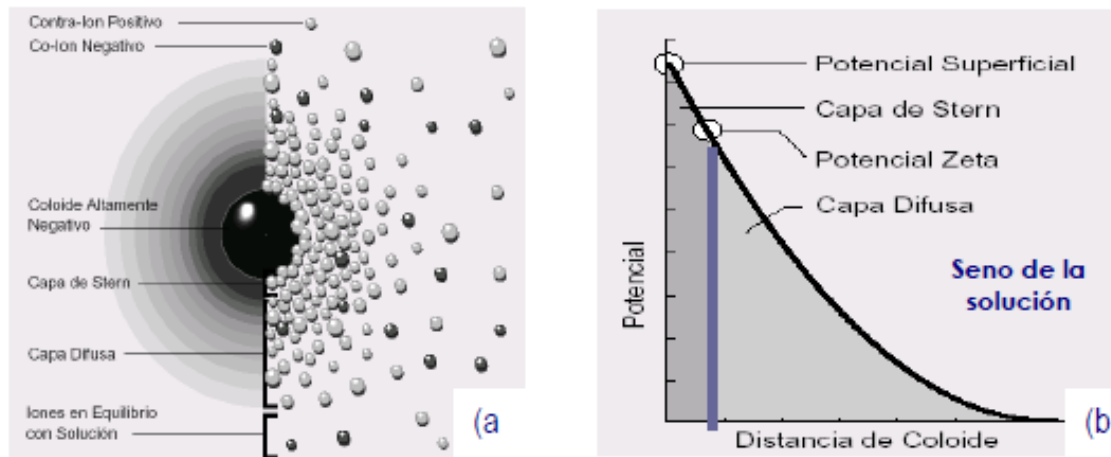
La doble capa eléctrica es un sistema en el que existe una separación de carga eléctrica en una interface, una capa con carga positiva y una capa con carga negativa. Existen diferentes procesos a través de los cuales es posible el desarrollo cargas eléctricas en la superficie mineral dentro de un líquido, como:

- Adsorción específica de iones de superficie activa (surfactantes iónicos)
- Polarización de la interface mediante la aplicación de una diferencia de potencial con una fuente externa.
- La sustitución isomórfica en la red cristalina del sólido, como el caso de los silicatos al reemplazarse SiO⁴⁺ por Al³⁺.

- La adsorción de polímeros cargados o polielectrolitos
- Transporte a través de la interface de iones que parte de la red cristalina.

Por ello el desarrollo de la carga superficial hace que el sólido adquiera un potencial con respecto a la solución, y es compensada por una distribución de carga igual en la fase acuosa, formando la doble capa eléctrica como se muestra en la figura 1.16 (Bustamante Rúa, Gaviria Cartagena, & Restrepo Baena, 2008)

Figura 1-16: a) Modelo de la doble capa eléctrica y b) Variación del potencial a través de la doble capa (interface sólido – agua)



Fuente: Notas de la asignatura “Concentración de Minerales” Bustamante Rúa et al., 2008

Según el modelo de la doble capa eléctrica, se pueden asumir la existencia de dos capas en la vecindad de la interfase sólido/solución; una capa en la cual se presenta un decaimiento lineal del potencial eléctrico y que permanece fija aun cuando las partículas se muevan, y una capa difusa con decaimiento exponencial. Esto implica la existencia de un plano de referencia entre la capa fija y la capa difusa y justo el potencial se denomina Potencial Z, o potencial electrodinámico (Mantilla, Pedraza, & Laverde, 2008)

1.6 Energía libre Superficial

Todo material posee cierta energía en estado de equilibrio debido a las fuerzas de atracción y repulsión que lo rodean, pero al someterse a una disminución de tamaño de partícula, el material sufre fracturas, se rompen los enlaces creando nuevas superficies que se encuentran en un desequilibrio de fuerzas. Como las interacciones interfaciales entre la superficie y el medio es de gran importancia en procesos de flotación, la energía libre superficial y los cambios que sufre ésta se vuelve necesaria conocerla para estabilidad de suspensiones, humectabilidad, principalmente.

Para ello se puede evaluar a través de diferentes métodos en sólidos en los que se emplea la medición del ángulo de contacto Θ que se forma al hacer caer una gota de líquido sobre la superficie mineral. Como se menciona anteriormente, la energía libre superficial obtener las tensiones interfaciales que se forman entre las fases sólido – líquido y aire no es completamente posible experimentalmente. Por ello se hacen ciertas suposiciones para poder determinarlas, a través de teorías que contemplan ciertos parámetros de las propiedades del sustrato medido y del líquido de medición

Entre las teorías que destacan para la medición e interpretación de la energía libre superficial se menciona la teoría de Owens, Went /Fowkes.

1.6.1 Teoría de Owens, Went / Fowkes

La energía libre superficial total de sólidos o líquidos puede dividirse en dos componentes (ver ecuación (1.8)). La energía libre superficial de un sólido y la tensión superficial de un líquido según Fowkes en 1964 representan la suma de sus componentes independientes que las llama dispersivas y no dispersivas (Valderrama & Miranda, 2005)

$$\gamma = \gamma^d + \gamma^n \quad (1.8)$$

En la ecuación 1.9, Fowkes determina la energía superficial de un sólido mediante la suma de las componentes debido a interacciones polares y a interacciones apolares, respectivamente.

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sv}^p + \gamma_{sv}^d \quad (1.9)$$

Para la tensión superficial sólido – líquido se puede escribir:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - 2 (\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)^{1/2} \quad (1.10)$$

Owens y Went continúan con la idea de Fowkes e involucran una media geométrica para calcular la energía:

$$\gamma_{sl} = \gamma_{sv} + \gamma_{lv} - 2 [(\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p)^{1/2} + (\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)^{1/2}] \quad (1.11)$$

Y si se combina las ecuaciones (1.10) y (1.11), se define la ecuación de Owens y Went de la siguiente manera:

$$\gamma_{lv}(1 + \cos\theta) = 2 [(\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p)^{1/2} + (\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)^{1/2}] \quad (1.12)$$

La ecuación (1.12) es una de las más comunes para medir la energía libre superficial.

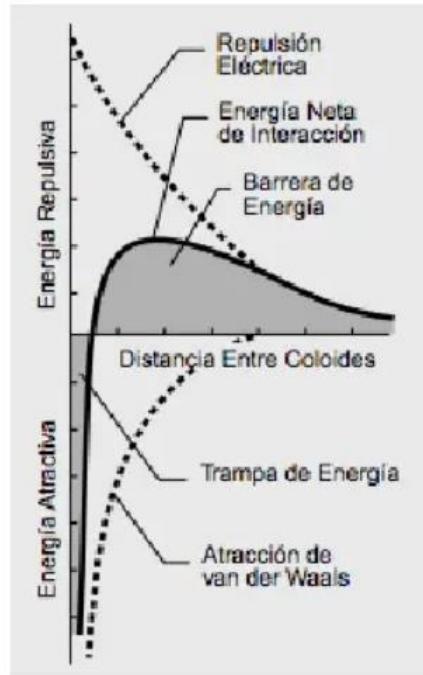
1.7 Teoría DLVO

1.7.1 Teoría de la doble capa eléctrica DLVO

Como parte de un análisis de las propiedades superficiales de un mineral es importante destacar el estudio de las fuerzas superficiales DLVO, cuya teoría describe la interacción de las fuerzas que existen entre cargadas a través de un medio líquido. Esto es, durante el drenaje de una película o capa formada, se producen varios fenómenos complementarios en las superficies de las películas que afectan a la interacción entre estas. La adsorción de agentes tensoactivos y la distribución de las cargas superficiales entre las superficies de las películas se ven afectados por el proceso de adelgazamiento de la película. Por ello, las fuerzas electrostáticas y de Van der Waals entre las moléculas no se distribuyen homogéneamente entre las superficies de las películas y la densidad de carga superficial total varía con el espesor de la película. Los científicos de Detliff insisten en que la teoría sobre películas líquidas finas presenta deficiencias importantes en su estado actual, por lo que se han planteado elaborar un conjunto conciso de ecuaciones que tengan en cuenta los efectos dinámicos de las fuerzas de Derjaguin, Landau, Verwey y Overbeek (DLVO) en películas líquidas delgadas. Según el equipo de investigadores, estos conjuntos de ecuaciones se resolverán numéricamente y la teoría se validará mediante experimentos que analicen las propiedades cinéticas del adelgazamiento de las películas de espuma.

La teoría DLVO es la base para comprender la estabilidad de los coloides y está respaldada por pruebas experimentales bien fundamentadas. Se analiza la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar las atracciones de van der Waals y la curva de repulsión electrostática: la curva combinada es llamada la energía neta de interacción. A cada distancia el pequeño valor se resta del mayor valor para llegar a la energía neta. El valor neto se representa, entonces, arriba es repulsivo o abajo si es atractivo, de esta manera se va formando la curva.

Figura 1-17: Curva de energía que se forma al sustraer la curva de atracción de la curva de repulsión



Fuente. Introducción Teoría DLVO

La curva de interacción neta cambia siempre de atracción a repulsión y nuevamente a atracción. Si existe una zona repulsiva, entonces el punto de máxima energía de repulsión se llama “barra de energía”.

Toda esta interacción de fuerzas combinadas genera un escenario físico-químico determinado que depende de las partículas minerales analizadas. Cada uno tiende a tener un comportamiento diferente en un estado coloidal, por lo que estas propiedades diferenciales denotan de gran importancia al tratar de separar o aglomerar un mineral de interés. También es conveniente mencionar que la aplicación de estas teorías con diferentes materiales amplía el conocimiento de búsqueda para nuevos tratamientos y optimización de procesos convencionales que generalmente, descartar tamaños de material muy fino por retardar o impedir el proceso de separación mineral.

2. Materiales y métodos

Para el desarrollo del trabajo experimental de acuerdo a los objetivos planteados, se estudia una muestra de relave minero mediante caracterización fisicoquímica, analizando sus propiedades.

2.1 Muestra Mineral

Para el estudio se utiliza una muestra proveniente del municipio de Jericó, Antioquia, Colombia, que corresponde a un relave minero – cuprífero, que fue sometida a un análisis de caracterización general que determina las particularidades físicas y químicas minerales que posee.

Para las mediciones de ángulo de contacto y tensión superficial se utilizaron muestras provenientes de la Mina El Vergel, ubicada en el departamento del Tolima, Ibagué; que contienen partículas de feldespato visibles. De forma manual fueron separadas selectivamente y posterior a ello se elaboraron briquetas con las partículas de feldespato con alta pureza, generando una superficie adecuada para las mediciones correspondientes.

Las muestras seleccionadas fueron partículas de feldespato con pureza de 95.54%, con las cuales se elaboraron dos briquetas, cada una con partículas de feldespato suficientes, con exposición de superficies planas pulidas tal como se muestra en la figura 2-1.

Figura 2 2. Muestra mineral N°1 para medición de ángulo de contacto. a) Superficie expuesta de feldespato (vista superior briqueta) y b) Briqueta con partículas (vista frontal).



Se tomaron partículas libres para comparar las mediciones de los ángulos de contacto obtenidos sobre las briquetas, mostrando valores muy aproximados, lo que justifica la utilización de las briquetas como superficie final de medición, como se muestra en la figura 2-3. Estas partículas conjuntamente con las briquetas se utilizaron de igual forma para determinar la energía libre superficial del feldespato.

Figura 2-2: Muestra mineral N°2 para medición de energía libre superficial. a) Superficie expuesta de feldespato (vista superior briqueta) y b) Briqueta con partículas (vista frontal).

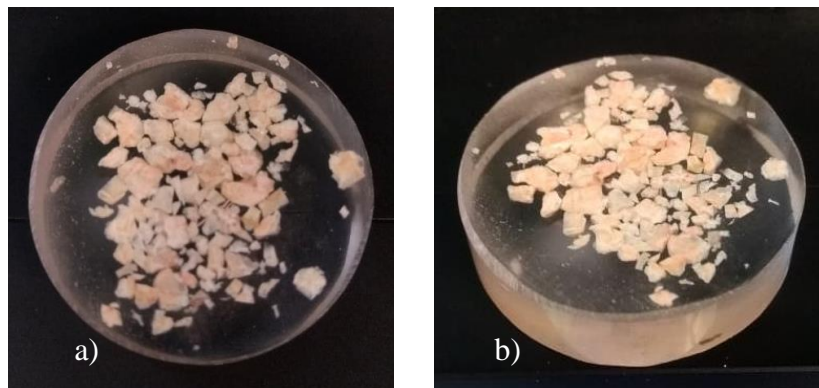
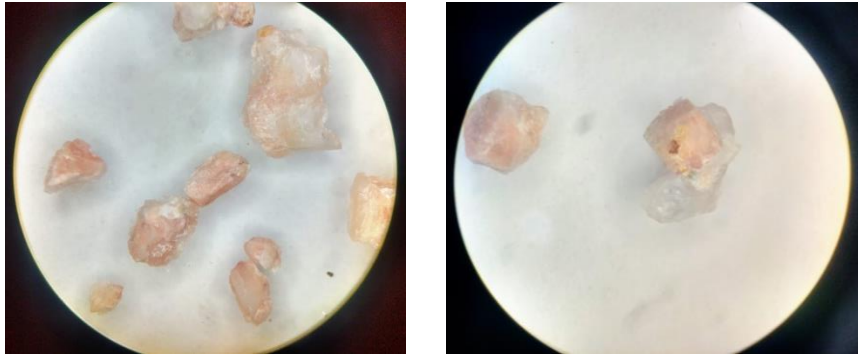


Figura 2-3: Muestra de mineral para medición de ángulo de contacto con superficie plana natural.



En el análisis de potencial zeta de feldespato del relave minero se utilizó tamaños finos de feldespato, con un tamaño de partícula de $+35 \mu\text{m}$ (500 mallas ASTM).

Para las pruebas de microflotación espumante en celda Partridge - Smith se seleccionaron 50 partículas de feldespato con un tamaño de $+850 \mu\text{m}$ (20 mallas ASTM). En el caso de las flotaciones en celda convencional Denver el tamaño corresponde a $+75 \mu\text{m}$ (200 mallas ASTM).

Figura 2-4: Muestra mineral para flotación espumante. Tamaño de la muestra $+850 \mu\text{m}$ (20 mallas ASTM).



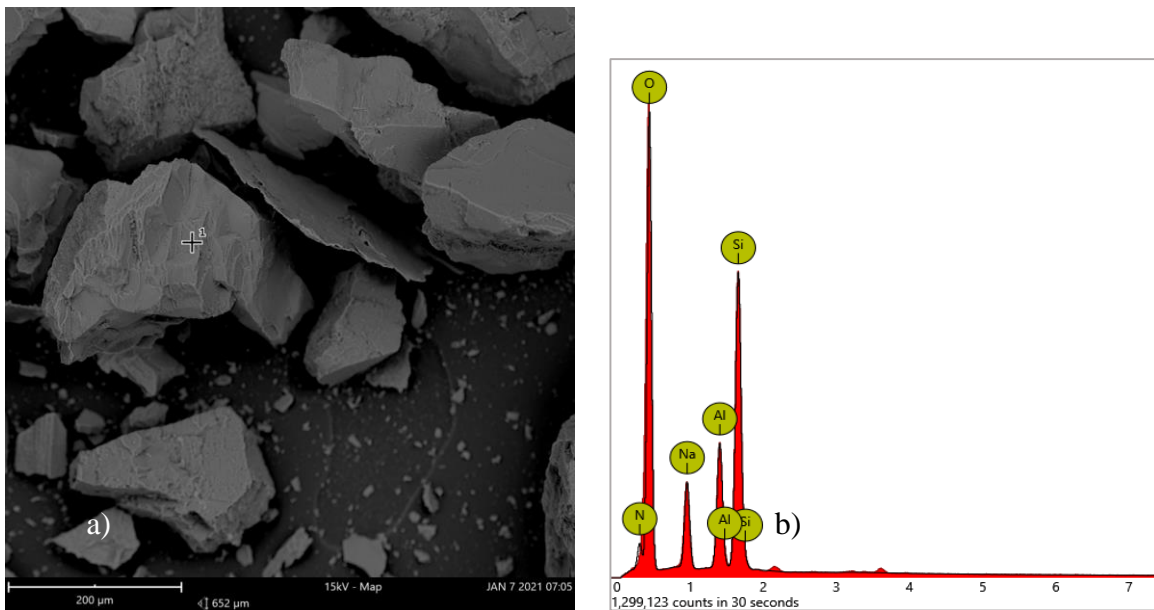
2.2 Caracterización Geometalúrgica

2.2.1 Caracterización Mineral

Las muestras provenientes de minería cuprífera, fueron tomadas de la zona de disposición final de relaves de la empresa minera Quebradona, con un empaquetamiento y transporte adecuado, con muestras representativas, cada una con un peso aproximado de 20 kg, sometidas previamente a secado, homogenización y cuarteo.

Se realizó un compósito del relave para las pruebas físicas de humedad y densidad. Posteriormente análisis de Fluorescencia de rayos X (FRX), Difracción de rayos X (DRX), Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), EDS, Petrografía y un Análisis Granulométrico general. Para la muestra proveniente de la Mina el Vergel, se siguió el mismo procedimiento de muestreo, preparación y caracterización utilizado para las muestras de relave.

Figura 2-5: a) Microfotografía de textura general de partículas de feldespato y b) Espectro de emisión de rayos x del microanálisis. (SEM)

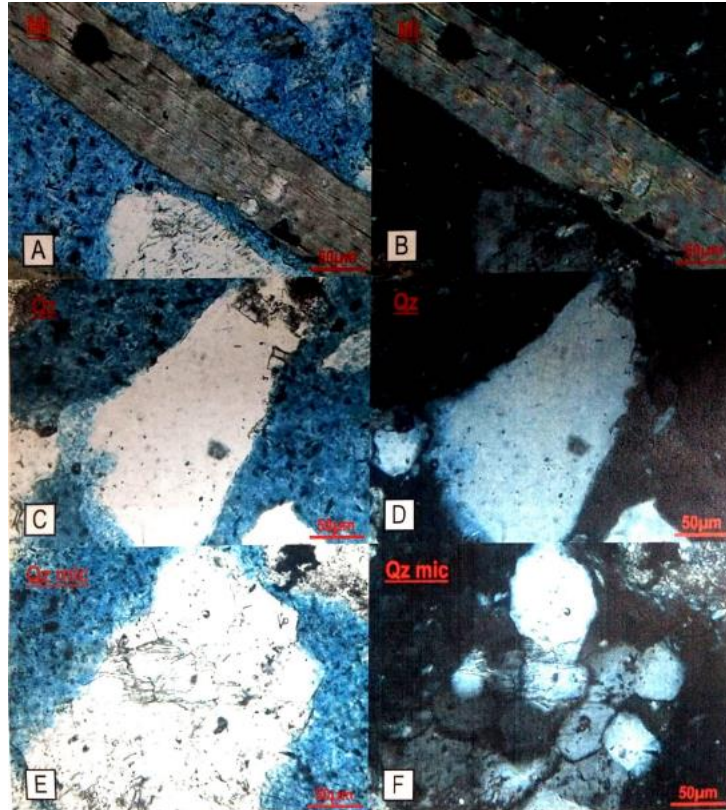


Con base en la caracterización realizada se determinan parámetros para mediciones posteriores de ángulo de contacto, tensión superficial y potencial zeta. Las pruebas físicas de densidad, humedad, análisis granulométrico y FRX se realizaron en el Instituto de Minerales CIMEX. Las lecturas de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM) se realizaron en el laboratorio de la empresa CECOLTEC SAS y los análisis de Petrografía óptica de Luz Polarizada (MOLPP) y DRX en el laboratorio de Materiales de la Facultad de Minas. Los equipos utilizados para cada prueba se mencionan en la tabla 2-1.

Tabla 2-1: Equipos utilizados en la Caracterización Mineral

Prueba / Análisis	Equipo
FRX	Scanning Electronic Microscope (Phenom World)
DRX	Difractómetro de rayos X (PANalytical modelo EMPYREAN)
SEM	Microscopio electrónico de barrido Phenom World)
Análisis Granulométrico	ASTM (+70/-200)
MOPP	Microscopio Petrográfico
Flotación Espumante	Celda Denver
Microflotaciones	Celda Partridge Smith
Ángulo de Contacto	OCA14 (SCA 20)
Potencial Zeta	Zetasizer nano ZS90 (Malvern Panalytical)

Figura 2-6: Microfotografía (MOPP) de la muestra de relave minero



Nota. Figura 2-6. (A y B) Mi (mica) visto con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente. (C y D) cuarzo (Qz) vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados respectivamente. (E y F) cuarzo microcristalino (Qz mic), vista con nicoles paralelos y nicoles cruzados, respectivamente.

2.3 Reactivos Químicos

Como se menciona en el libro de (Manser, 1975) y otros autores, la flotación espumante de silicatos ha utilizado reactivos colectores aminas, que dependen de las propiedades estructurales de los diferentes tipos de minerales a tratar. En la flotación espumante de feldespato tradicional se ha utilizado como reactivos colectores aminas catiónicas

utilizadas para la recuperación del mineral que trabaja en combinación con ácido fluorhídrico (Cytec, 2002).

Para la elección de los reactivos colectores se realizaron ensayos de flotación convencional en Celda Denver previamente, en los que se seleccionan los reactivos mencionados en la tabla 2-2 para analizar posteriormente la interacción de cada uno con la especie mineral seleccionada. Las variables del proceso son tres reactivos colectores aminas, utilizando como espumante MIBC, iones contaminantes (Al^{+3} , Fe^{+3} y Mn^{+2}) sobre la superficie mineral que actuarían como activadores y como reguladores de pH ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio (NaOH).

Tabla 2-2: Reactivos colectores utilizados previamente en flotación convencional en Celda Denver.

Reactivo	
Modificador pH	H_2SO_4
Depresante	HF
Colector 1	Dodecylamina
Colector 2	Aero 3000C
Espumante1	Aero 65 (MIBC)

Siendo así se analiza el comportamiento fisicoquímico de los colectores utilizados previamente con la adición de un tercer colector amina y como espumante MIBC.

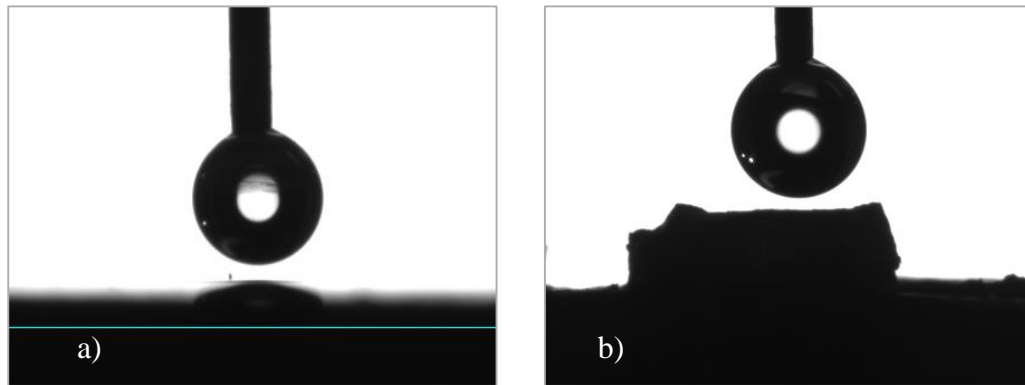
2.4 Ángulo de Contacto

Las mediciones de ángulo de contacto fueron realizadas mediante un goniómetro OCA14 con el software SCA 20 con precisión $\pm 1^\circ$ en el laboratorio del Instituto de Minerales CIMEX. Las muestras seleccionadas manualmente fueron partículas de feldespato de la Mina El Vergel, con pureza de 95.54%, montadas en briquetas, manteniendo expuesta una superficie mineral cada una pulida con una solución de diamante.

En cada briqueta se selecciona una partícula de feldespato y se recubre con cada uno de los reactivos colectores seleccionados. Con un tiempo estimado de acondicionamiento de 10 minutos con cada reactivo, se deposita sobre la superficie hidrofobizada una gota de agua destilada con una jeringa Hamilton de 500 μL . Se analiza la interacción de pH en los rangos de 5 a 10 sobre la superficie mineral y de los reactivos, respectivamente.

Bajo los mismos escenarios y criterios de medición utilizados para las briquetas de mineral, partículas del feldespato libres con superficie plana natural fueron separadas para realizar las mismas mediciones de ángulo de contacto. En la figura 2-5, se observan la superficie expuesta para la medición correspondiente.

Figura 2-5: Gota de agua destilada sobre superficie mineral. a) Superficie briqueta y b) Superficie plana natural.



Los valores de ángulo de contacto se obtienen como valores promedios de cada medición y de sus réplicas, considerando un error mínimo.

2.4.1 Método gota sénil (sessile drop)

Para obtener un valor del ángulo de contacto sobre la superficie del feldespato se utiliza el método de la gota colocada (sessile drop) en el que se deposita una gota de un líquido determinado sobre el centro de la superficie de la muestra.

Como el objetivo es analizar el efecto de las interacciones superficiales de ciertos reactivos sobre feldespato, se humecta la superficie inicialmente con un líquido 1, (agua destilada), y se mide el ángulo de contacto con este líquido. Posteriormente, se cubre la superficie con un líquido 2, (solución de reactivo), y se vuelve a depositar una gota del primer líquido utilizado.

El valor de ángulo de contacto obtenido indica si se logra intervenir con un cambio de propiedad hidrófila a hidrófoba de la superficie mineral con intervalos de pH básico 5, 6, 8 y 10.

2.5 Potencial Zeta

El potencial zeta se determina a través de Movilidad Electroforética que utiliza como fundamento teórico la ecuación Henry; la medida se obtiene con un experimento de electroforesis en la muestra y midiendo la velocidad de las partículas usando Velocimetría de Láser Doppler (LDV), utilizando como equipo Zetasizer Nano Series marca Malvern Instruments (Malvern Instruments, 2009)

Existe un rango de tamaño de partícula de acuerdo a la medición que se va a realizar, en este caso para medir el potencial de carga mineral se utiliza tamaños mayores a 1 μm y se recomienda trabajar a ciertas concentraciones. En la tabla 2-2., se aprecia los parámetros de trabajo para mediciones específicas.

Tabla 2-3: Parámetros para medición de Potencial Zeta

Tamaño de partícula	Min. Concentración (Recomendada)	Max. Concentración (Recomendada)
< 10 nm	0.5 mg/ml	Limitado por la interacción del material de muestra, agregación, gelificación, etc.
10 nm a 100 nm	0.1 mg/ml	5% masa (asumiendo una densidad de 1g/cm ³)
100nm a 1 µm	0.01 mg/ml (10 ⁻³ % masa)	1% masa (asumiendo una densidad de 1g/cm ³)
> 1 µm	0.1 mg/ml (10 ⁻² % masa)	1% masa (asumiendo una densidad de 1g/cm ³)

Fuente. Manual Zetasizer nano series – Instituto de Minerales CIMEX

Potencial zeta de Feldespato

Para realizar las mediciones se selecciona una fracción mineral de tamaño 35 µm (+500 mallas) de alta pureza. De acuerdo a la tabla 2-3., se prepara una solución de mineral con una concentración del 1% de sólidos y se acondiciona durante 5 minutos para obtener la suspensión deseada.

Se utilizó 0.02 gramos de feldespato al 95.54 % de pureza disueltos en 200 ml de agua destilada. Para trabajar con valores de pH ácidos se utiliza H₂SO₄ al 10% y para alcanzar la alcalinidad de la solución se utiliza NaOH al 1%.

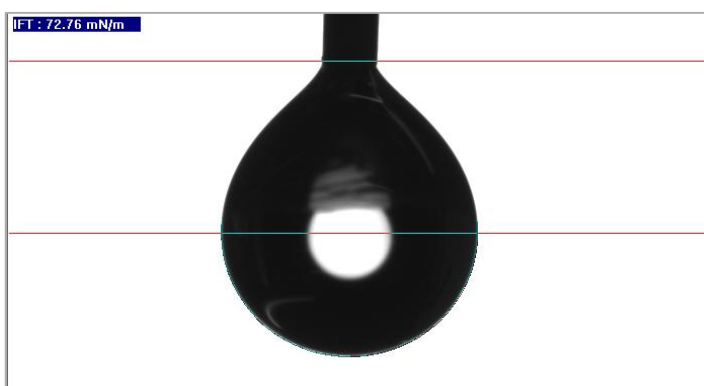
2.5.1 Potencial Zeta con Iones Contaminantes

La presencia de iones contaminantes puede revertir la carga superficial de un mineral específicamente con valores contrarios o volverla potencialmente más cargada. Para realizar estas pruebas se utilizan iones de Al³⁺, Fe³⁺, Mg²⁺ y Cu, cada uno con 10 ppm disueltos en la solución mineral de feldespato previamente preparada a una concentración del 1%. Se analiza la carga superficial del mineral con cada uno de los contaminantes y se obtiene una curva de potencial para cada uno de los iones utilizados.

2.6 Tensión Superficial y Energía libre superficial

Para la medición de la tensión superficial de cada uno de los reactivos utilizados, incluyendo agua destilada, se utiliza un goniómetro OCA14, con el software SCA 20 con precisión $\pm 1^\circ$ en el laboratorio del Instituto de Minerales CIMEX. Cada uno de estos valores obtenidos fueron sometidos a comparación con datos teóricos tomados de Jasper, 1972.

Figura 2-6: Medición de la tensión superficial de líquidos



Cada una de las mediciones se triplicaron para garantizar la medición manteniendo constante la temperatura.

Para determinar la energía libre superficial de un sólido se analizan las contribuciones de las fuerzas de interacción entre las partículas de FD-K empleando la medida del ángulo de contacto (Θ) que se forma sobre la superficie mineral a través del método de la gota colocada (sessile drop) siguiendo el mismo procedimiento antes descrito con 4 líquidos diferentes sobre la briqueta, utilizando el goniómetro OCA15 PLUS del laboratorio del Instituto de Minerales CIMEX. Los líquidos utilizados para las mediciones se muestran en la tabla 2-4.

Tabla 2-4. Líquidos utilizados para medir energía libre superficial.

Líquidos	Tensión Superficial (mN/m)
----------	----------------------------

Agua destilada	77.5
n-Hexano	33.73
n-Heptano	19.66
Etilenglicol	37.89

Así utilizando la ecuación 1.12, se calcula la energía libre superficial del feldespato con la utilización del software.

$$\gamma_{lv}(1 + \cos\theta) = 2 [(\gamma_{sv}^p \gamma_{lv}^p)^{1/2} + (\gamma_{sv}^d + \gamma_{lv}^d)^{1/2}] \quad 1.12$$

2.7 Flotación Espumante Convencional Celda Denver

El proceso de flotación espumante convencional para la obtención de feldespato generalmente se realiza por algunos métodos que utilizan ciertos reactivos bajo condiciones muy sensibles a pH de la suspensión. Tradicionalmente, se realiza un proceso de flotación espumante que utiliza HF con valores de pH ácidos, conjuntamente con la adición de colectores aminas para la separación de cuarzo y la recuperación de feldespato.

Se realizaron varias pruebas de flotación convencional en celda Denver de 1 litro con material de relave utilizando colectores aminas y HF en medio ácido. En la tabla 2-5, se muestran las pruebas de flotación previas al análisis fisicoquímico.

Figura 2-7: Flotación Convencional en Celda Denver



Tabla 2-5: Pruebas de flotación en Celda Denver

# Flotación	Colector	Peso mineral (g)
Con separación magnética		
1	Dodecilamina	364,76
2	Aero 3000C	364,76
3	Aero 3100C	364.76
Sin separación magnética		
1	Dodecilamina	364,76
2	Aero 3000C	364,76
3	Aero 3100C	364.76

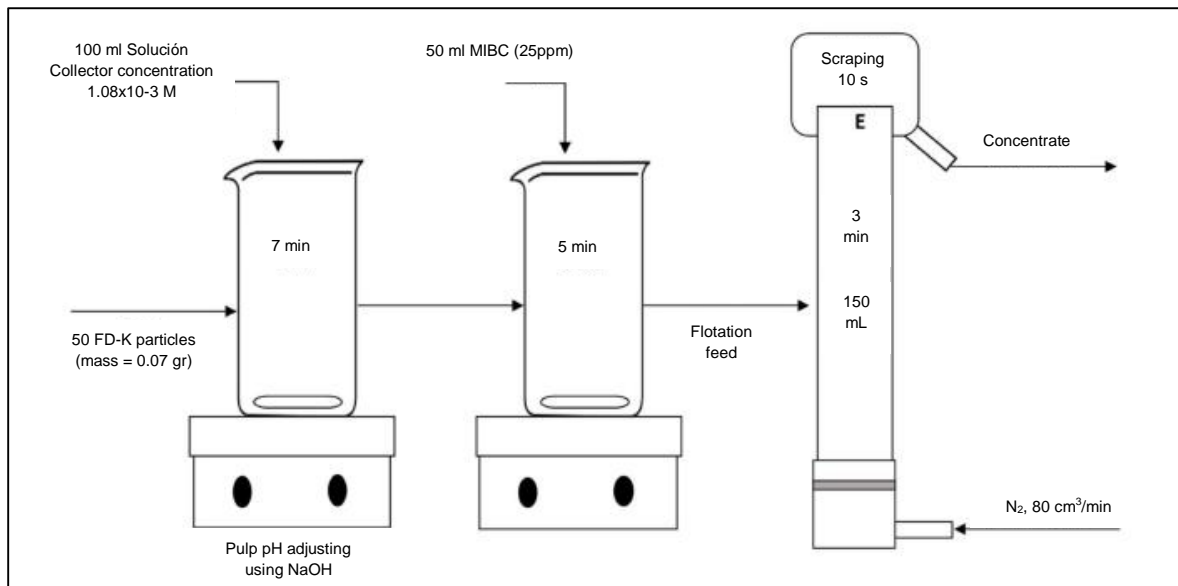
2.8 Flotación Espumante Celda Partridge – Smith

La figura 2-8 muestra el esquema del procedimiento realizado en los ensayos de microflotación. La flotación de feldespatos se evalúa a través de microflotaciones en una

celda Partridge – Smith de 150 ml y usando nitrógeno con un caudal constante de 80 cm^3/min (ml/min) (Estrada, Echeverry, & Ramirez, 2020).

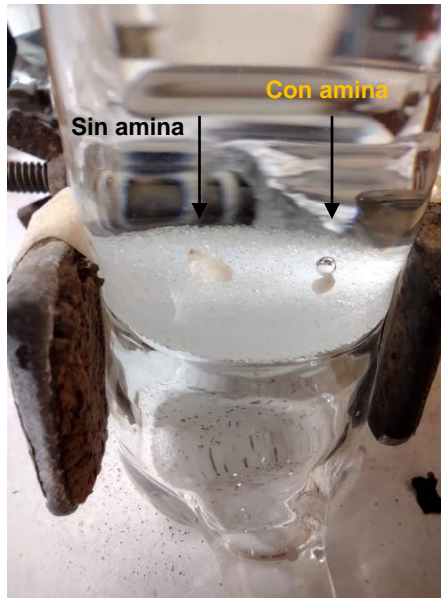
Se utilizaron partículas de feldespato potásico separadas manualmente (50 partículas de +850 μm (20 mallas ASTM), las que se acondicionaron con los reactivos fuera de la celda durante 7 minutos en 100 ml de solución con variación de valores de pH. A continuación, se adiciona 25 ppm de MIBC en 50 ml de solución para completar el volumen de la celda, y por último se acondiciona por 5 minutos. Al finalizar, se realiza el proceso de flotación durante 3 minutos, retirando la espuma cada 10 segundos y para controlar el nivel de la pulpa y que se mantenga estable se adiciona una solución con las mismas características de la solución original (composición y pH). Finalmente se contabiliza las partículas del concentrado y colas, se calcula la flotabilidad del feldespato y la recuperación de partículas hidrofobizadas. Cada ensayo se realiza por triplicado para obtener el % de error.

Figura 2-8: Esquema del procedimiento de microflotación en celda Partridge - Smith



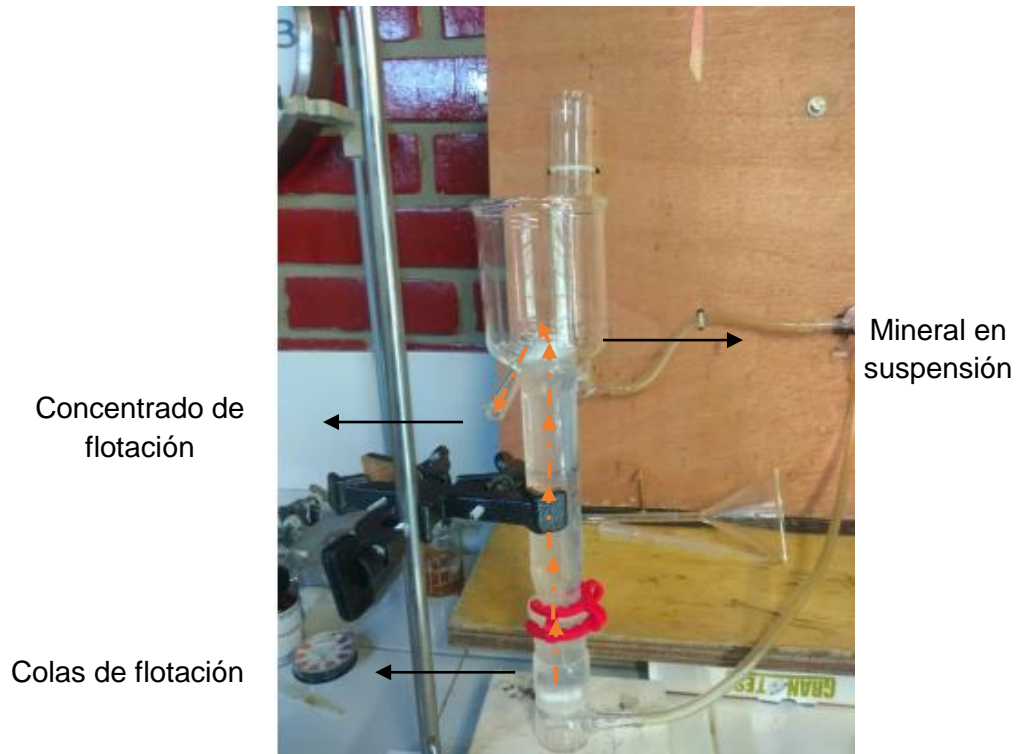
En la figura 2-9, se puede identificar claramente cómo se logra hidrofobizar una partícula de feldespato y en momento en el que entra en contacto con una burbuja, comparada con una partícula sin la acción de colector.

Figura 2-9: Partícula de feldespato hidrofobizada en contacto con una burbuja de Nitrógeno antes de ascender.



En la figura 2-10, se aprecia el montaje de la celda Partridge Smith con entrada de nitrógeno para las microflotaciones de ortoclasa.

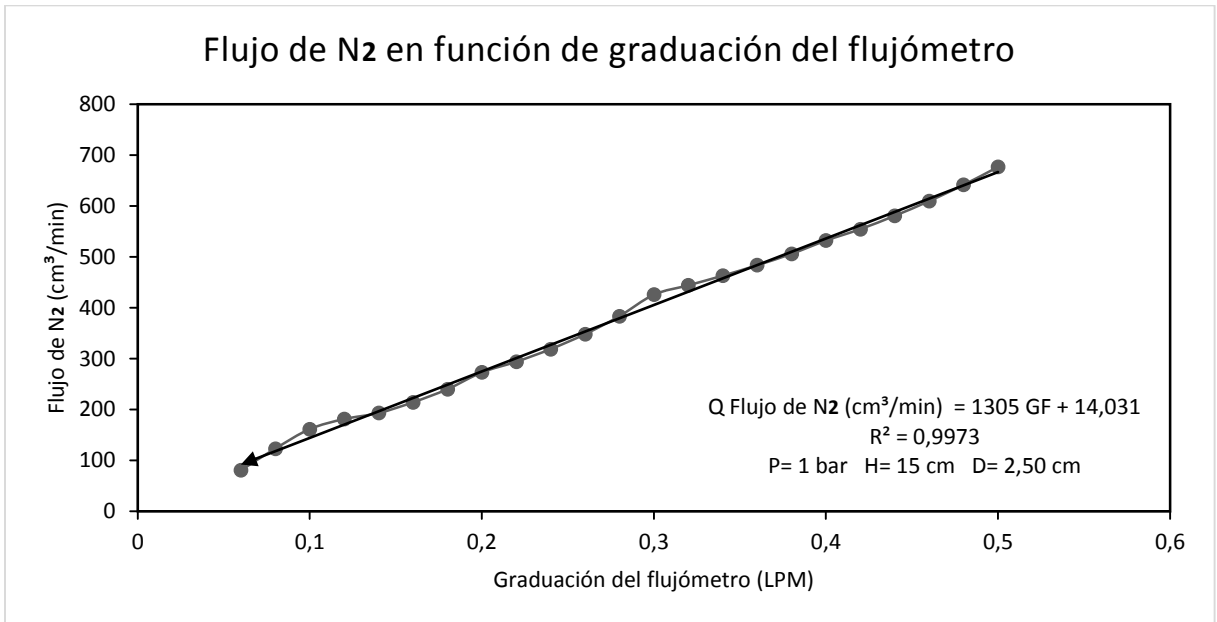
Figura 2-10: Proceso de flotación en celda Partridge - Smith



Para mantener un flujo constante de entrada de nitrógeno se grafica una curva de flujo en función de la graduación del flujómetro para determinar el N_2 cm^3/min

Calibración del flujo de entrada de N_2 a la celda en función de la graduación de un flujómetro (LPM).

Figura 2-11: Curva de calibración de flujo de N₂ vs Graduación del flujómetro (LPM)



3.Resultados y Discusión

A continuación, se detallan el resultado de los análisis y ensayos a las muestras minerales con el objetivo de analizar sus propiedades fisicoquímicas.

3.1. Caracterización físico – química de relaves minero cupríferos

Para la caracterización fisicoquímica se utilizaron muestras obtenidas de los relaves minería cuprífera, de la cuales se obtuvieron los respectivos resultados de cada una de las pruebas especificadas en la metodología de caracterización que se menciona en el capítulo anterior.

3.1.1 Humedad y Densidad

En la tabla 3-1, los resultados obtenidos de las pruebas de humedad y densidad del compósito de relave muestran un promedio de colas de relaves con una humedad del 15.6% y 2.45g/cm³.

Tabla 3-1. Resultados de las pruebas de humedad y densidad de compósito de relave cuprífero

Departamento	Muestra Analizada	Humedad (%)	Densidad (gr/cm ³)
Antioquia	Compósito de relave	15.6	2.45

3.1.2 Análisis de (FRX), (DRX), (SEM) y (MOPP)

Los resultados obtenidos por medio de fluorescencia de rayos x, definen en forma de compuestos y de elementos que se describen en la tabla 3-2., en la que la muestra analizada presenta un contenido de SiO₂ del 66.13% seguido por Al₂O₃ con 15.592%.

Los resultados presentados muestran el punto de partida para la implementación de un sistema de recuperación de minerales secundarios que tienen un potencial representativo en la industria del vidrio y cerámica, además como iniciativa de recirculación, cuidado del ambiente y reaprovechamiento de relaves en la industria minera.

Tabla 3-2. Análisis FRX para muestra de relave.

Nombre	Relave												Densidad (gr/cm ³)	2,45
Elemento	Mg	Al	Si	P	S	Cl	K	Ca	Ti	Cr	Mn	Fe	Cu	
Concentración (%)	2,26	13,085	56,176	0,27	0,326	0,179	9,436	5,356	1,045	0,055	0,094	11,547	0,17	
Óxidos	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Fe ₂ O ₃	CuO	
Concentración (%)	2,552	15,592	66,132	0,283	0,368	0,08	4,981	3,082	0,689	0,031	0,046	6,088	0,073	

En la tabla 3-3, se describe la cuantificación de los componentes por altura (intensidad) de cada mineral presente como se identifica en el difractograma de la figura 3-1.

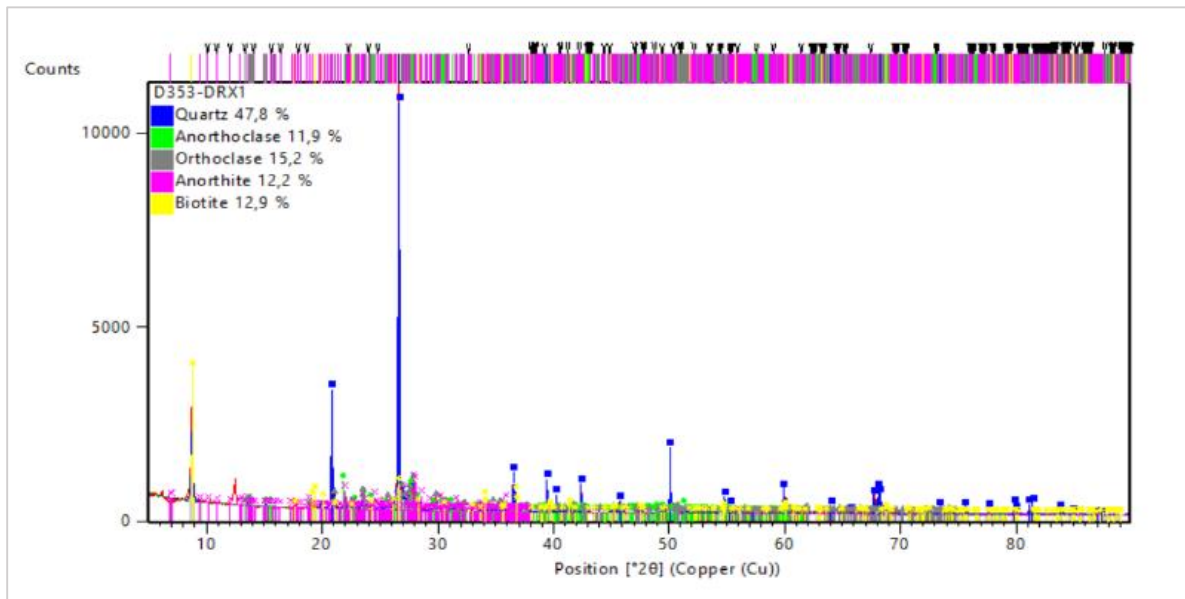
Tabla 3-3: Mineralogía global de la muestra de cabeza del relave minero.

Nombre	Muestra Cabeza				
Mineralogía	Cuarzo	Anortoclasa	Ortoclasa	Anortita	Biotita
% Peso	47.8	11.9	15.2	12.2	12.9

Constituyentes		Porcentaje %
Filosilicatos	Moscovita	10.4

	Caolinita	1.8
	Montmorillonita	0.7
	Clorita	3.1
No filosilicatos	Cuarzo	43.2
	Ortoclasa	21.6
	anortita	19.2
Total		100

Figura 3-1: Difractograma obtenido en el análisis de la muestra de relave por DRX



De acuerdo con los resultados obtenidos, se observa que los minerales el relave contiene el 84% de tipo no filosilicato, y superan los minerales arcillosos o filosilicatos presentes con 16%. La composición del material de relave, presenta un alto contenido de Cuarzo, con un 47.8% de la muestra, seguido por la presencia de Ortoclasa (15.2%)

Para la caracterización de la muestra por microscopía de barrido electrónico (SEM) se realizan microfotografías a diferentes partículas de mineral en diferentes puntos de la muestra para identificar su composición.

Figura 3-2: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (Feldespato) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.

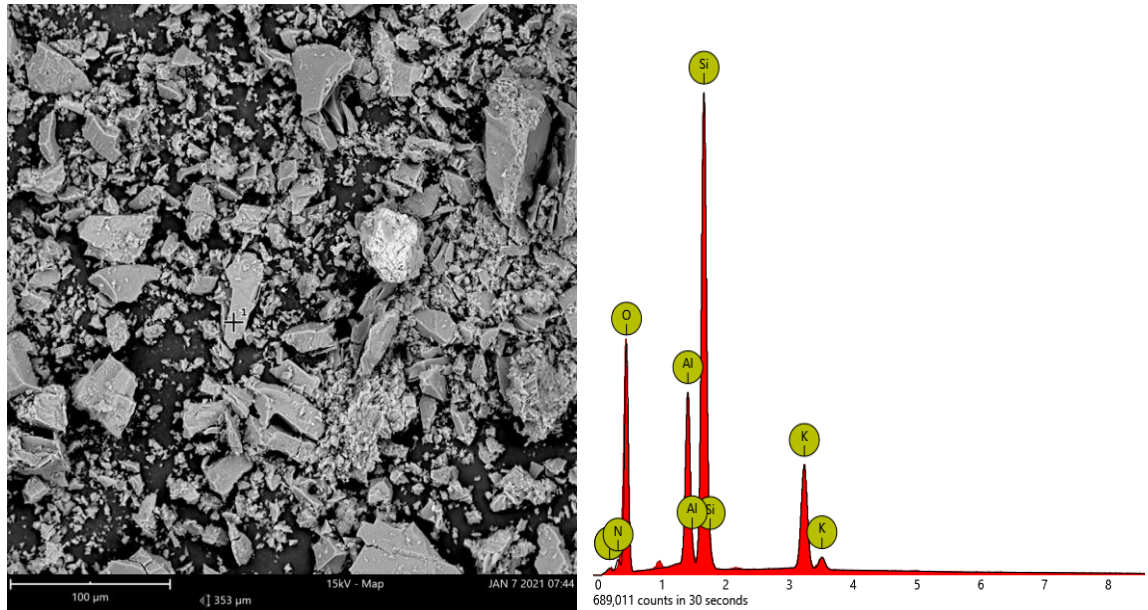


Tabla 3-4: Composición química de partículas de feldespato.

Número de Elemento	Símbolo del Elemento	Nombre del Elemento	Concentración Atómica	Concentración en peso
8	O	Oxígeno	63.35	48.36
14	Si	Silicio	20.89	27.99
13	Al	Aluminio	9.95	12.81
19	K	Potasio	5.81	10.83

Figura 3-3: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (punto 2) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.

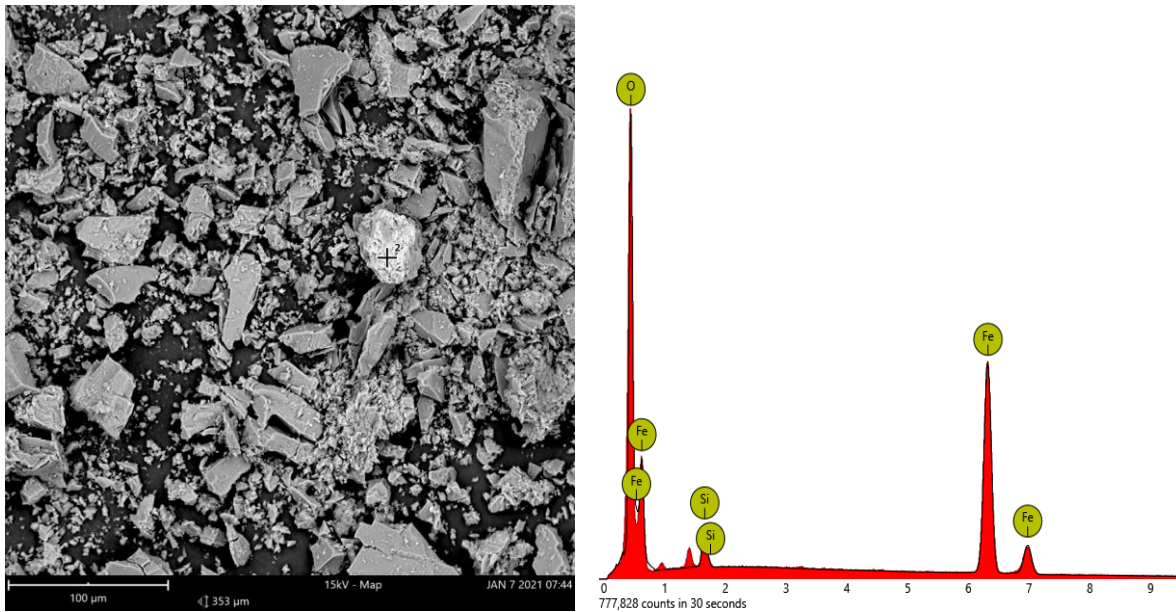


Tabla 3-5: Composición química de partículas una partícula mineral.

Número de Elemento	Símbolo del Elemento	Nombre del Elemento	Concentración Atómica	Concentración en peso
8	O	Oxígeno	71.75	43.08
26	Fe	Hierro	26.07	54.64
14	Si	Silicio	2.17	2.29

Figura 3-4: Microfotografía de la textura general de las partículas de la muestra de relave (feldespato) y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.

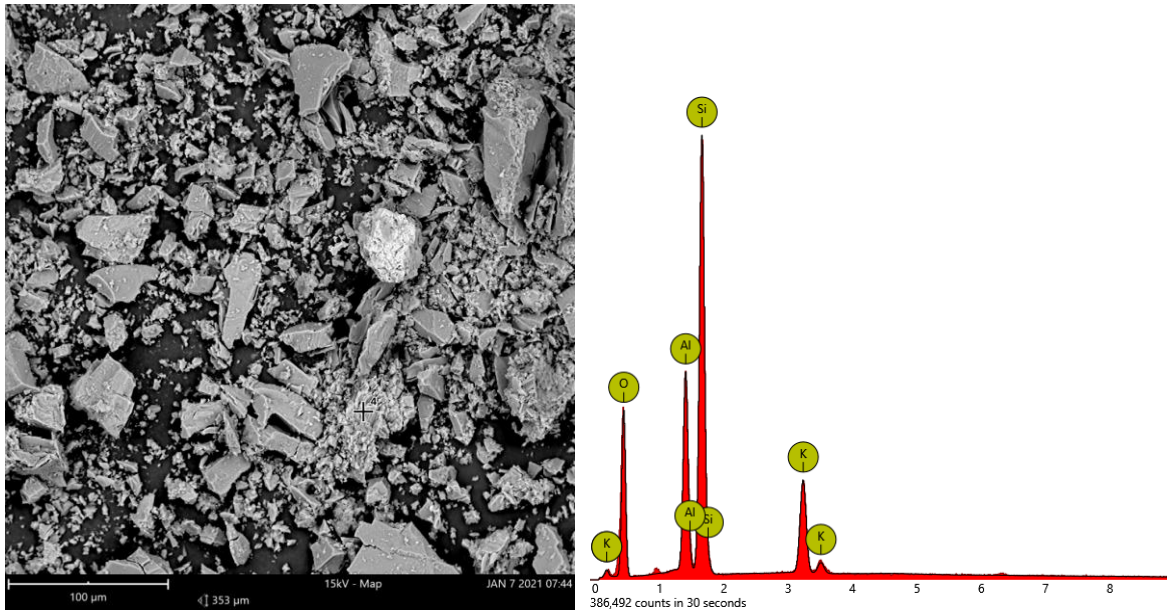


Tabla 3-6: Composición química de partículas una partícula de feldespato.

Número de Elemento	Símbolo del Elemento	Nombre del Elemento	Concentración Atómica	Concentración en peso
8	O	Oxígeno	63.35	48.36
14	Si	Silicio	20.89	27.99
13	Al	Aluminio	9.95	12.81
19	K	Potasio	5.81	10.83

Las figuras 3-2, 3-3 y 3-4, se aprecia la composición de diferentes partículas de la misma muestra mineral en que se observa la presencia de Cuarzo, Ortoclasa y Anortita.

Figura 3-5: Microfotografía de la textura general de partículas de la muestra de relave en 3 diferentes puntos y el espectro de emisión de rayos x del microanálisis.

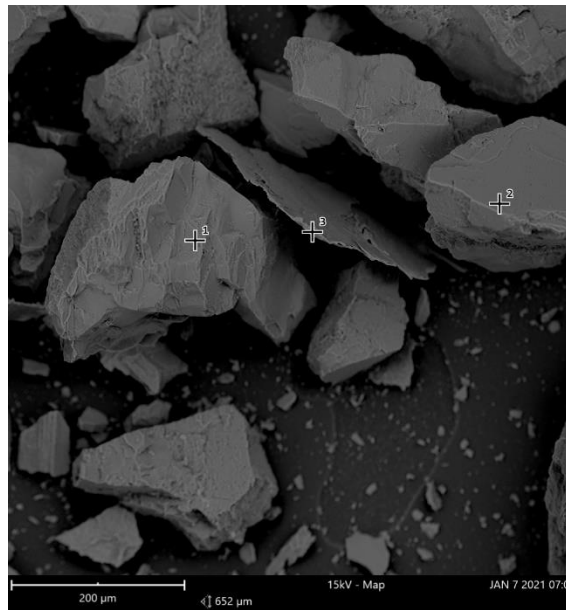


Tabla 3-7: Composición química de partículas de feldespato.

Punto	Número de Elemento	Símbolo del Elemento	Nombre del Elemento	Concentración Atómica	Concentración en peso
1	8	O	Oxígeno	57.04	41.17
	14	Si	Silicio	18.53	23.48
	19	Al	Aluminio	13.88	24.48
	13	K	Potasio	7.18	8.74
	7	N	Nitrógeno	3.37	2.13
2	8	O	Oxígeno	71.71	62.50
	14	Si	Silicio	10.06	15.39
	11	Na	Sodio	9.37	11.73
	13	Al	Aluminio	5.12	7.52
	7	N	Nitrógeno	3.74	2.85
3	8	O	Oxígeno	74.03	61.84
	13	Al	Aluminio	12.47	17.56
	14	Si	Silicio	12.12	17.77
	19	K	Potasio	1.39	2.83

En la figura 3-5, se analizan 3 puntos para diferenciar las especies presente en la muestra analizada. Cada uno de los puntos representa la presencia de feldespato potásico y sódico, con predominio de Ortoclasa.

Por medio de un análisis petrográfico se describe y clasifica los constituyentes de la muestra, sus cantidades relativas, tipos y variedades de rocas, contenido de minerales, grado de meteorización, nivel de porosidad y la presencia o no de contaminantes.

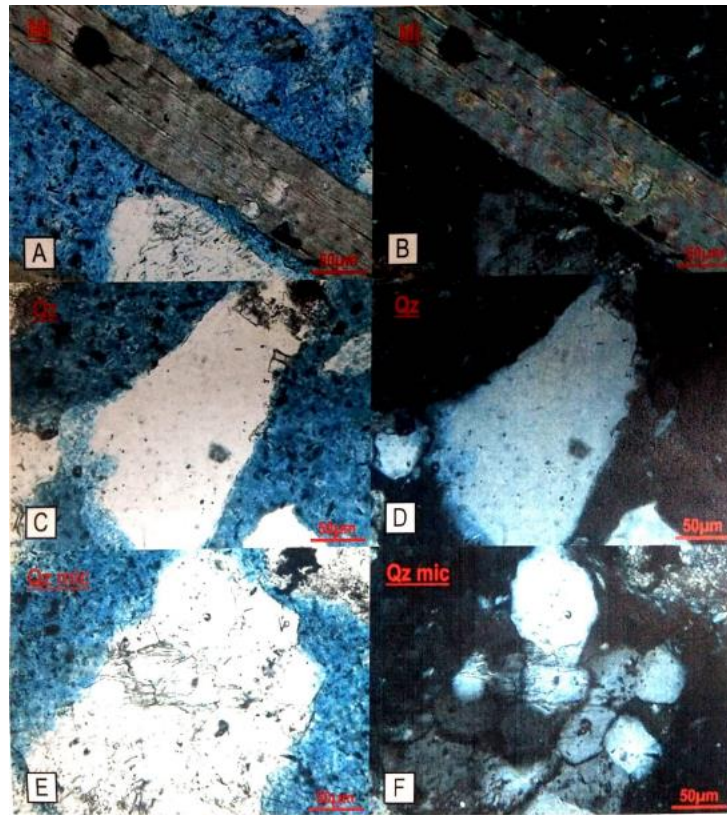
La muestra está constituida por monominerales y agregados de origen ígneo y escasos metamórficos. Los más abundantes son los monominerales representados por cuarzo, cuarzo microcristalino, micas y plagioclasas. En proporciones menores se observan agregados de origen ígneo que son pequeños fragmentos de granitos y andesitas basaltos, compuestos por plagioclasa, feldespato potásico y cuarzo, entre otros.

Tabla 3-8: Composición de la muestra

Constituyentes	Porcentaje de partículas	
	T-No. 100	T-No. 200
Ígneos	14.0	0.0
Metamórficos	7.0	0.0
Monomineral	76.3	95.1
Otros	2.6	4.9
Total	100.0	100.0

De acuerdo a la composición del mineral, la muestra de estudio contiene monominerales, principalmente granos de cuarzo, cuarzo microcristalino, micas y plagioclasas, entre otros. En general los agregados son compactos, sin porosidad y con baja alteración.

Finalmente, se encuentran fragmentos de rocas metamórficas tipo cuarcita. En la figura 3-6, se observa (A y B) Mi (mica) visto con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente. (C y D) cuarzo (Qz) vista con nicols paralelos y nicols cruzados respectivamente. (E y F) cuarzo microcristalino (Qz mic), vista con nicols paralelos y nicols cruzados, respectivamente.

Figura 3-6: Microfotografía (MOPP) de la muestra de relave minero (MOPP)

Por lo tanto, según la caracterización mineralógica realizada a un compuesto de relave minero, se determina la presencia de especies minerales que representan un potencial para diferentes fines industriales. Entre ellos, se destaca feldespato potásico y la presencia de cuarzo en mayor cantidad, que pueden ser una opción de alternativas de obtención de materias primas feldespáticas, a través de la línea de reprocesamiento de relaves, que con el correcto proceso de recuperación pueden representar material de calidad.

3.2. Ángulo de Contacto

La medición de ángulo de contacto para los diferentes reactivos utilizados en la flotación espumante con celda Partridge –Smith, muestran proporcionalidad con el porcentaje de recuperación de Ortoclasa en los ensayos de flotación. El tiempo de acondicionamiento del

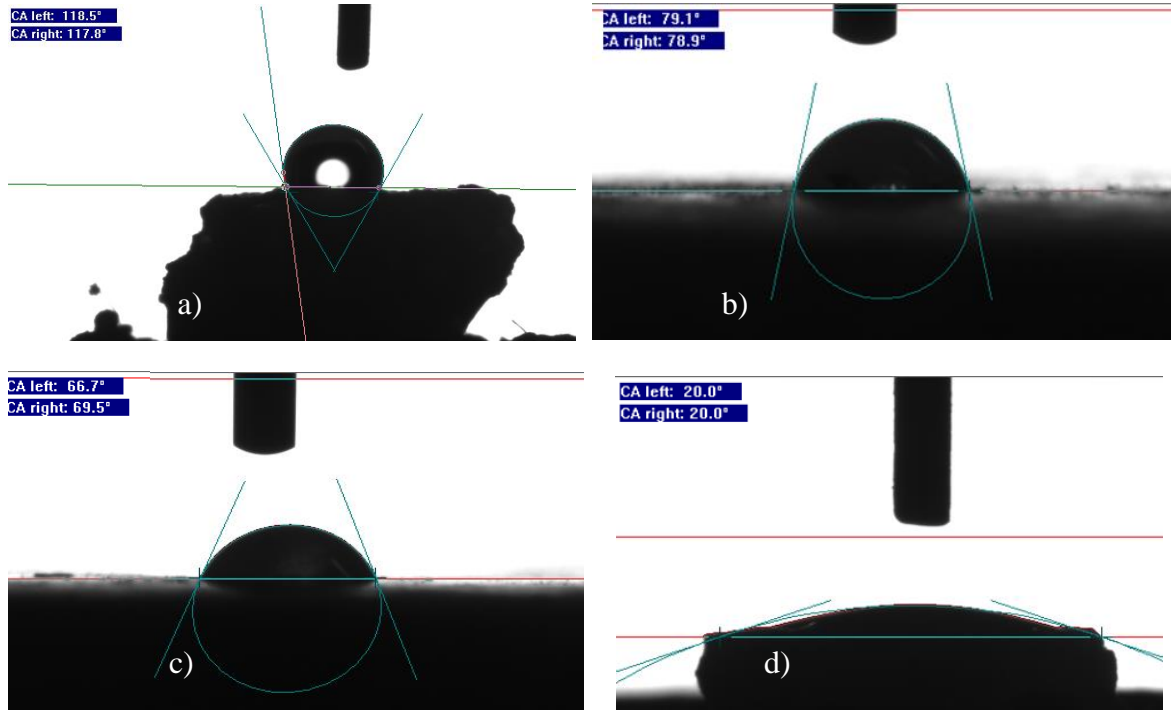
reactivo sobre la superficie mineral es de 10 min. Cada medida se triplicó para verificar cada valor obtenido.

En la tabla 3-9, se presenta los valores de los ángulos de contacto de cada reactivo en función del valor de pH. En el caso de Dodecilamina, se alcanzan valores de ángulo mayor a 90° mientras se trabaja con un pH más alcalino, mientras sucede lo contrario con el otro reactivo utilizado, Aero 3030C al llegar a pH 10, se precipitan y la hidrofobicidad disminuye notablemente. Sin embargo, se muestra una hidrofobicidad alta y la afinidad de los reactivos para promover la flotabilidad de la especie feldespática es muy buena.

Tabla 3-9: Medición de ángulo de contacto de los reactivos de flotación sobre la superficie mineral hidrofobizada.

Reactivo	Aero 3030C	Reagent S-9549	Dodecilamina
pH	Θ (°)	Θ (°)	Θ (°)
4	44,15	42,08	83,09
5	54,03	48,63	86,64
6	63,91	55,18	90,19
7	73,79	60,38	93,71
8	83,17	65,58	97,22
9	78,69	66,89	106,55
10	74,21	68,2	115,88

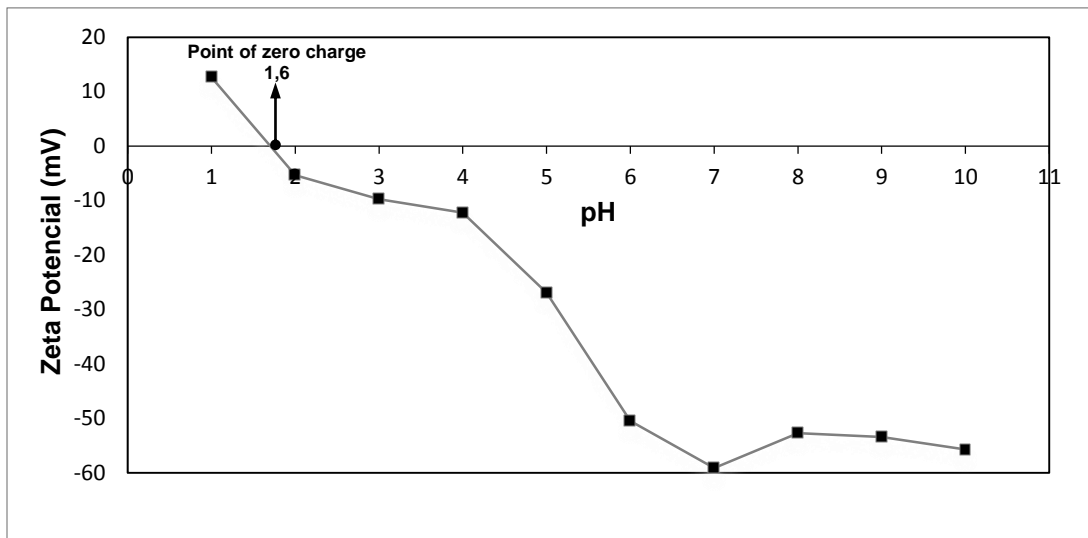
Figura 3-7: Ángulo de contacto de los reactivos de flotación sobre la superficie de Ortoclasa. a) Θ de Dodecilamina, b) Θ de Aero 3030C, c) Θ de Reagent S-9549 y d) Θ de agua sobre superficie sin hidrofobizar.



3.3. Potencial Zeta

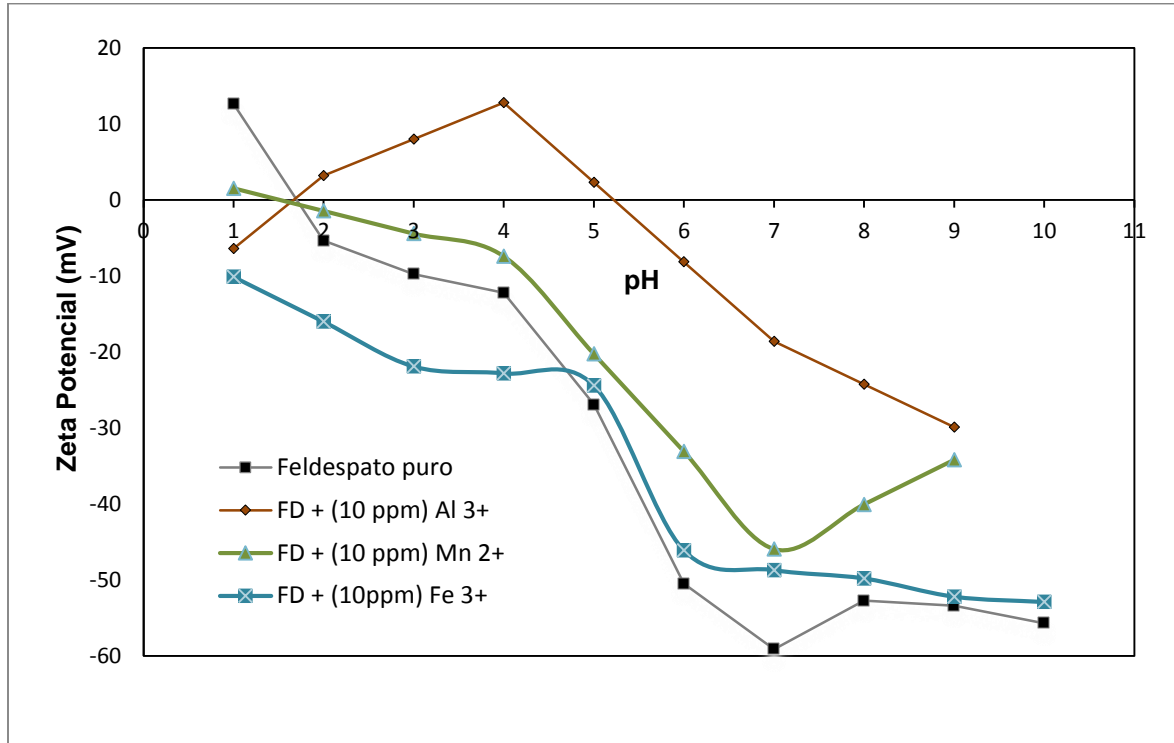
Para elaborar la curva de potencial del feldespato potásico se utiliza una fracción muy pequeña de mineral y se interacciona con el pH desde valores muy ácidos hasta alcanzar valores alcalinos. En la siguiente figura se grafica el valor del ZPC de la muestra mineral, que tiene un valor de 1.6, cercano a valores reportados teóricamente. Específicamente posee una carga negativa casi en la totalidad del rango de pH. Es notorio que en pH neutro a alcalino tiene una mayor carga negativa que lo hace afín a la utilización de colectores catiónicos.

Figura 3-8: Curva de potencial de feldespato potásico (Ortoclasa)



Como se menciona anteriormente, se pretende contaminar la superficie mineral de la ortoclasa con iones para estudiar el comportamiento de la carga superficial del mineral. para ello se utiliza una mínima carga iónica (10ppm) de Al^{3+} , Fe^{+3} y Mn^{+2} . Esta carga iónica se adiciona a la solución de feldespato potásico de alta pureza y se obtiene las siguientes gráficas, correspondientes a la interacción de los iones sobre la superficie.

Figura 3-9: Curva de potencial de feldespato con la interacción de iones contaminantes superficiales



De acuerdo a la gráfica de la carga superficial con iones contaminantes, se observa que la adición de iones de Al^{3+} invierte los valores de la carga en pH ácidos a neutros trasladando el valor de ZPC hacia valores más neutros. El ZPC que se reporta tiene un valor de 5.1 y una carga negativa relativamente más baja si la comparamos con la curva de potencial inicial.

El comportamiento del potencial con los otros iones mencionados, mantienen una tendencia parecida a la del potencial de carga del feldespato puro, inclusive tienen valores de ZPC muy parecidos y similares a 1.6. En el caso particular de la carga iónica de 10 ppm de Fe^{3+} no alcanza a reportar valores de ZPC ya que se desestabiliza la solución y no presenta lecturas de valores al utilizar el equipo.

Siendo así, según se aprecia en la gráfica es posible cambiar la carga superficial de una especie mineral con una adición mínima de iones, los cuales predominan el comportamiento superficial del feldespatos potásico.

3.4. Tensión superficial y Energía libre superficial

En la tabla 3-10, se muestran los valores obtenidos de las tensiones de los reactivos utilizados en el proceso y los valores de ángulo de contacto que forman con la superficie mineral inicial sin tratamiento.

Tabla 3-10: Tensiones de líquido

Líquido	Y total (mN/m)	Y ^d	Y ⁱ	T (°C)	Θ
Agua (est)	72.10	19.90	52.20	25°C	26,1
n-heptano	20.14	20.14	0.00		5,7
n-hexano	33,73	18.43	0.00		5,85
Etileno glicol	48.00	29.00	19.00		40,13

La energía libre superficial del feldespatos se calcula con la utilización de la medición de ángulo de contacto de ciertos líquidos alcanos. Cada uno forma un ángulo de contacto diferente sobre la superficie mineral. La energía libre superficial tiene un valor inicial de 58.95 mN/m.

$$Y = \underbrace{Y^i} + \underbrace{Y^d}$$

Componente iónica	Componente de dispersión
Depende de la estructura iónica del agua (OH ⁻ – H ⁺)	Componente material (cte)

Tabla 3-11: Características de Energía Superficial y sus componentes

SE inicial mN/m	58,95
Y ^d	16.14
Y ^p	42.81
Y ⁱ	29.475

A partir de la superficie del feldespato hidrofobizada respectivamente con los reactivos colectores, se mide el ángulo de contacto. Los valores obtenidos se expresan en la tabla 3-11.

Tabla 3-11: Ángulo de contacto sobre superficie hidrofobizada

Líquidos/Reactivos	Dodecilamina	Aero 3030C	Reagent S-9549
agua	86,57	54,03	48,63
n-Hexano	70,6	29,33	10,97
n-Heptano	10,42	30,48	10,23
Etilenoglicol	73,93	63,72	56,65

En la tabla 3-12, se muestran los valores obtenidos de energía superficial del feldespato hidrofobizado y cada uno de los valores de sus componentes respectivamente bajo un escenario de pH 5 natural.

Tabla 3-12: Ángulo de contacto sobre superficie hidrofobizada

Reactivos	SE (mN/m)	γ^d	γ^p	γ^i
Dodecilamina	20.55	8.14	12.41	10.275
Aero 3030C	45.43	13.16	32.27	22.715
Reagent S-9549	50.31	18.95	31.36	25.155

Como los valores de ángulo de contacto incrementan de acuerdo a un valor de pH, mientras más alcalino, mayor es el ángulo que se obtiene, su energía superficial disminuye, y los valores de la componente iónica van tendiendo a valores más cercanos a 0.

3.5. Flotación espumante en Celda Denver

Como los ensayos de flotación espumante se realizaron previamente para definir parámetros de flotación y reactivos, en la tabla 3-13 y tabla 3-14, se mencionan los resultados de algunas de las flotaciones convencionales con el uso de HF y colectores aminas.

A través del análisis de los datos obtenidos, se aprecia el potencial que el relave minero puede alcanzar si se logra recuperar especies de feldespato para uso industrial. Sin embargo, la recuperación no ha sido tan alta con una recuperación del 60% ya que se trabaja en dos etapas de flotación, si bien al analizar la recuperación global, es baja, al estudiar por etapas se diferencia una mayor recuperación de feldespato. Es así que se manifiesta el uso de reactivos colectores amina para la flotación de feldespato. En estos ensayos, se destaca el proceso de flotación espontáneo con tiempos de flotación cortos de intervalos de 3 min.

Tomando en cuenta, las variables que se observan se definen los parámetros con los que se pretende interactuar en un enfoque fisicoquímico de mayor detalle.

Tabla 3-13: Resultados de flotación de especies de feldespato de relaves mineros

Muestra	P1		Masa total				352,06	
	Peso	% Ortoclasa	Ortoclasa reconst.	% Anortita	Anortita reconst.	% Cuarzo	Cuarzo reconst.	
[] ₂ (Cleaner)	16,36	38,80	26,50	34,30	28,62	13,80	38,39	
T ₂ (Cleaner)	23,66	18,00		24,70		55,40		
[] ₁ (Rougher)	40,02	26,50	14,45	28,62	21,25	38,39	60,47	
T ₁ (Rougher)	312,04	12,90		20,30		63,30		

Tabla 3-14: Resultados de flotación por etapas (Cleaner) de especies de feldespato de relaves mineros

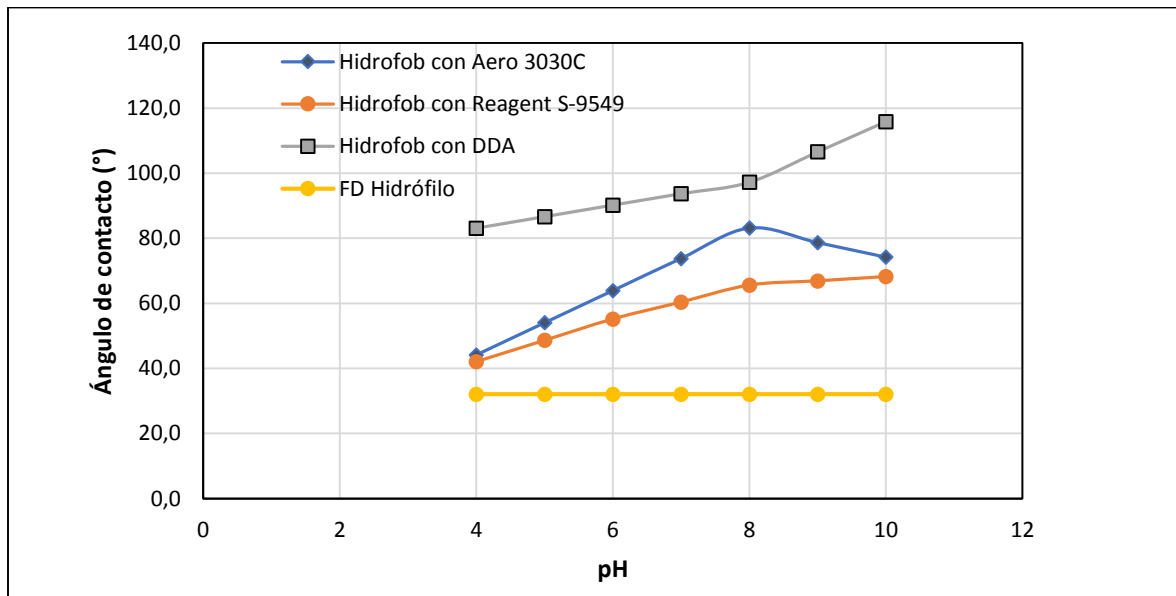
	<i>Índices Metalúrgicos</i>			R	R	RE	RE
				Ortoclasa	Anortita	Ortoclasa	Anortita
P1	ta (cabeza)	26,50	28,62				
	tt	18,00	24,70	60%	49%	1,464	1,198
	tc	38,80	34,30				
P2	ta	25,72	24,65				
	tt	21,60	23,10	44%	37%	1,326	1,128
	tc	34,10	27,80				

Es por ello, que a raíz de lo observado en las flotaciones se define trabajar con los reactivos colectores aminas: Dodecilamina, Aero 3030C y Reagent S-9545 como variables del proceso de flotación.

3.6. Flotación espumante en Celda Partridge-Smith

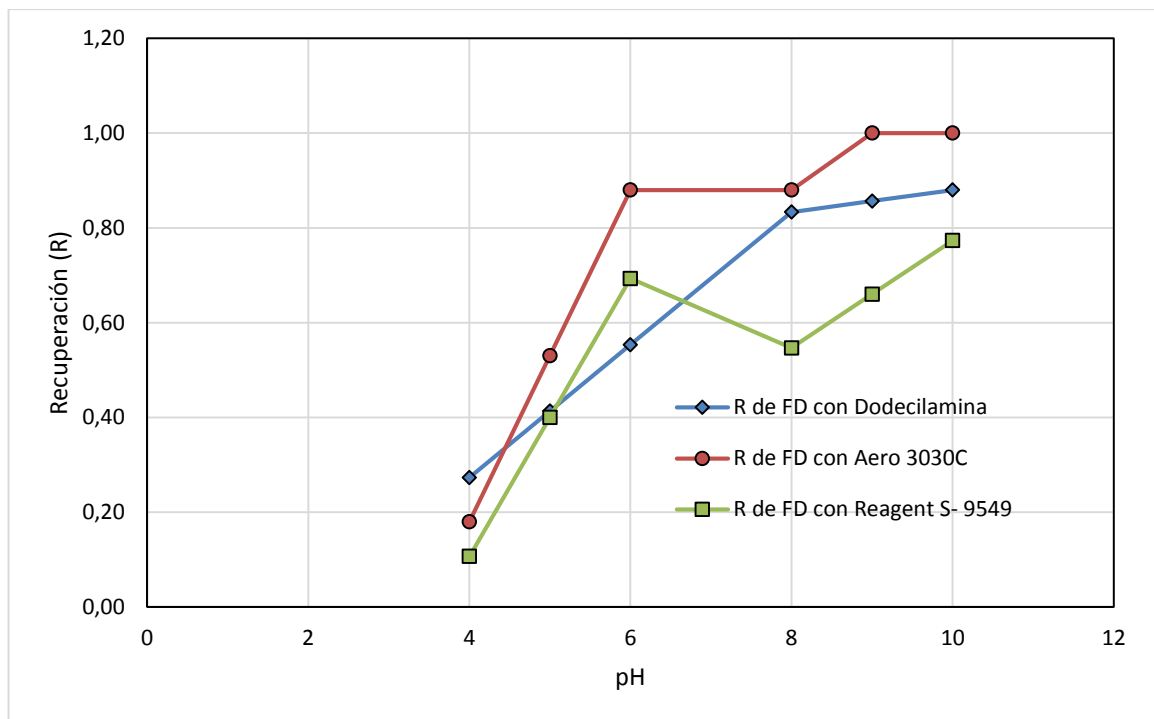
De acuerdo a los resultados obtenidos en la hidrofobización mineral, los ángulos obtenidos en un rango amplio de pH neutro a alcalino, como se observa en la figura 3-11, al incrementar el pH se incrementa el valor del ángulo de contacto, y este a su vez está acorde a los resultados obtenidos de las microflotaciones en celda Partridge – Smith que muestran valores de recuperación mineral alto y una buena flotabilidad de Ortoclasa bajo los parámetros mencionados (ver figura 3-12).

Figura 3-11: Ángulo de contacto en función del valor de pH



Es evidente que, si se compara el ángulo de contacto sin la acción de un colector con uno de los reactivos utilizados, se logra hidrofobizar la superficie mineral notablemente. Y al relacionar los datos de los ángulos de contacto obtenidos, van acorde a la flotabilidad obtenida del Ortoclasa.

Figura 3-12 Recuperación de mineral feldespático (Ortoclasa) con diferentes colectores aminos en intervalos de pH alcalino



Como se muestra, la recuperación de feldespato potásico ha sido evidente mientras el valor de pH alcanza valores alcalinos, sin embargo, es conveniente mantener una flotación en condiciones donde la curva se mantiene lineal, ya que en ese punto es en donde se obtiene mayor concentración de mineral con buena recuperación y con probabilidades bajas de contaminar un concentrado con mineral de ganga; que corresponde entre los valores neutros en el caso de Aero 3030C y Reagent S-9549, mientras que en el caso particular de Dodecilamina el rango es más amplio, hasta pH 8 con una recuperación del 80%, cuyo valor es representativo para la industria y proyecta un buen proceso de obtención mineral.

Ahora, si se analiza la recuperación en función del pH y el ángulo de contacto se obtienen las siguientes curvas con un comportamiento acorde a los valores de Θ y recuperación, ya que indican la relación directa entre éstas dos variables fisicoquímicas. En la figura 3-15, en el caso de Dodecilamina, las recuperaciones obtenidas de mineral son altas aunque no superiores a los valores obtenidos frente a los otros reactivos. Sin embargo, la interacción entre Θ y recuperación se mantiene estable a lo largo del intervalo de pH directamente relacionado.

Figura 3-13 Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Aeromine 3030C

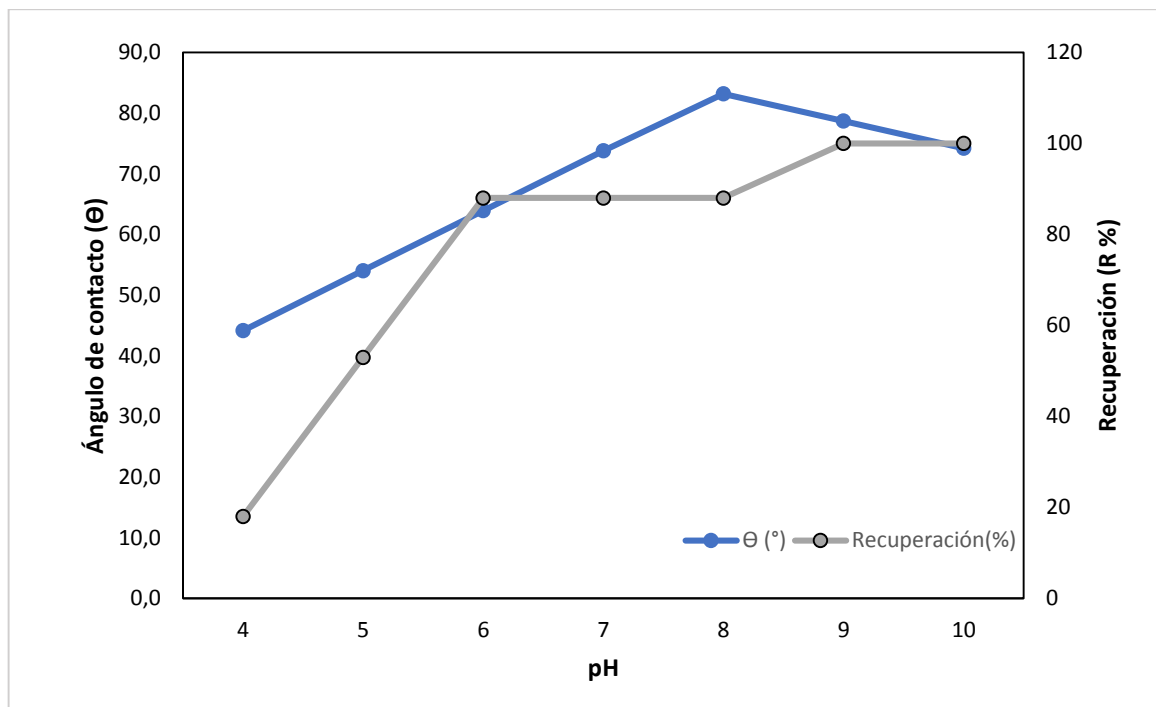


Figura 3-14 Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Reagent S-9549

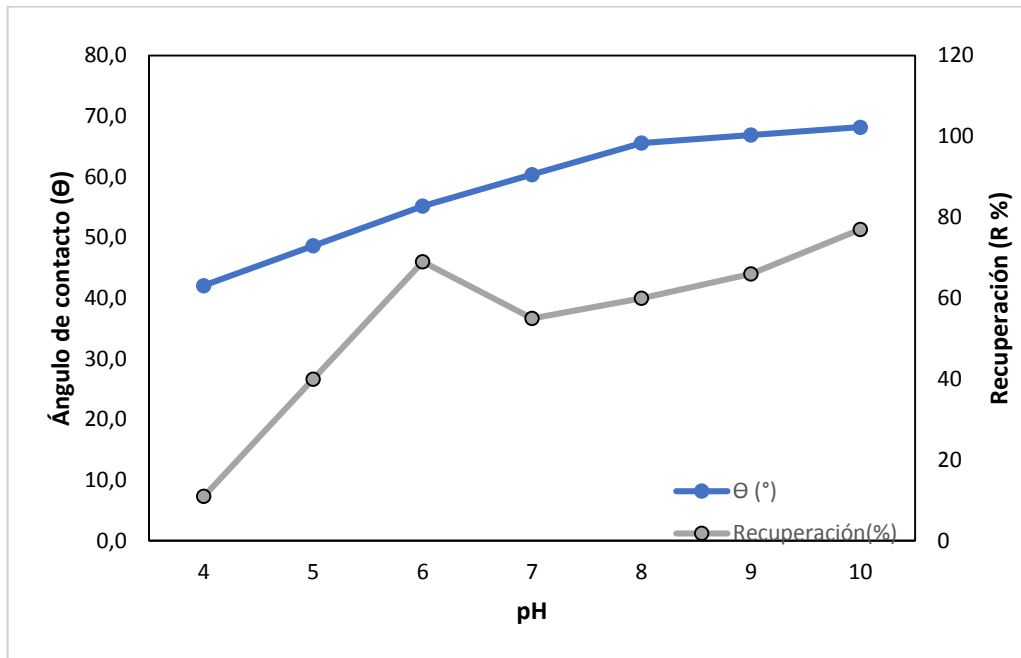
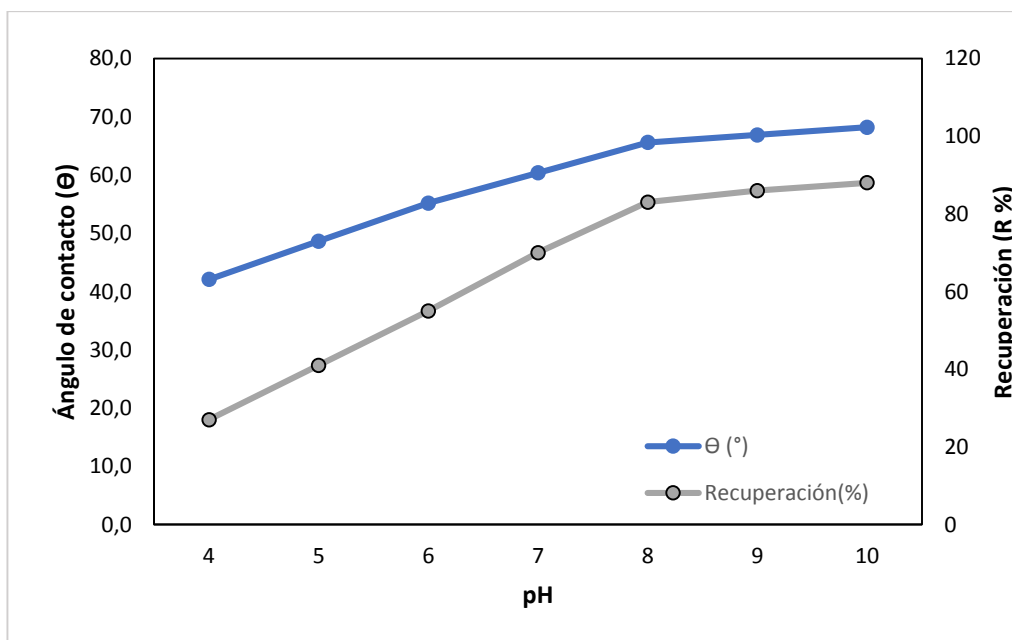


Figura 3-15 Recuperación en función del pH y ángulo de contacto con colector Dodecilamina



4. Conclusiones y recomendaciones

4.1 Conclusiones

La flotación selectiva de feldespato potásico de material proveniente de relaves de minería metálica es posible bajo ciertos parámetros fisicoquímicos como la afinidad de ciertos reactivos, el valor de pH, los cuáles a través del valor de ángulo de contacto, determinan la hidrofobicidad de la especie mineral de otras. Por medio de una caracterización completa se puede determinar un potencial geometalúrgico de un relave que puede ser utilizado para diferentes aplicaciones industriales, ya sea dentro de la industria de la cerámica y vidrio, principalmente.

El análisis de las diferentes propiedades del feldespato puede ser utilizado para determinar escenarios para la hidrofobización mineral, sin embargo, existe la proximidad de valores de potencial zeta entre el cuarzo y los feldespatos que puede llegar a dificultar una separación selectiva, este valor se encuentra alrededor de pH 1 y 3. Los colectores aminas utilizados tienden a tener una buena afinidad hacia la Ortoclasa como se evidencian en las microflotaciones en celda Partridge - Smith. Sin embargo, Dodecilamina alcanza valores muy altos de ángulo de contacto, que indican una mayor hidrofobicidad del mineral, con respecto a los colectores Aero 3000C y Reagent S-9549.

En las curvas de potencial zeta obtenidas al utilizar iones en la superficie mineral, invierte los valores de la carga en un rango de pH ácidos a neutros, trasladando el valor de ZPC del feldespato hacia valores más neutros hacia alcalinos, ya que el aluminio juega el papel del ion determinante de potencial. Siendo así se logra modificar la carga superficial de una especie mineral (Ortoclasa) con adición mínima de iones, lo que define un comportamiento

superficial diferente. Se invierte la polaridad del potencial zeta con el ion Al^{3+} siendo este determinante de potencial.

Esta curva indica la posibilidad de hidrofobizar la superficie con un colector catiónico, manteniendo valores de solución a pH neutro y hasta flotar a pH alcalinos sin sobrepasar el límite de precipitación de los reactivos colectores con la utilización de NaF en un sistema cuarzo – feldespato. Ahora, analizando el escenario donde el pH juega un papel importante en el proceso de flotación, y la concentración de los colectores se mantiene estable, se enmarca un proceso de flotación dentro de la zona de variación lineal. A su vez, se abre la posibilidad de cambiar de colector catiónico por un aniónico, dependiendo de la posición en la que se encuentre generando el escenario fisicoquímico pH dependiente, es decir en el rango de pH 4 a 5. Por lo tanto, es posible identificar un mecanismo de hidrofobización de feldespato potásico utilizando el ion Al^{+3} como activador para lograr la flotabilidad en un escenario alcalino.

Con respecto a la energía libre superficial, se calcula un valor de 58.95 mN/m inicial, al hidrofobizar la superficie respectivamente con los reactivos aminas, se determina que la energía libre superficial disminuye, en los tres casos; esto a su vez nos indica que la componente iónica tiende a disminuir su valor, lo que genera un escenario propicio para la hidrofobicidad, haciendo que el papel de los colectores sea propicio para la flotación del mineral. Se puede concluir de igual forma que, de acuerdo al valor de los ángulos de contacto obtenidos con variación de pH, estos incrementan; es así que la energía superficial disminuye mientras se incrementa el valor hacia valores alcalinos, obteniendo una componente iónica muy baja.

Finalmente, se puede deducir que los relaves mineros utilizados presentan un potencial geometalúrgico adecuado para fines industriales que mediante un proceso de flotación selectiva se puede recuperar especies minerales como materias primas ya que con el uso de colectores aminas a pH neutros a alcalinos se alcanza una flotabilidad del 90% con una hidrofobización de feldespato casi nula inicialmente, a través de ángulo de contacto hasta alcanzar valores mayores a 100° , lo que indicaría una hidrofobización completa. El estudio

de propiedades fisicoquímicas de superficie, da la posibilidad de evaluar nuevos escenarios hacia un comportamiento hidrofóbico.

4.2 Recomendaciones

Se puede ampliar el estudio de las propiedades fisicoquímicas que interactúan en la flotación espumante de especies de feldespato, analizando el comportamiento individualmente por especies para desarrollar más estudios que fundamenten la teoría de flotación de silicatos.

Se puede considerar nuevos parámetros como la concentración de los reactivos, tipo de reactivo, etc.

Ampliar el estudio de iones contaminantes y su interacción con diferentes cargas iónicas sobre la superficie mineral.

Bibliografía

- Ari, V. (2001). *Flotation of silicates minerals: Physico-chemical studies in the presence of alkylamines and mixed (cationics/anionics/non-ionic) collectors (Tesis Doctoral)*. Lulea University of Technology.
- Banik, R., Suresh, N., Mandre, N. R., & Engineering, M. (2002). Beneficiation of low-grade feldspars using free jet flotation. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, 23 3-4, 129–140.
doi:<https://doi.org/10.1080/08827500290110331>
- Benito, P. (2019). Puesta en marcha de un módulo de ensayos de flotación a escala laboratorio para la separación de arenas silíceas y feldespáticas. Retrieved from https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/38558/TFG_Benito_Gonzalez_Paula.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Bustamante Rúa, M. O. (2017). *Apuntes de Flotación de Minerales*. Medellín, Antioquia, Colombia.
- Bustamante Rúa, M. O., Gaviria Cartagena, A. C., & Restrepo Baena, O. J. (2008). Notas de clase de la asignatura: Concentración de Minerales. 83. Medellín.
- Cytec. (2002). *Mining Chemicals HANDBOOK*.
- David (Ed.). (2016). *Foro por Metalurgista de 911Metallurgist*. Retrieved from *Procesamiento de Feldespato por Flotación*: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/procesamiento-feldespato-flotacion/>
- DNP. (n.d.). *Cerámica*. Retrieved from Departamento Nacional de Planeación: <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Desarrollo%20Empresarial/Ceramica.pdf>
- Duque Escobar, G. (2016). *Manual de geología para ingenieros*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from <http://www.bdigital.unal.edu.co/1572/408/manualgeo.pdf>

- Economía, S. d. (2014). *Pérfil de mercado del feldespato*. Ciudad de México: Dirección general de desarrollo minero.
- Estrada, D., Echeverry, L., & Ramirez, A. (2020, Octubre). Molybdenite Flotation in the Presence of a Polyacrylamide of Low Anionicity Subjected to Different Conditions of Mechanical Shearing. *DMPI*.
- Finch, B. A., & Wills, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology* (Octava edición ed.).
- Fuerstenau, M. C., Jameson, G. J., & Yoon, R.-H. (2007). *Froth Flotation: A Century of Innovation* (Ilustrada ed.). (SME, Ed.) Retrieved from <https://books.google.ca/books?id=8zpjAhBViC0C>
- Griem - Klee, S. (2016, Agosto 3). *Geovirtual*. Retrieved Junio 10, 2020, from Métodos de exploración y prospección: <https://www.geovirtual2.cl/EXPLORAC/TEXT/Exploraciones-Mineras-01ok.htm>
- Kelly, E., & Spottiswood, D. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales* (Español ed.). México: Limusa S.A. Retrieved from Scrib: <https://es.scribd.com/doc/303748853/E-G-Kelly-D-J-Spottiswood-Introduccion-Al-Procesamiento-de-Minerales>
- Kuzvart, M. (s,f). *Industrial Minerals and Rocks in the 21st Century*. Retrieved from https://www.ehu.es/sem/seminario_pdf/SEMINARIO_SEM_2_287.pdf
- Laverde, D., Pedraza, J., Ospina, S., Báez, E., García, I., Pinto, P., & Espitia, I. (2004, Noviembre). El beneficio de arenas feldespáticas: una solución para la industria cerámica colombiana. (U. N. Colombia, Ed.) *Dyna*, 71(143), 45-54. Retrieved from <https://www.redalyc.org/pdf/496/49614305.pdf>
- Lehtinen, M. (2015). *Mineral Deposits of Finland*. (W. D. Maier, R. Lahtinen, & H. O'Brien, Eds.) Elsevier. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124104389000261>
- León, T., & Tepán, J. (2011). Optimización del método de flotación en la purificación de feldespatos para la elaboración de pastas de cerámica blanca. 150. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/2978>
- Malvern Instruments. (2009, Mayo). Zetasizer Nano Series User Manual. Inglaterra, Reino Unido.
- Manser, R. M. (1975). Handbook of Silicate Flotation.

- Mantilla, C., Pedraza, J., & Laverde, D. (2008, Marzo). Utilización de estudios de potencial zeta en el desarrollo de un proceso alternativo de flotación de mineral feldespático. *DYNA*, 75(154), 65-71. Retrieved from <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/prINTERfriendly/1715/11607>
- Morral, F. R., Jimeno, E., & Molera, P. (1985). *Metalurgia General* (Vol. 2). Reverte. Retrieved from https://books.google.com.ec/books?id=I-hsKRVkzsAC&dq=el+cobre+y+sus+FORMAS&hl=es&source=gbs_navlinks_s
- Novoa, G., & Vargas, L. (2013). *VARIABLES Y PROPIEDADES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE FLOTACIÓN*. Retrieved from Academia: http://www.academia.edu/14081794/VARIABLES_Y_PROPIEDADES_QUE_INFLUYEN_EN_EL_PROCESO_DE_FLOTACION
- O'meara, R. g. (1939). Froth flotation and affluarite tabling of feldspar. *Bull. Am. Ceram. Soc*, 18 (8), 286-292.
- Pattanaik, A., & Venugopal, R. (2019). Role of Surfactants in Mineral Processing: An Overview. In A. K. Dutta (Ed.), *Surfactants and Detergents*. IntechOpen. doi:DOI: 10.5772 / intechopen.85947
- Rattanakawin, C., & Thacom, B. (2019). Froth flotation of mixed feldspar. *SJST*, 41, 1314-1318. Retrieved from <https://rdo.psu.ac.th/sjstweb/journal/41-6/16.pdf>
- Sulaymonova, V. A., Fuchs, M. C., Gloaguen, R., Möckel, R., Merchel, S., Rudolph, M., & Krbetschek, M. R. (2018, Junio). Feldspar flotation as a quartz-purification method in cosmogenic nuclide dating: A case study of fluvial sediments from the Pamir. *MethodsX*, 5, 717-726. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221501611830102X>
- Universidad de Chile - Ingeniería Civil de Minas. (n.d.). Fundamentos de Flotación de Minerales. Chile. Retrieved from https://www.u-cursos.cl/diplomados/2011/0/DGMMC-4/2/material_docente/bajar?id_material=397832.
- UPME. (2020, Junio 01). www1.upme.gov.co. Retrieved from <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/feldespatos.aspx>
- UPME Subdirección de minería. (2020, Octubre). *Sistema de Información Minero Colombiano*. Retrieved from SIMCO: <https://www1.upme.gov.co/simco/Cifras-Sectoriales/Paginas/feldespatos.aspx>
- Valderrama, L., & Miranda, H. (2005, Noviembre). Determinación de la energía libre superficial mediante la medición de ángulo de contacto a minerales de la región de

Atacama. *ENTME*, 570-576. Retrieved from https://artigos.entmme.org/download/2005/outros_temas/1668%20-%20Valderrama,L._Miranda,H.%20-%20DETERMINACION%20DE%20LA%20ENERGIA%20LIBRE%20SUPERFICIAL%20MEDIANTE%20LA%20MEDICION%20DEL%20C3%93N%20DEL%20C3%81NGULO%20DE%20CONTACTO%20A%20MINERALES%20DE%20LA%20REGION%20CENTRAL

Veritrade. (2015). *Información de comercio exterior de latinoamérica y el mundo*. Retrieved from Feldespato: <https://www.veritradecorp.com/es/colombia/importaciones-y-exportaciones/feldespato/252910>

Zanellia, C., Domínguez, E., Iglesias, C., Conte, S., Molinari, C., Soldati, R., . . . Dondi, M. (2018). Recycling of residual boron muds into ceramic tiles. *Boletín de la sociedad española de cerámica y vidrio*, 12.