

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS A LA TOSTACIÓN DE
LOS AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE PARA LA RECUPERACION DE ORO
MEDIANTE EL PROCESO CGA**

**BRANDON YESID OLARTE PINEDA
LIZETH NATHALIA PEÑALOZA TARAZONA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2.015

**IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS A LA TOSTACIÓN DE
LOS AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE PARA LA RECUPERACION DE ORO
MEDIANTE EL PROCESO CGA**

BRANDON YESID OLARTE PINEDA

LIZETH NATHALIA PEÑALOZA TARAZONA

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Metalúrgico

Directora: PhD. Elcy María Córdoba Tuta

**GRUPO DE INVESTIGACIONES EN MINERALES, BIOMETALURGIA Y
AMBIENTE - GIMBA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA**

2.015

DEDICATORIA

Dedicamos este triunfo primeramente a Dios, quien nos guio y nos dio salud y fortaleza para culminar con esta etapa de nuestras vidas.

A nuestros padres, por su amor, esmero y apoyo incondicional en toda esta etapa.

A nuestros hermanos quienes de una u otra manera hicieron parte de este logro a través de su ejemplo y apoyo.

A nuestros amigos y cada una de las personas que nos brindaron su compañía y apoyo en este proceso de formación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Grupo de Investigación en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) por el apoyo económico brindado en este proyecto de investigación.

A la profesora Elcy María Córdoba Tuta por su orientación en la realización de este trabajo.

A Yury Lopez, miembro del GIMBA, por su colaboración prestada durante el curso del proyecto.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica, especialmente Ambrosio Carrilo por la ayuda y el apoyo incondicional.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN. _____	19
1. OBJETIVOS. _____	21
1.1. OBJETIVO GENERAL. _____	21
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	21
2. MARCO TEÓRICO _____	22
2.1. PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN (PROCESO CGA). _____	22
2.1.1. Etapas del proceso CGA _____	23
2.1.1.1. Formación de los aglomerados carbón aceite _____	23
2.1.1.2. Contactación entre los aglomerados carbón-aceite y la pulpa mineral ____	24
2.1.1.3. Calcinación de los aglomerados cargados con oro _____	25
2.1.2. Ventajas del proceso CGA _____	25
2.1.3. Limitaciones del proceso CGA _____	26
2.2. POSIBLES TECNICAS DE SEPARACIÓN CARBÓN-MINERAL. _____	26
2.2.1. Concentración gravimétrica por mesa Wilfley _____	27
2.2.2. Flotación de carbones _____	29
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL. _____	31
3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS _____	31

3.1.1. Caracterización del mineral	31
3.1.1.1. Molienda y análisis granulométrico	31
3.1.1.2. Caracterización química y mineralógica	31
3.1.1.3. Lixiviación diagnóstico	32
3.1.1.4. Cianuración en botella	32
3.1.1.5. Cianuración por agitación mecánica	33
3.1.2. Caracterización del carbón	33
3.1.2.1. Trituración, molienda y análisis granulométrico	33
3.1.2.2. Análisis próximo del carbón	33
3.1.2.3. Ángulo de contacto	34
3.1.3. Caracterización del aceite crudo de soya	34
3.1.3.1. Densidad	34
3.1.3.2. Viscosidad	35
3.2. ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DEL PROCESO CGA	35
3.2.1. Preparación de los aglomerados carbón-aceite	35
3.2.2. Recuperación de oro a partir del contacto pulpa mineral-aglomerados	35
3.3. SEPARACIÓN DEL ORO DE LOS AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE	36
3.3.1. Disgregación de los aglomerados cargados con oro	36
3.3.1.1. Evaluación de la capacidad de varios desengrasantes para disgregar los aglomerados	36
3.3.1.2. Selección del desengrasante y ajuste de las condiciones de disgregación de los aglomerados	37

3.3.2. Separación de las partículas minerales con oro del carbón _____	37
3.3.2.1. Concentración por mesa Wilfley _____	37
3.3.2.2. Concentración por flotación _____	38
4. RESULTADOS Y ANÁLISIS _____	39
4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS _____	39
4.1.1. Caracterización del mineral _____	39
4.1.1.1. Análisis granulométrico. _____	39
4.1.1.2. Caracterización química y mineralógica. _____	40
4.1.1.2.1. Caracterización química _____	40
4.1.1.2.2. Caracterización mineralógica _____	41
4.1.1.3. Lixiviación diagnóstico _____	42
4.1.1.4. Cianuración en botella _____	43
4.1.1.5. Cianuración por agitación mecánica _____	44
4.1.2. Caracterización del carbón _____	45
4.1.2.1. Análisis granulométrico _____	45
4.1.2.2. Análisis próximo del carbón _____	46
4.1.2.3. Angulo de contacto _____	46
4.1.3. Caracterización del aceite _____	47
4.1.3.1. Densidad y viscosidad _____	47
4.2. ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DEL PROCESO CGA _____	48
4.2.1. Preparación de los aglomerados carbón-aceite _____	48
4.2.2. Recuperación de oro a partir del contacto pulpa-aglomerado _____	49

4.2.2.1. Tamaño de aglomerados _____	50
4.2.2.2. Velocidad de contactación _____	50
4.2.2.3. Cantidad de acondicionante _____	51
4.3. RECUPERACIÓN DEL ORO CARGADO EN LOS AGLOMERADOS _____	53
4.3.1. Disgregación de los aglomerados en diferentes soluciones desengrasantes _____	54
4.3.2. Concentración de los aglomerados _____	58
4.3.2.1. Concentración gravimétrica en Mesa Wilfley _____	58
4.3.2.1.1. Efecto del ángulo de inclinación _____	58
4.3.2.1.2. Efecto del tiempo de lavado sobre la recuperación de oro _____	61
4.3.2.2. Flotación espumante _____	66
5. CONCLUSIONES _____	70
6. RECOMENDACIONES _____	72
CITAS BIBLIOGRÁFICAS _____	74
BIBLIOGRAFÍA _____	78
ANEXOS _____	79

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Análisis químico del mineral usado	40
Tabla 2. Especies cristalinas presentes en el mineral usado	41
Tabla 3. Grado de lixiviabilidad de los minerales auríferos	44
Tabla 4. Análisis próximo del carbón usado	46
Tabla 5. Medidas del ángulo de contacto para el carbón usado.	47
Tabla 6. Valores promedio de densidad y viscosidad del aceite crudo de soya ...	47
Tabla 7. Influencia de la velocidad de agitación sobre el tamaño de los aglomerados	49
Tabla 8. Influencia del tamaño de aglomerados en la recuperación de oro.	50
Tabla 9. Influencia de la velocidad de contactación en la recuperación de oro	51
Tabla 10. Influencia de la cantidad de acondicionante en la recuperación de oro.	51
Tabla 11. Condiciones establecidas para la formación de aglomerados carbón aceite.	52
Tabla 12. Condiciones establecidas para la etapa de contactación	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema del proceso de recuperación de partículas de oro con aglomerados carbón-aceite.	23
Figura 2. Esquema del proceso de separación por corrientes longitudinales (Mesa Wilfley).	28
Figura 3. Esquema del proceso de flotación.	30
Figura 4. Distribución granulométrica del mineral inicial.	39
Figura 5. Distribución granulométrica del mineral usado para el desarrollo del proyecto.	40
Figura 6. Micrografía SEM del mineral a 500x y espectros EDS. a) EDS de la Ortoclasa, b) EDS de la Pirita, c) EDS del Cuarzo.....	42
Figura 7. Porcentaje de oro asociado con los diferentes compuestos presentes en el mineral.	43
Figura 8. Curva cinética del ensayo de cianuración en botella del mineral.....	44
Figura 9. Curva de cianuración del mineral por agitación mecánica.	45
Figura 10. Distribución granulométrica del carbón luego de su conminución.	45
Figura 11. Fotografía de los aglomerados carbón aceite antes y después de la etapa de contactación con el minera,. izquierda aglomerados sin cargar y derecha aglomerados cargados.	53
Figura 12. Micrografía SEM a 100x de un aglomerado después de la etapa de contactación a) Vista superior del aglomerado b) Corte transversal, vista interna del aglomerado.	54
Figura 13. Soluciones usadas para la remoción del aceite de los aglomerados. ...	55

Figura 14. Fotografías de los aglomerados luego de su lavado bajo diferentes condiciones: a) Agua + bicarbonato b) Agua a 50°C c) Agua + Talcos d) Agua + detergente temperatura ambiente e) Agua + acetona f) Agua + alcohol g) Agua + sal.	56
Figura 15. Fotografías de los aglomerados luego de su lavado con las soluciones desengrasantes finales: a) Agua + detergente a 50°C b) Agua + detergente a 70°C c) Agua + shampoo d) Agua + vanish.....	57
Figura 16. Productos de concentración en Mesa Wilfley a) 20°, b) 15°, c) 10°	58
Figura 17. Distribución del oro en los productos de concentración en Mesa Wifley a diferentes ángulos de inclinación.	60
Figura 18. Leyes de oro de los productos obtenidos para cada ángulo de inclinación.	60
Figura 19. Distribución del oro en los productos de concentración en Mesa Wilfley con ángulo de inclinación de 20° y diferentes tiempos de lavado.	62
Figura 20. Leyes de oro de los productos obtenidos para el ángulo de inclinación de 20° y diferentes tiempos de lavado.	62
Figura 21. Micrografías SEM de los aglomerados disgregados mediante el lavado durante 120 minutos a) 100x b) 500x	63
Figura 22. Micrografías SEM a 100 X de los productos de concentración en Mesa Wifley. a) Concentrado, b) Mixtos, c) Colas.	64
Figura 23. Difractogramas de rayos x de los productos de concentración en mesa Wilfley	65
Figura 24. Productos obtenidos por medio de flotación inversa a diferentes valores de pH. a) pH 7; b) pH 9; c) pH 11.	66
Figura 25. Porcentajes de recuperación de oro en los productos de flotación para los diferentes pHs.	68

Figura 26. Micrografía SEM de los productos de flotación para la muestra ensayada con pH 11 a) Concentrado a 100x, b) Concentrado a 500x, c) Colas a 100x d) Colas a 500x.....68

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA MINERAL REINA DE ORO....	79
ANEXO B. FOTOGRAFÍA TOMADA DE LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO UTILIZANDO COMO SUSTRATO a) ACEITE CRUDO DE SOYA, b) AGUA.....	80
ANEXO C. FOTOGRAFIA DEL LAVADO DE LOS AGLOMERADOS CARGADOS EN LA SOLUCIÓN DE DETERGENTE A 70°C	80

RESUMEN

TÍTULO: IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS ALTERNATIVAS A LA TOSTACIÓN DE LOS AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO MEDIANTE EL PROCESO CGA*.

AUTORES: PEÑALOZA TARAZONA, Lizeth Nathalia; OLARTE PINEDA, Brandon Yesid**.

PALABRAS CLAVES: Proceso CGA, Refracteriedad, Mesa Wilfley, Flotación.

DESCRIPCIÓN: En la actualidad, el daño ambiental generado por la minería del oro ha aumentado a gran velocidad; es por ello que diariamente se buscan métodos alternativos a los tradicionales (cianuración), para la recuperación del oro, los cuales disminuyan la contaminación que producen en sus desechos. Es así como surge el proceso CGA (Coal gold Agglomeration), el cual se basa en las propiedades fisicoquímicas de las partículas de oro, estas son atrapadas por los aglomerados de carbón- aceite. Luego, para recuperar el oro de los aglomerados, es necesario calcinarlos. Esta última parte es su principal limitante, debido a que se producen gases de combustión. Por ende se busca implementar nuevas técnicas que permitan separar el oro de los aglomerados, evitando, la incineración de ellos y disminuyendo potencialmente el daño que pueda ocasionarse con esta técnica. En el presente proyecto se utilizó un carbón Bituminoso Alto Volátil Tipo A, aceite crudo de soya y un mineral concentrado de la mina Reina de Oro al cual se le determinó su refracteriedad, composición química y mineralógica. A partir de esto se realizó un estudio preliminar de las variables del proceso CGA de las etapas de formación de los aglomerados y recuperación de oro, con el fin de determinar las mejores condiciones de trabajo. Seguido a esto se disgregaron los aglomerados en diferentes soluciones desengrasantes por medio de lavados bajo agitación magnética. Posterior a ello se implementaron las técnicas de Mesa Wilfley y Flotación, para la primera, se alcanzó una recuperación de oro del 87,23% para un lavado a 120 minutos, mientras que para flotación alrededor del 57%, además beneficia la re-aglomeración entre el carbón y el mineral. Por ende se concluye que, el uso de fuerzas alternantes, como los usados en la mesa Wilfley, permite separar el mineral enriquecido de oro del carbón.

***Trabajo de grado**

****Facultad de Ingenierías Fisicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los materiales. Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta.**

ABSTRACT

TITLE: IMPLEMENTATION OF ALTERNATIVE TECHNIQUES TO ROASTING OF COAL-OIL AGGLOMERATES FOR THE GOLD RECOVERY BY CGA PROCESS*.

AUTHORS: PEÑALOZA TARAZONA, Lizeth Nathalia; OLARTE PINEDA, Brandon Yesid**.

KEY WORKS: CGA process, refractory, wilfley table, flotation.

DESCRIPTION: At present, the environmental damage generated by gold mining has increased a great velocity; that is why daily are searched alternative methods to traditional (cyanide), for the recovery of gold, to reduce the contamination produced for them. Thus arises the CGA (Coal Gold Agglomeration) process, which is based on the physicochemical properties of gold particles, these are trapped by coal-oil agglomerates. Then, to gold recovery of agglomerates, it is necessary calcine. This part is the principal limiting, because combustion gases are produced. Thus, it is searched to implement new techniques to separate the gold from the agglomerates, avoiding, and their incineration. In this project was used a high volatile bituminous coal type A , a crude oil of soya and a concentrate mineral from mine "Reina de oro", which it determines the refractory, chemical and mineralogical composition. From this, was done a study preliminary of the CGA process variables in the stages of agglomerates formation and gold recovery, to determinate the best condition to work. After this, the agglomerates are break up into different degreasing solutions by magnetic agitation. After this, were implemented the Wilfley table and flotation techniques, for the first ,gold recovery reached 87.23% for 120 of washing while flotation about 57% also led to the re-agglomeration between mineral and coal so we chose to discard. Therefore it is conclude that use of alternating forces, as used in Wilfley table, it allows separate the gold mineral enriched from coal.

*Research Work

**Physicochemical Engineering Faculty. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta.

INTRODUCCIÓN.

Durante los últimos años, el concepto de impacto ambiental ha tomado gran importancia a nivel mundial, ya que hace referencia a la alteración del medio ambiente por efecto del continuo avance en la industria. Por tanto, se genera un incremento en el deterioro ambiental debido a los diferentes residuos consecuentes de los procesos utilizados para dicho desarrollo. Un ejemplo claro es la minería y junto a ella el alto grado de contaminación que se produce debido a los vertimientos de residuos tóxicos en fuentes hídricas, generando efectos nocivos sobre el aire y los suelos [1].

Recientemente, en Colombia se ha dado un fenómeno conocido como "la fiebre minera", que hace referencia al interés que ha surgido frente a la extracción de diferentes minerales, principalmente los que contienen metales preciosos como el oro [2]. Sí bien esto favorece la economía del país, ya que ciertos sectores se ven beneficiados de dicha actividad, también causa un gran perjuicio al medio ambiente, puesto que los métodos de extracción de oro involucran los procesos de cianuración y amalgamación, los cuales generan gran cantidad de residuos tóxicos con altos contenidos de cianuro y mercurio que no son tratados debidamente después de cada proceso [3].

Por esta razón, es importante la búsqueda de métodos alternativos de recuperación de oro, con menor impacto ambiental que los ocasionados por los procesos tradicionales. En este sentido, dos reconocidos investigadores a nivel mundial, sobre metalurgia extractiva, Hilson y Monhemius [4], llevaron a cabo un completo análisis de los procesos extractivos propuestos hasta la fecha, seleccionando las cinco alternativas más promisorias, teniendo en cuenta los criterios de economía, eficiencia, toxicidad y potencialidad para su aplicación a gran escala, siendo estas: lixiviación con tiourea, tiocianato, tiosulfato y haluros, y

finalmente la recuperación de oro con aglomerados de carbón y aceite, o proceso CGA, por sus siglas en inglés (Coal Gold Agglomeration). Este último proceso fue el seleccionado para la presente investigación, dado que es un método no lixiviante, en el cual se minimiza el uso de reactivos químicos tóxicos [5], lo que lo hace muy atractivo desde un punto de vista ambiental.

El proceso CGA se basa en las propiedades fisicoquímicas de superficies, especialmente las propiedades hidrofóbicas y oleofílicas de las partículas de oro, en donde los aglomerados de carbón-aceite se ponen en contacto con una pulpa el oro para que este último se adhiera a la superficie de los primeros. Después de cargados los aglomerados, surge la necesidad de separar o recuperar las partículas de oro. Por esta razón, es necesario quemar el carbón y fundir las cenizas que quedan como resultado de dicha quema, para así obtener el botón de oro. Pero, como resultado de la quema del carbón, se generan gases de combustión como CO_2 y CO , que conllevan a otra forma de contaminación ambiental. Esta nueva problemática ocasionada por la calcinación de los aglomerados constituye una limitante para viabilizar el proceso a gran escala, dado que se estaría reemplazando la contaminación de aguas por la del aire.

Es por esto, que el propósito de este proyecto de grado es buscar nuevas técnicas que separen el oro de los aglomerados, con la finalidad de evitar su incineración. Así pues, los métodos metalúrgicos de concentración gravimétrica y aquellos que utilizan las propiedades fisicoquímicas para la separación de diferentes especies podrían ser la respuesta al problema antes mencionado.

1. OBJETIVOS.

1.1. OBJETIVO GENERAL.

Implementar técnicas alternativas a la tostación de los aglomerados carbón-aceite para la recuperación de oro mediante el proceso CGA.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar las materias primas (mineral, carbón y aceite) para evaluar sus propiedades físicas y químicas.
- Evaluar las etapas de aglomeración carbón-aceite y recuperación de oro del proceso CGA para determinar las condiciones de trabajo en la etapa de concentración.
- Evaluar la eficiencia de cada una de las técnicas alternativas implementadas en la concentración del oro presente en los aglomerados carbón-aceite.

2. MARCO TEÓRICO

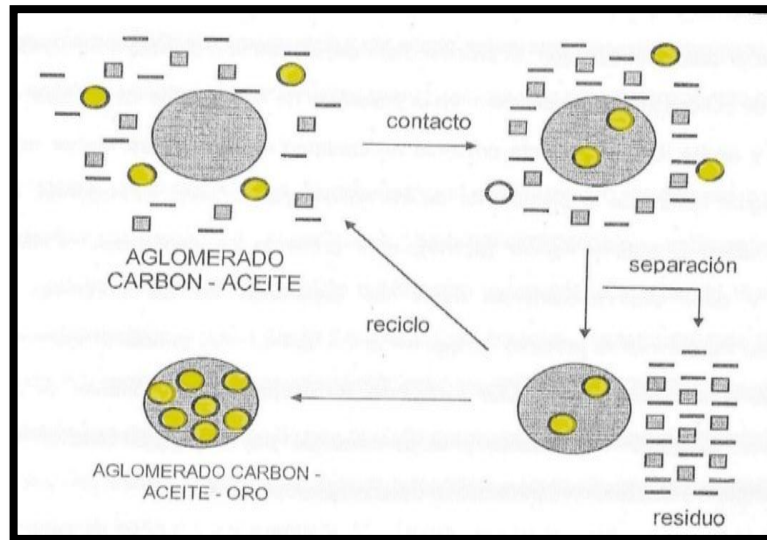
2.1. PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN (PROCESO CGA).

La búsqueda de tecnologías limpias para la extracción del oro ha venido tomando gran fuerza en los últimos años, es por esto que el uso del proceso de recuperación de partículas de oro con aglomerados de carbón aceite vincula una forma viable para obtener oro sin afectar drásticamente el ambiente [5].

Este método de beneficio de minerales llegó a conocerse en la industria minera alrededor de los años 80 surgiendo principalmente como alternativa de recuperación, para así, evitar el uso de la cianuración y amalgamación en el proceso de obtención del oro [6].

El proceso CGA (coal-gold agglomeration) como se conoce por sus siglas en inglés, usa como principio básico la fisicoquímica de superficies, centrándose en las características hidrofóbicas y oleofílicas de las partículas de oro. El proceso inicia cuando los aglomerados de carbón se ponen en contacto con la pulpa mineral que contiene las partículas de oro a extraer, estas últimas se adhieren a la superficie del carbón luego de una continua agitación hasta el punto en donde los aglomerados quedan lo suficientemente cargados de oro [7][8]. En la Figura 1 se esquematiza cómo funciona el proceso CGA

Figura 1. Esquema del proceso de recuperación de partículas de oro con aglomerados carbón-aceite.



Fuente: Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite. [9]

2.1.1. Etapas del proceso CGA. A continuación se citan las tres etapas principales del proceso.

2.1.1.1. Formación de los aglomerados carbón aceite. La aglomeración esférica es una técnica de unión de partículas en un medio con dos líquidos inmiscibles, para el caso del proceso CGA se usa agua y aceite, en donde uno de ellos actúa como medio continuo (agua) y el otro como líquido de unión (aceite) [8].

El enlazamiento de las partículas se genera por agitación de la suspensión; el grado de agitación y la cantidad de puentes líquidos son los parámetros más importantes de esta etapa, aunque no son los únicos parámetros que influyen en este proceso [8].

Las variables operacionales más influyentes en esta etapa según E.M.Córdoba [8] son: El tipo de carbón, puesto que cada carbón presenta un tipo de propiedades fisicoquímicas diferentes, lo cual puede interferir en la adherencia de las partículas de oro a su superficie, siendo recomendable el uso de carbones con alto porcentaje de carbono fijo [10]. Otro parámetro importante es el tipo de aceite, debido a que no todos tienen buenas propiedades aglomerantes, las cuales están ligadas al largo de la cadena del átomos de carbono, siendo para ello recomendable el uso de aceites sin refinamiento de alta viscosidad y con cadenas de átomos de carbono largas, como los aceites vegetales crudos[8][11]. Por otro lado, cabe resaltar que variables como el porcentaje de sólidos en la pulpa, la relación aceite carbón, el tiempo de aglomeración y la velocidad de agitación influyen de manera significativa en la forma, tamaño y resistencia de los aglomerados. Así pues E.M Córdoba [8] concluyó en su investigación que las mejores condiciones para formar aglomerados son: 10% de sólidos en pulpa; 30% relación en peso aceite-carbón, 2000 rpm como velocidad de agitación y 10 minuto como tiempo de aglomeración.

2.1.1.2. Contactación entre los aglomerados carbón-aceite y la pulpa mineral. La etapa de contactación consiste en mezclar los aglomerados previamente formados con la pulpa del mineral aurífero. Esta mezcla se agita por un tiempo determinado para que así las partículas de oro se adhieran a la superficie del carbón. Las variables más importantes en esta segunda etapa son: % Sólidos en pulpa, cantidad de acondicionante, tiempo de acondicionamiento, relación en peso aglomerados-mineral, tiempo de contactación.

En primera medida los colectores mejoran las propiedades superficiales de las partículas de oro. X.Q. Wu y colaboradores [12] concluyeron que en la etapa de contactación, la vinculación de colectores mejoraba la eficiencia del proceso y variaba según la cantidad agregada y el tiempo de acondicionamiento con el mineral. Por otro lado E.M Córdoba [8] concluyó que los mejores resultados para

la etapa de contactación entre los aglomerados y el mineral varían según el tipo de mineral, para el caso de minerales con contenido de sulfuros el tamaño apropiado para los aglomerados debe ser de 2 mm, debido a que dicho tamaño aumenta el área superficial de estos para así facilitar la adherencia de las partículas de pirita en su superficie. Por otra parte la relación adecuada en peso de los aglomerados y el mineral debe ser 0,8, el porcentaje de sólidos en pulpa no debe superar el 20% puesto que afecta directamente la recuperación al no permitir un buen contacto entre los aglomerados y el mineral. El tiempo recomendable de acondicionamiento y contactación deben ser 5 y 45 minutos respectivamente y la cantidad de colector debe ser 0,5 Kg de colector por tonelada mineral, esto con la finalidad de mejorar sus propiedades superficiales.

2.1.1.3. Calcinación de los aglomerados cargados con oro. La última etapa consiste en la calcinación de los aglomerados cargados con oro y la fusión de las cenizas resultantes de la calcinación.

Como se mencionó anteriormente, la quema de los aglomerados trae consigo afecciones ambientales debido a los gases liberados durante la combustión del carbón. Es por ello que es preciso implementar técnicas que no vinculen la quema del carbón manteniendo una buena eficiencia en el proceso.

2.1.2. Ventajas del proceso CGA. El proceso CGA tiene como característica principal la capacidad de recuperar partículas finas y gruesas. La eficiencia es muy alta, con resultados de obtención de recuperación de oro hasta del 100% para el oro libre [13][14] y además muestra una gran ventaja frente a otros procesos de recuperación, como por ejemplo el de amalgamación, ya que la toxicidad de sus residuos es mucho menor. Otra ventaja es que la cantidad de reactivos utilizados en el proceso es más baja lo cual disminuye los costos en comparación con otras

técnicas de recuperación de oro y además de ello disminuye el daño ambiental [6][9].

2.1.3. Limitaciones del proceso CGA. La principal limitante es el proceso se considera eficiente solo para extraer el oro libre y no el asociado a los diferentes minerales presentes en las menas.

Por otro lado, aunque técnicamente este método es ambientalmente más amigable que la cianuración y la amalgamación, durante la etapa de calcinación de los aglomerados cargados se genera gases de combustión como CO_2 y CO , los cuales constituyen un nuevo problema de contaminación ambiental, en este caso del aire, poniendo entre dicho la posición del proceso como una tecnología verdaderamente limpia [8].

Una forma de evitar la quema del aglomerado de carbón-aceite es lograr la implementación de métodos de limpieza de carbones, como la flotación, o también métodos de concentración de minerales como los gravimétricos para la separación de los aglomerados. Tal hipótesis tiene su base en las diferencias físicas y químicas del oro y el carbón. A continuación se discuten algunos de los métodos que podrían emplearse para separar las partículas de oro de los aglomerados.

2.2. POSIBLES TECNICAS DE SEPARACIÓN CARBÓN-MINERAL.

La hipótesis de que es posible recuperar el oro cargado de los aglomerados tiene su origen en las diferencias de las propiedades físicas y físico químicas entre el carbón y el mineral aurífero (oro). Teniendo en cuenta que la densidad del carbón es de aproximadamente 0,51g/cc, mientras que la del oro es 19,32 g/cc (o 5,11 g/cc para la pirita, mineral con el que comúnmente se asocia el oro), se plantea en

primer lugar, que es posible la separación de oro (o pirita-oro) del carbón mediante técnicas de concentración gravimétrica, tal como la mesa Wilfley.

Un parámetro normalmente aceptado para predecir si es posible separar eficientemente dos minerales mediante el proceso de concentración gravimétrica es el “Criterio de concentración”, C_c , definido por la siguiente ecuación [15]:

$$C_c = \frac{(\text{densidad partícula pesada} - \text{densidad fluido})}{(\text{densidad partícula liviana} - \text{densidad del fluido})} \quad (1)$$

Se considera que para que haya una separación eficiente de las dos especies el valor de C_c debe ser mayor o igual a 2,5, para valores menores de C_c la eficiencia de separación depende del tamaño de partículas [15].

Por otro lado y teniendo en cuenta que los dos materiales a separar tienen propiedades fisicoquímicas distintas, además de la facilidad con que flota el carbón [11], se propone implementar técnicas de lavado de carbones como la flotación, con la cual se eliminan las impurezas presentes en ellos, tales como la pirita.

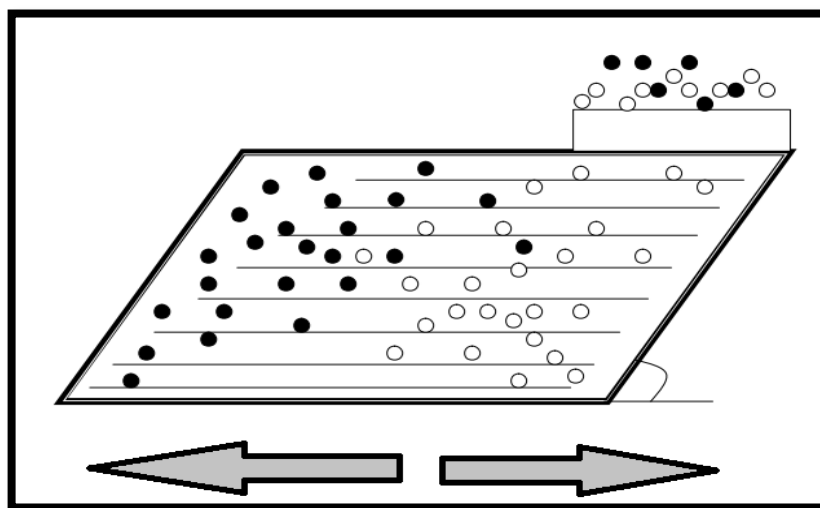
A continuación se presentan algunos conceptos básicos de los procesos de concentración en mesa Wilfley y de lavado de carbones por flotación espumante.

2.2.1. Concentración gravimétrica por mesa Wilfley. Los métodos de concentración gravimétrica se usan para procesar diferentes tipos de minerales, en donde su principal fundamento es la diferencia de densidades [16]. Para ello, se utilizan fuerzas vibratorias alternadas que actúan sobre las partículas y hacen que ellas describan trayectorias diferentes según su peso específico.

La Figura 2 esquematiza el proceso de separación por mesa Wilfley, en donde las partículas comienzan a desplazarse por efecto de un fluido que surca al equipo y las vibraciones alternadas producidas por este, así pues las partículas más livianas sufren mayor efecto por los movimientos depositándose en los lugares más lejanos y por lo contrario las más pesadas en lugares más cercanos [16]. Por ende se pueden separar las partículas ligeras de las pesadas. Esta separación es debida a la velocidad experimentada por cada una de las partículas debido a su densidad y tamaño.

Esta técnica de concentración está influenciada por diferentes variables ya sean de diseño u operación. Las variables de diseño están compuestas por el material de fabricación de la superficie de la mesa, la geometría, forma y distribución de los rifles, la velocidad y aceleración de sacudida.

Figura 2. Esquema del proceso de separación por corrientes longitudinales (Mesa Wilfley).



Fuente: Evaluación de los procesos de concentración [17].

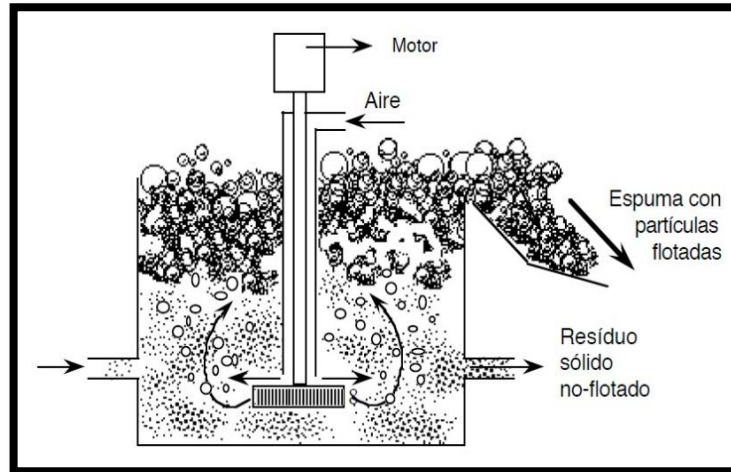
Por otro lado, variables operacionales como el ángulo de inclinación influyen el enriquecimiento del concentrado, debido a que se ve afectado por la diferencia de peso o tamaño de partículas, siendo recomendable un ángulo elevado para partículas de tamaños o pesos disímiles. Otro aspecto importante es el flujo laminar de agua, un mal control de este parámetro puede producir un arrastre excesivo de las partículas livianas como las pesadas causando una mala distribución en los productos de concentración [18].

Es importante resaltar que este proceso de concentración tiene gran eficiencia cuando el tamaño medio de las partículas más densas es menor al de las partículas livianas.

2.2.2. Flotación de carbones. La flotación espumante es un proceso físico-químico cuyo objetivo es la separación de especies minerales valiosas de las no valiosas aprovechando las diferencias en las propiedades superficiales de las partículas, de esta forma, las partículas hidrofóbicas se adhieren a las burbujas de aire y se separan mediante espuma [11] [19].

La técnica de flotación espumante es una de las técnicas más usada para la limpieza de carbones, la cual busca remover materiales que no son combustibles, como cenizas e impurezas, aprovechando para ello la facilidad con que el carbón puede ser flotado. Un esquema básico de un proceso flotación se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Esquema del proceso de flotación.



Fuente: Flotación. [20]

Para que se pueda separar la fase inorgánica (sulfuros y otros), es necesario agregar un reactivo espumante, cuyo objetivo es la formación de burbujas mediante inyección de aire a la celda, generalmente se flota el carbón y el material inorgánico queda incorporado en la celda [19].

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.

A continuación se describe la metodología experimental utilizada para el desarrollo del presente proyecto de grado.

3.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

3.1.1. Caracterización del mineral. Para la realización de este proyecto de grado se utilizó un mineral aurífero concentrado proveniente de la mina Reina de Oro del municipio de Vetas (Santander).

3.1.1.1. Molienda y análisis granulométrico. Para la determinación de la distribución granulométrica inicial del mineral, se tomó una muestra representativa de 500 gramos por el método cono y cuarteo, la cual se tamizó con ayuda de la serie de tamices Tyler con número de mallas 20, 35, 50, 70, 100, 120, 140, 170, 230, 270 y 325, por un tiempo de 22 minutos usando un Ro-tap. Posteriormente, las muestras retenidas en cada uno de los tamices fueron pesadas y a partir de ellos se realizaron los cálculos respectivos de la distribución granulométrica. La distribución granulométrica del mineral se ajustó por medio de molienda hasta obtener un D50 aproximado a 100 micras.

3.1.1.2. Caracterización química y mineralógica. Las leyes de oro y plata en el mineral se determinaron por el método de ensayo al fuego [21].

Mediante la técnica de espectrometría de fluorescencia de rayos X de energía dispersa (FRX), se determinó la composición elemental del mineral, a través del espectrofotómetro de fluorescencia de rayos X marca BRUKER modelo S8 TIGER. Las fases cristalinas presentes en el mineral se determinaron con ayuda de la técnica de difracción de rayos X (DRX), por medio del difractómetro de polvo

marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci. Como técnica complementaria para la caracterización mineralógica se utilizó microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopía de dispersión de energía de rayos x (EDS) empleando un microscopio marca QUANTA FEG 650 Y JMS 7600F.

3.1.1.3. Lixiviación diagnóstico. Con el objetivo de conocer los tipos de minerales con los que estaba asociado el oro en la mena y evaluar su carácter refractario, se realizó una serie de cianuraciones y ataques ácidos para disolver selectivamente los minerales que atrapan las partículas de oro. Tal procedimiento exige conocer las especies minerales presentes en la muestra, información obtenida por DRX. Con dicha información (Ver tabla 2), se determinó, en primera instancia, por medio de una cianuración inicial la cantidad de oro libre presente. Seguido de esto se aplicaron una serie de lixiviaciones con ácido sulfúrico y ácido nítrico y posterior a cada ataque se hizo una cianuración para determinar la cantidad de oro que fueron liberados en cada etapa. Luego de esto, se determinó mediante ensayo al fuego de las colas la cantidad de oro presente en la sílice y silicatos.

3.1.1.4. Cianuración en botella. Esta prueba se realizó con la finalidad de evaluar el grado de lixivabilidad o refractariedad del mineral utilizado en el desarrollo del proyecto. Para este ensayo se mantuvo bajo rotación suave una pulpa mineral cianurada contenida en una botella de 2,5L, por un tiempo de 96 horas. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- Cantidad de mineral= 500 g
- Granulometría = D80 malla Tyler 200
- pH= 10 – 11 (Ajustado con cal)
- Concentración de cianuro = 1 g/L
- Volumen de solución= 1 litro

3.1.1.5. Cianuración por agitación mecánica. El ensayo de cianuración por agitación se realizó con la finalidad de determinar el grado máximo de disolución de oro por cianuración, bajo fuertes condiciones de agitación mecánica. Las condiciones de trabajo fueron las siguientes:

- Cantidad de mineral = 500 g
- Granulometría = D80 malla Tyler 200
- pH = 10 – 11 (Ajustado con cal)
- Concentración de cianuro = 1 g/L
- Velocidad de agitación = 800 rpm
- % Sólidos = 35

La cinética de lixiviación fue obtenida mediante la toma y análisis de alícuotas de 20 ml a diferentes tiempos. La concentración de oro disuelto en el mineral se determinó por la técnica de espectroscopia de absorción atómica.

3.1.2. Caracterización del carbón. Para la realización de este proyecto de grado se utilizó un carbón mineral proveniente del municipio de Pamplonita, Norte de Santander.

3.1.2.1. Trituración, molienda y análisis granulométrico. El carbón usado fue sometido a un proceso de trituración y molienda con el fin de reducir su tamaño. Para esta etapa de conminución se utilizó una trituradora de mandíbula y molinos de disco y de bolas. La distribución granulométrica se obtuvo con la misma serie de tamices utilizada para la caracterización del mineral (Ver apartado 3.1.1.1.), obteniéndose un D50 aproximadamente de 170 micras.

3.1.2.2. Análisis próximo del carbón. Esta etapa se desarrolló en base a la norma ASTM D-388 [22] y estuvo compuesta por las siguientes pruebas: determinación

de la humedad, porcentaje de ceniza, materia volátil, índice de hinchamiento, poder calorífico y azufre total, realizado bajo las normas ASTM D3173 – 11, D3174 – 12, D 3175 -11, D 720-91, D3286-96 y D3177-02, respectivamente. Para estos análisis se tomó, por el método de cono y cuarteo, una muestra representativa de un gramo de carbón con granulometría de 100% pasante la malla Tyler 100. Cada ensayo se realizó por triplicado.

3.1.2.3. Ángulo de contacto. Esta prueba se realizó con la ayuda del sistema de medición de ángulo de contacto basado en video Dataphysycs OCA 15 EC del laboratorio de electroquímica ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará, con el objetivo de conocer el nivel de mojabilidad que presentaba el aceite al entrar en contacto con el carbón seleccionado para el estudio del proceso CGA.

3.1.3. Caracterización del aceite crudo de soya. Para la formación de aglomerados de carbón se utilizó como líquido aglomerante el aceite crudo de soya obtenido por medio de la empresa Santandereana de Aceites S.A.

3.1.3.1. Densidad. La densidad del aceite se determinó con ayuda de un picnómetro de 50 ml de capacidad. Consistió en primera instancia en la medición de masa del picnómetro vacío, completamente limpio y seco. A partir de esto, se agregó agua dentro del picnómetro teniendo la precaución que su superficie exterior quede completamente libre de humedad para garantizar exactitud en los resultados y se pesó. Enseguida se vació completamente el picnómetro y se dejó secar para que el peso inicial del picnómetro no variara. Luego se agregó el aceite en el picnómetro y se tomó el peso y a través de los cálculos respectivos se determinó el valor de densidad. Este procedimiento se realizó tres veces para obtener un promedio de la densidad del aceite crudo de soya.

3.1.3.2. Viscosidad. La prueba de viscosidad se realizó en la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad Industrial de Santander, mediante un viscosímetro Brookfield RV de cilindro rotatorio.

3.2. ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DEL PROCESO CGA

3.2.1. Preparación de los aglomerados carbón-aceite. Esta etapa del proyecto consistió en la formación de aglomerados carbón-aceite, la cual se fundamentó en el análisis del efecto de una variable (velocidad de agitación) sobre la respuesta al tamaño de aglomerados que esta daba, conservando el resto de parámetros constantes.

El procedimiento experimental desarrollado consistió en primera medida en la formación de una emulsión agua-aceite mediante agitación mecánica y simultáneamente se mezcló el carbón con dicha emulsión, dando como resultado los aglomerados que luego se separaron con ayuda de un tamiz.

3.2.2. Recuperación de oro a partir del contacto pulpa mineral-aglomerados. Esta etapa se basó en pruebas preliminares para conocer la respuesta de recuperación de oro por medio de una pulpa mineral-agua en contacto con los aglomerados carbón-aceite previamente formados en el paso anterior, mediante el análisis del efecto de una serie de variables de gran influencia en el proceso de contactación (cantidad de acondicionante, velocidad de contactación, tamaño de aglomerados).

El procedimiento utilizado consistió en primera instancia en la formación de una pulpa homogénea a partir de la adición del mineral a un volumen designado de agua, la cual se puso en contacto con el colector (PROMOTOR AEROFLOAT 208 Acuoso), con el fin de aumentar la hidrofobicidad del oro mediante agitación

mecánica por un tiempo establecido de contactación. Seguido a esto, la pulpa acondicionada fue puesta en contacto con los aglomerados de carbón-aceite, con el objetivo de que las partículas de oro se adhieran a la superficie de estos. Al terminar cada prueba, se separaron los aglomerados cargados de oro de las colas mediante tamizaje y fueron secados a 120°C durante una hora con el fin de eliminar la humedad presente en ellos, para luego ser calcinados por 4 horas en una mufla a una temperatura de 800°C. Las cenizas resultantes de los aglomerados, así como las colas minerales fueron sometidas a ensayo al fuego para determinar la recuperación de oro del proceso.

3.3. SEPARACIÓN DEL ORO DE LOS AGLOMERADOS CARBÓN-ACEITE

La última etapa experimental del proyecto consistió en la evaluación de los métodos de beneficios de minerales, concentración gravimétrica y por flotación, para la recuperación cargado en los aglomerados carbón- aceite como alternativas a la etapa de calcinación de los aglomerados y fusión de las cenizas.

3.3.1. Disgregación de los aglomerados cargados con oro.

3.3.1.1. Evaluación de la capacidad de varios desengrasantes para disgregar los aglomerados. Con la finalidad de remover el aceite de los aglomerados, se procedió a disgregarlos en diferentes soluciones, bajo agitación magnética.

El procedimiento experimental consistió en el uso de una base de 50 gramos de aglomerados cargados con oro y 200 mL de la respectiva solución desengrasante. Los medios desengrasantes evaluados fueron: agua a temperatura ambiente, agua a 50°C, alcohol, detergente, talcos, acetona y bicarbonato. Las pulpas de aglomerados-solución desengrasantes se agitaron magnéticamente por un tiempo de 20 minutos. Pasado tal tiempo, se observó si se producía alguna separación de

fases entre el carbón y el mineral. A partir de esto y usando inspección visual se escogieron los mejores resultados para un posterior estudio.

3.3.1.2. Selección del desengrasante y ajuste de las condiciones de disgregación de los aglomerados. Con base a la anterior actividad se escogió como medio desengrasante la solución de detergente y agua a 50°C y a partir de ello, se hicieron algunas variaciones con la finalidad de mejorar el grado de disgregación de los aglomerados. Así pues, se evaluaron varios tipos de detergentes y varias temperaturas de la solución (25, 50 y 70°C) y a partir de los resultados obtenidos se seleccionó visualmente qué condición presentó mejor separación carbón-mineral.

3.3.2. Separación de las partículas minerales con oro del carbón. Los aglomerados previamente disgregados se sometieron a las siguientes pruebas de concentración, con el fin de recuperar las partículas minerales ricas en oro.

3.3.2.1. Concentración por mesa Wilfley. En primer lugar, se propuso evaluar la técnica de concentración gravimétrica por mesa Wilfley como método separación, con la finalidad de observar el efecto de las fuerzas longitudinales que este método aplica sobre las partículas. Las condiciones de operación fueron constantes, excepto el ángulo de inclinación, variándolo en 10°, 15° y 20°.

Esta etapa se dividió en dos pasos, en la primera se agregó la pulpa obtenida en el lavado de la etapa anterior y se observó el comportamiento a diferentes ángulos. Luego de ello, se estudió el efecto del tiempo de lavado usando tiempos de 20, 60, 120, 240 y 480 minutos, respectivamente, en la recuperación de oro. Los productos de cada ensayo se analizaron por ensayo al fuego para determinar la concentración de oro. Adicionalmente, los productos de concentración se

analizaron por difracción de rayos X y microscopía electrónica de barrido para evaluar la separación de las diferentes fases minerales.

3.3.2.2. Concentración por flotación. Como segundo método de concentración se escogió la flotación, dado que es una de las principales técnicas de lavado de carbones, con la que separan las partículas de sulfuros (como la pirita), presentes en el carbón como impurezas. Teniendo en cuenta la capacidad natural de flotación del carbón, se optó por flotar selectivamente el carbón deprimiendo la pirita rica en oro.

Los ensayos de flotación se llevaron a cabo en una celda DENVER de capacidad de 2 litros, se utilizó 10% de sólidos y como espumante aceite de pino. Además de esto, se usó cal como depresor de la pirita, lo cual varió el pH de la solución. Los productos obtenidos se analizaron por ensayo al fuego y mediante microscopía electrónica de barrido.

4. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Los resultados obtenidos en el proyecto se presentan a continuación siguiendo en orden la metodología descrita anteriormente.

4.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS MATERIAS PRIMAS

4.1.1. Caracterización del mineral

4.1.1.1. Análisis granulométrico. La distribución granulométrica del mineral usado en el proyecto se obtuvo luego de un proceso de molienda previa al mineral inicialmente adquirido, dicha distribución se puede observar en la Figura 4, para el mineral inicial, y, en la Figura 5, para el mineral luego de la molienda. Se puede evidenciar, al comparar las dos figuras, que el mineral usado fue más fino que el inicial, siendo los D50 de 180 μm y 100 μm aproximadamente, antes y después de molienda respectivamente. La finalidad de reducir el tamaño del mineral fue básicamente aumentar el grado de liberación de la pirita para que así fuese más sencillo que el aglomerado de carbón la atrapara en su superficie.

Figura 4. Distribución granulométrica del mineral inicial.

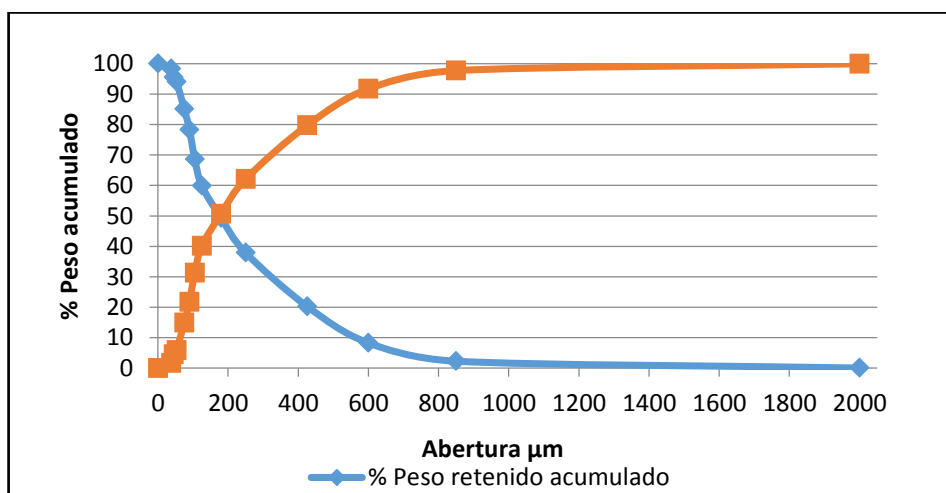
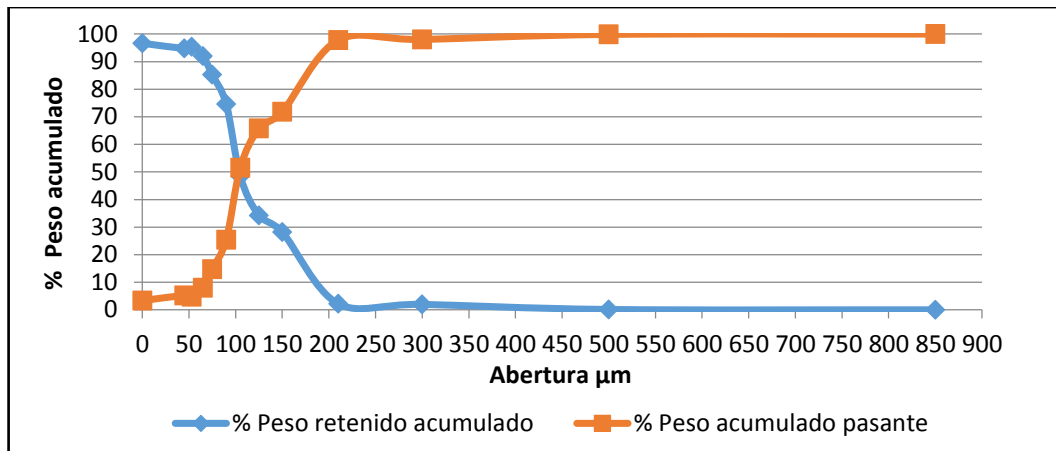


Figura 5. Distribución granulométrica del mineral usado para el desarrollo del proyecto.



4.1.1.2. Caracterización química y mineralógica.

4.1.1.2.1. Caracterización química. El análisis químico por fluorescencia de rayos X se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis químico del mineral usado

Elemento	Si	Fe	S	Al	K	Cu	Mg
Concentración (%)	22,16	10,97	8,31	5,20	3,33	0,03	0,37

Elemento	As	Zr	Ba	Mn	Zn	Pb	P
Concentración (%)	0,12	0,07	0,07	0,06	0,06	0,04	0,03

Elemento	Ni	Sr	Ag	Rb	V	Mo	Y
Concentración (mg/kg)	85	71	68	66	56	37	24

Se resalta la presencia de cobre, azufre, arsénico y cinc los cuales pueden afectar el proceso de cianuración. Por tal motivo se puede indicar que el mineral puede

presentar alguna dificultad en el proceso de lixiviación debido a los elementos cianicidas mencionados [23].

Los tenores de oro y plata obtenidos mediante ensayo al fuego para el mineral estudiado fueron 31,44 g/T y 60,88 g/T, respectivamente.

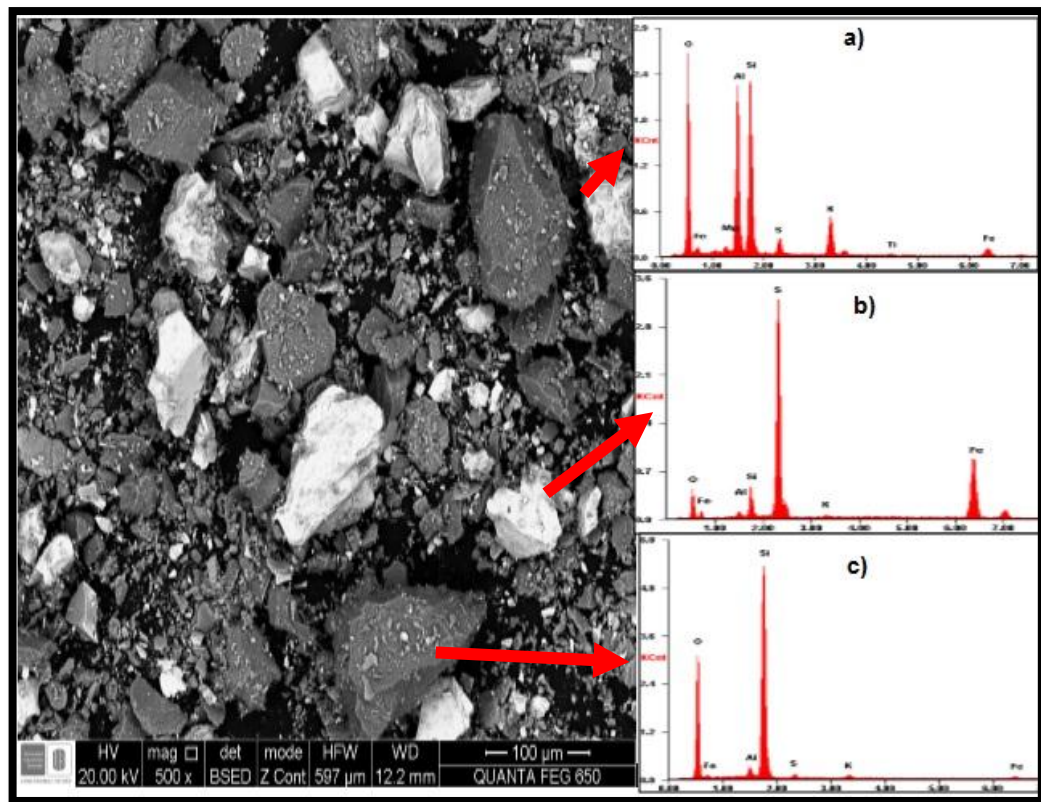
4.1.1.2.2. Caracterización mineralógica. Los resultados obtenidos por la técnica de difracción de rayos X se muestran en la Tabla 2 y el Anexo A. La presencia de pirita es un gran indicativo de que las partículas de oro pueden estar asociadas en la matriz mineralógica de esta especie, dado que esta asociación es frecuente en los minerales filonianos santandereanos.

Tabla 2. Especies cristalinas presentes en el mineral usado

	Fase cristalina	Nombre
Óxidos	SiO ₂	Cuarzo
Sulfuros	FeS ₂	Pirita
Silicatos	KAlSi ₃ O ₈	Ortoclasa
	Na(AlSi ₃ O ₈)	Albita
	KMg ₃ (Si ₃ Al)O ₁₀ (OH) ₂	Flogopita
	KAl ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂	Moscovita

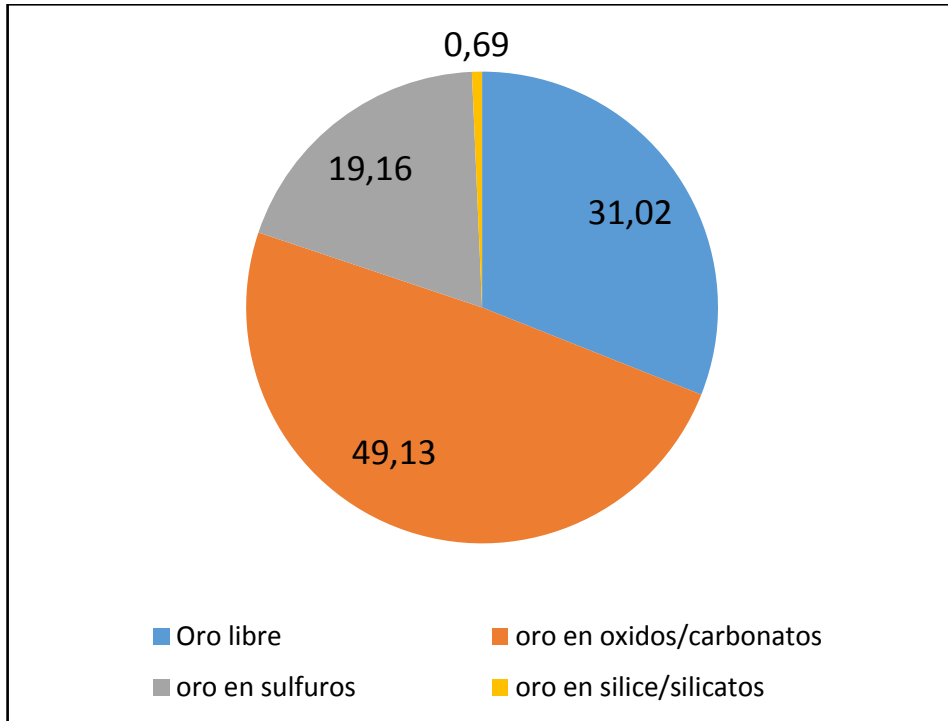
En la Figura 6 se presenta una micrografía obtenida mediante la técnica de SEM, junto con los espectros EDS de algunas partículas, los cuales permiten identificar algunas especies mineralógicas presentes en el mineral y que se diferencian por su tonalidad y brillo. En este sentido, el espectro (a) corresponde a un aluminosilicato (ortoclasa), el espectro (b) a una partícula de pirita y el (c) al Cuarzo.

Figura 6. Micrografía SEM del mineral a 500x y espectros EDS. a) EDS de la Ortoclasa, b) EDS de la Pirita, c) EDS del Cuarzo



4.1.1.3. Lixiviación diagnóstico. La Figura 7 plasma los resultados obtenidos en la prueba de lixiviación diagnóstico, los cuales evidencian las asociaciones minerales del oro y sus proporciones. En primera instancia se resalta la presencia de oro en tres formas: libre (31,02%), asociado a óxidos (49,13%) y a sulfuros (19,16%). A partir de esto se puede deducir que el mineral estudiado no tiene carácter refractario debido a que el mayor porcentaje de oro se encuentra asociados a los óxidos (cuarzo) y en estado libre. A pesar de esto, la presencia de oro en sulfuros (pirita) dificulta medianamente la disolución del oro en presencia de cianuro durante el proceso de lixiviación.

Figura 7. Porcentaje de oro asociado con los diferentes compuestos presentes en el mineral.



4.1.1.4. Cianuración en botella. La Figura 8 representa el comportamiento cinético del mineral en el ensayo de cianuración en botella. La disolución máxima de oro alcanzada fue de 78,36%. Tomando como referencia la clasificación de los minerales auríferos propuesta por La Brooy [24] y que se plasma en la Tabla 3, el mineral estudiado se clasifica como “medianamente lixiviable”; esto es debido a que cerca del 20% del oro está asociado a la pirita, especie sulfurosa que dificulta la disolución y la presencia de cianicidas como cobre, zinc, azufre, entre otros.

Figura 8. Curva cinética del ensayo de cianuración en botella del mineral

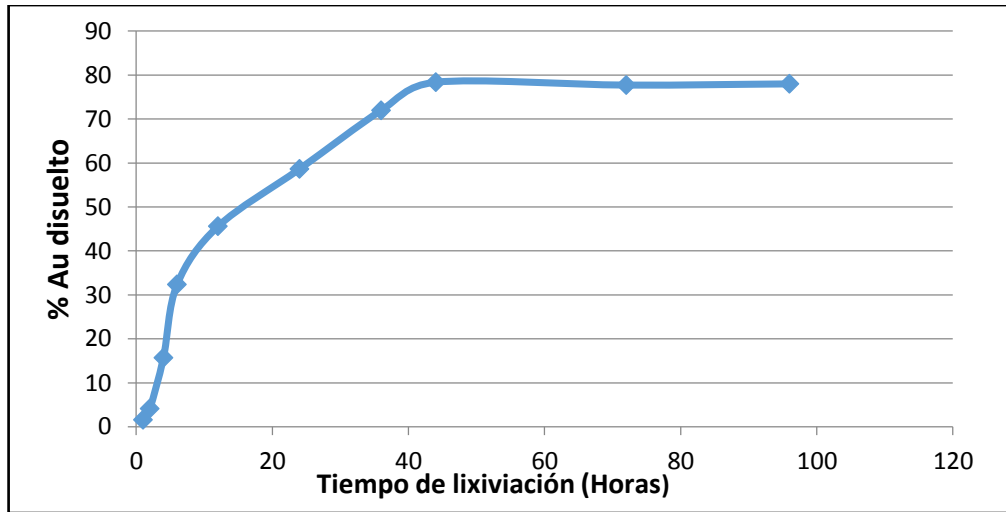


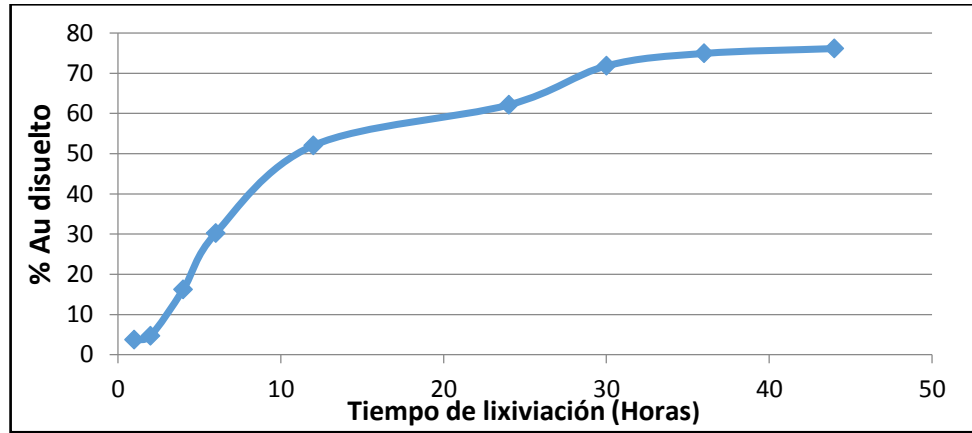
Tabla 3. Grado de lixivabilidad de los minerales auríferos

Oro disuelto (%)	Grado de lixivabilidad
<65%	Difícilmente lixiviable
65-85%	Medianamente lixiviable
>85%	Altamente lixiviable

Fuente: S.R. La Brooy et al. Review of gold extraction from ores. 1994 [24].

4.1.1.5. Cianuración por agitación mecánica. La Figura 9 representa la curva cinética de disolución de oro en el ensayo de cianuración por agitación mecánica. Para un tiempo de 36 horas se logró obtener el porcentaje de disolución máxima de oro (76,14%), valor muy similar al obtenido en la prueba de cianuración en botella, evidenciando concordancia en el comportamiento cinético en la prueba, en el cual la disolución del oro se obtiene a una velocidad mediana debido a la asociación de una parte del oro a especies sulfurosas (pirita) y a los cianicidas.

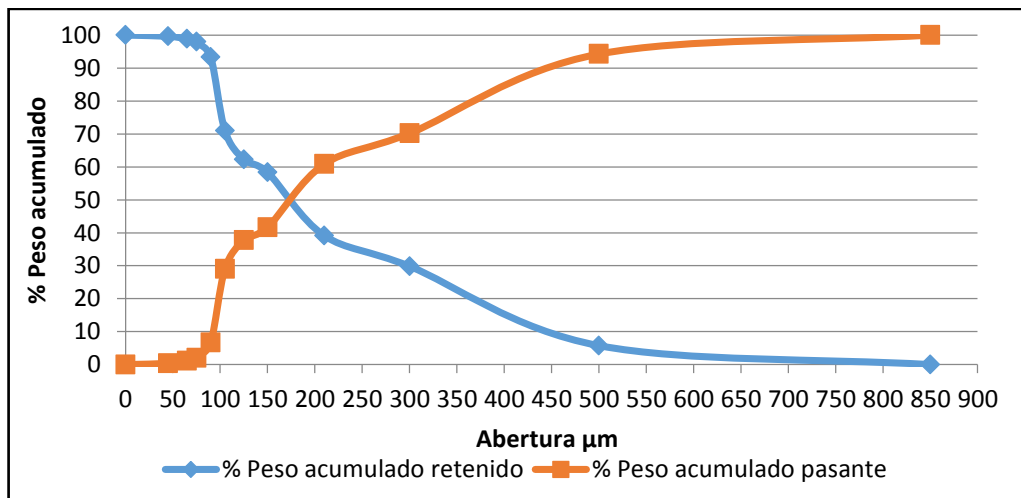
Figura 9. Curva de cianuración del mineral por agitación mecánica.



4.1.2. Caracterización del carbón

4.1.2.1. Análisis granulométrico. Después de la conminución del carbón por trituración y molienda, se obtuvo una distribución granulométrica con un D50 de 170 μm (ver Figura 10).

Figura 10. Distribución granulométrica del carbón luego de su conminución.



Al observar la Figura 10 y compararla con la distribución granulométrica del mineral (Figura 5), se evidenció que el tamaño de partícula del carbón era más grueso que el del mineral, lo cual debería facilitar que las partículas de oro se adhieran a la superficie del carbón en el proceso de contactación del proceso CGA.

4.1.2.2. Análisis próximo del carbón. A continuación, Tabla 4, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización del carbón usado para el desarrollo experimental del proyecto.

Tabla 4. Análisis próximo del carbón usado

Propiedades	Porcentaje (%)
Humedad	0,79
Cenizas	5,29
Materia volátil	41,46
Azufre	0,36
Carbono fijo	53,31
Índice de hinchamiento	3 1/2
Poder calorífico BTU/Lb	15.265,09

A partir de los resultados obtenidos en cada una de las pruebas realizadas al carbón, este se clasifica como Bituminoso Alto Volátil Tipo A [22].

4.1.2.3. Angulo de contacto. En la Tabla 5 se presentan los valores promedio de 8 medidas de los ángulos de contacto entre el carbón y el aceite crudo de soya (aglomerante) y el agua (medio dispersante. En el Anexo B se muestran las fotografías de las gotas de aceite y de agua sobre el carbón.

Tabla 5. Medidas del ángulo de contacto para el carbón usado.

Sustrato	Ángulo de contacto promedio total(°)
Aceite Crudo de Soya	42,94 ± 0,2
Agua	72,79 ± 0,4

Teniendo en cuenta que el carbón tiende a formar un ángulo de contacto de aproximadamente de 43° con el aceite crudo de soya y de 73° con el agua, se concluye que el carbón tiene características oleofílicas más que hidrofílicas. La alta mojabilidad por el aceite es un factor imprescindible para la formación de los aglomerados carbón-aceite.

4.1.3. Caracterización del aceite

4.1.3.1. Densidad y viscosidad. En la Tabla 6 se presentan los valores promedio de las medidas de densidad y viscosidad del aceite crudo de soya, el cual fue usado como aglomerante del carbón.

Tabla 6. Valores promedio de densidad y viscosidad del aceite crudo de soya

Propiedad	Valor
Densidad	0,9178 (g/mL) ± 0,0032
Viscosidad	55,45 (cP) ± 3,12

Los resultados expuestos anteriormente concuerdan con los datos presentados en la literatura, en donde la densidad del aceite Crudo de Soya está en un rango de 0,915-0,925 y la viscosidad en 55-60 cP. Este valor de viscosidad es elevado lo cual es debido a la presencia de largas cadenas de carbonos que a su vez es causa de la presencia de gran cantidad de ácidos grasos que es común en los Aceite vegetales crudos. Dicho de esto, es de gran ventaja para el proceso de

aglomeración que la viscosidad sea elevada ya que genera mayor fuerza en las uniones de partículas, causando aglomerados más resistentes [25].

4.2. ESTUDIO PRELIMINAR DE LAS VARIABLES DEL PROCESO CGA

Los estudios preliminares de las variables del proceso CGA tenían como principal objetivo encontrar las condiciones de trabajo adecuadas para la obtención de los aglomerados carbón aceite y para la extracción con ellos de las partículas de mineral ricas en oro.

4.2.1. Preparación de los aglomerados carbón-aceite. Teniendo como punto de partida la investigación realizada por E.M. Córdoba [8] y los resultados que obtuvo de esta, se toman las siguientes condiciones iniciales para efectuar la formación de aglomerados carbón-aceite:

- Diámetro recipiente agitación : 20 cm
- Volumen de agua : 500 mL
- Tipo de aceite : Crudo de soya
- % sólidos : 10%
- Relación en peso aceite/carbón : 0,3
- Altura base-hélice : 10 mm
- Tiempo de agitación : 10 min

En esta etapa, la variable de estudio fue la velocidad de agitación, con el fin de obtener aglomerados de diversos tamaños y por tanto, con diferentes áreas superficiales. A continuación, en la Tabla 7, se muestran los resultados de la influencia de la velocidad de agitación sobre el tamaño de los aglomerados.

Tabla 7. Influencia de la velocidad de agitación sobre el tamaño de los aglomerados

Velocidad (rpm)	Tamaño aproximado (mm)
1500	4,7 ± 0,2
1600	4,2 ± 0,1
1700	3 ± 0,2
1800	3,5 ± 0,3
1900	2,2 ± 0,2
2000	2 ± 0,2

Los resultados indican que entre mayor sea la velocidad de agitación menor será el diámetro del aglomerado.

4.2.2. Recuperación de oro a partir del contacto pulpa-aglomerado. Al igual que la etapa de formación de aglomerados y teniendo en cuenta los resultados obtenidos en la misma, se establecieron las siguientes condiciones fijas para la recuperación de oro a partir del contacto entre los aglomerados y la pulpa de mineral:

- Volumen de agua : 250 mL
- Tiempo de acondicionamiento : 10 min
- Relación aglomerados/ mineral : 1,0
- Tipo de colector : Aerofloat 208

Con el fin de obtener una buena recuperación de oro y posteriormente realizar la debida separación, se tomaron como variables las siguientes condiciones con sus respectivos niveles de estudio. Las pruebas se hicieron dejando una condición variable y las otras constantes, luego de ello se escogió la mejor y se procedió a analizar la siguiente variable, así sucesivamente.

- Tamaño de aglomerados : 2mm; 4mm
- Velocidad de contactación : 200 rpm ; 400 rpm; 600rpm; 1200rpm
- Cantidad de acondicionante: 0 μL ; 25 μL ; 50 μL ; 100 μL

4.2.2.1. Tamaño de aglomerados. Para estudiar la influencia de esta variable se trabajó con una velocidad de agitación de 1600 rpm para los aglomerados de 4mm y 2000 rpm para los de 2mm y previo acondicionamiento del mineral con 50 μL .

Los resultados mostrados en la Tabla 8 indican que al disminuir el tamaño de los aglomerados se aumenta la extracción de oro del mineral, lo cual era de esperarse dado que al disminuir el diámetro aumenta el área superficial de los aglomerados disponibles para la adherencia de las partículas de mineral ricas en oro. Estos resultados están en concordancia con los estudios realizados por otros investigadores [8].

Tabla 8. Influencia del tamaño de aglomerados en la recuperación de oro.

Tamaño (mm)	Recuperación de oro (%)
4	53,31
2	71,43

Teniendo en cuenta estos resultados para las siguientes pruebas se trabajó con aglomerados con tamaños de 2mm

4.2.2.2. Velocidad de contactación. Para el estudio de esta segunda variable se utilizaron los aglomerados de 2 mm de diámetro y acondicionamiento del mineral con 50 μL de colector.

Los resultados presentados en la Tabla 9 muestra que al aumentar el grado de agitación lo hace también la recuperación, aunque el exceso de las fuerzas

convectivas de la agitación conlleva a la destrucción de los aglomerados. Por tanto, entre los niveles de velocidad de agitación estudiados se selecciona 600 rpm como el más adecuado.

Tabla 9. Influencia de la velocidad de contactación en la recuperación de oro

Velocidad (rpm)	Recuperación de oro (%)
200	64,91
400	71,43
600	72,35
1200	DESTRUIDOS

4.2.2.3. Cantidad de acondicionante. El objetivo del acondicionamiento del mineral con el colector (aerofloat 208) era el de aumentar el carácter hidrofóbico de las partículas de oro libre y de pirita rica en oro, y favorecer así la recuperación del metal precioso.

Tabla 10. Influencia de la cantidad de acondicionante en la recuperación de oro.

Cantidad de acondicionante(μL)	Recuperación de oro (%)
0	59,36
25	63,13
50	71,43
100	77,65

Tal como lo permite apreciar la tabla 10, el proceso de recuperación se vio beneficiado al aumentar la cantidad de acondicionante llegando a obtenerse recuperaciones del orden del 77,65%.

Teniendo en cuenta los resultados anteriores, se establece que las condiciones adecuadas para la obtención de los aglomerados y la extracción del oro del mineral con ellos son las indicadas en las siguientes tablas.

Tabla 11. Condiciones establecidas para la formación de aglomerados carbón aceite.

Parámetro	Nivel
Diámetro recipiente agitación (mm)	200
Volumen de agua (mL)	500
Tipo de aceite	Crudo de soya
% solidos (Carbón)	10
Relación en peso aceite/carbón	0,3
Altura de la base- hélice (mm)	10
Tiempo de agitación (min)	10
Velocidad de agitación (rpm)	2000
Tamaño de aglomerado (mm)	2

Tabla 12. Condiciones establecidas para la etapa de contactación

Parámetro	Nivel
Volumen de agua (mL)	250
Relación aglomados/mineral	1,0
Tiempo de acondicionamiento (min)	10
Tamaño de aglomerados (mm)	2
Cantidad de acondicionante (μ L)	100
Velocidad de contactación (rpm)	600

4.3. RECUPERACIÓN DEL ORO CARGADO EN LOS AGLOMERADOS

Esta parte final de la investigación tuvo como objetivo separar físicamente las partículas de mineral ricas en oro del carbón de los aglomerados, reemplazando la etapa de calcinación por operaciones de beneficio de minerales. La Figura 11 compara la apariencia entre los aglomerados sin cargar (Izquierda) y los aglomerados después de la etapa de contactación. Se resalta que los aglomerados toman un color más dorado, debido a la vinculación de las partículas de oro pirítico a ellos.

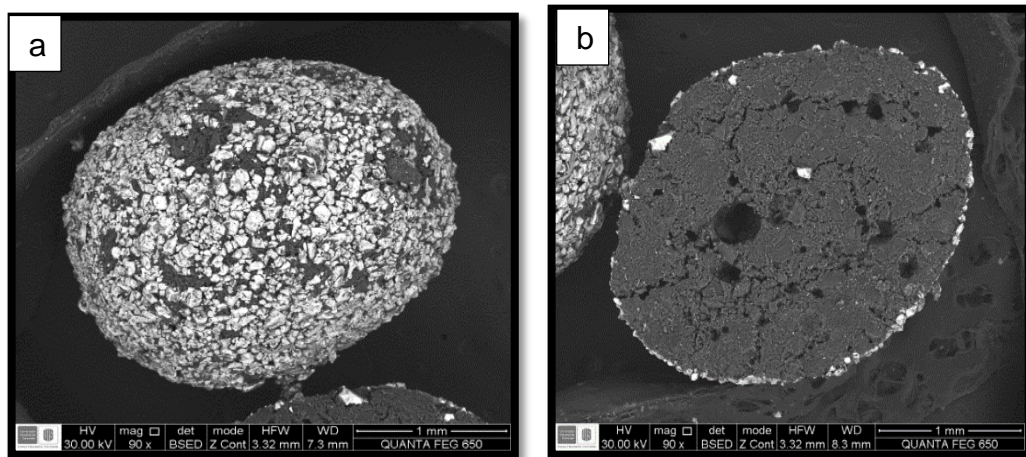
Figura 11. Fotografía de los aglomerados carbón aceite antes y después de la etapa de contactación con el minera,. izquierda aglomerados sin cargar y derecha aglomerados cargados.



A continuación en la Figura 12 se muestra la forma cómo están adheridas las partículas a la superficie del aglomerado. La micrografía SEM del exterior del aglomerado (Figura 12 a) Demuestra que la superficie del aglomerado es prácticamente recubierto en su totalidad por las partículas de mineral de diversos tamaños. Por su parte, el corte transversal del aglomerado (Figura 13b)

demuestran que la adherencia de las partículas minerales al aglomerado es tal, que las primeras tienden a penetrar al interior del aglomerado, lo cual se explica por las colisiones entre los aglomerados durante su agitación en la pulpa mineral

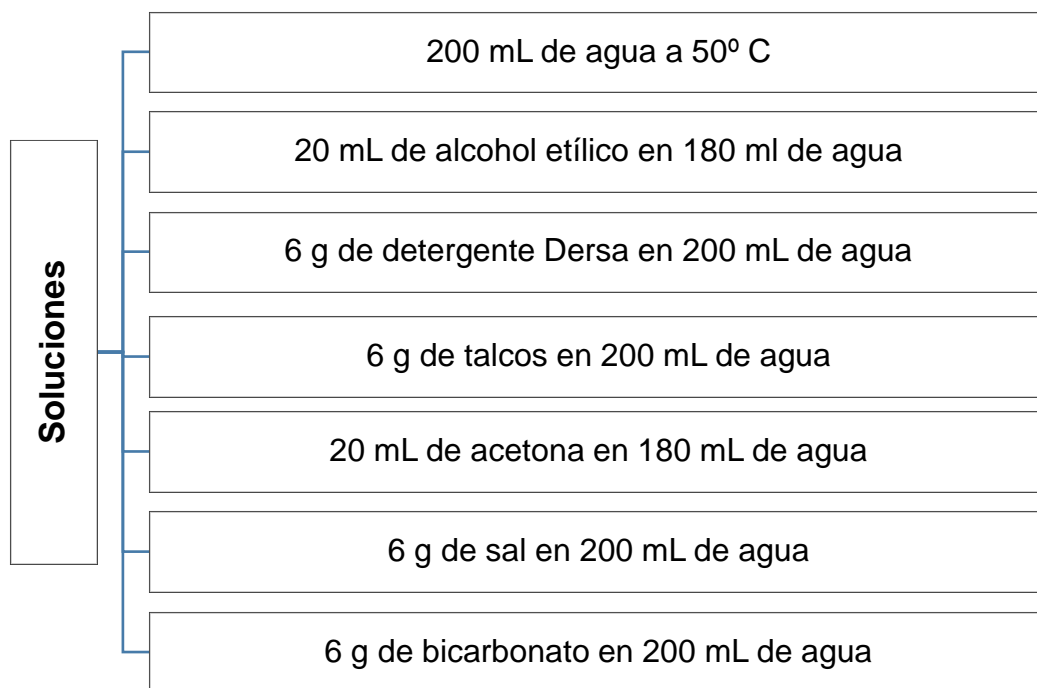
Figura 12. Micrografía SEM a 100x de un aglomerado después de la etapa de contactación a) Vista superior del aglomerado b) Corte transversal, vista interna del aglomerado.



Por tanto, para poder evaluar las operaciones de concentración de minerales para la separación de las partículas enriquecidas en oro, se hace necesario encontrar primero las condiciones adecuadas para disgregar los aglomerados, mediante lavados con sustancias desengrasantes que eliminen el aceite que une las partículas de carbón.

4.3.1. Disgregación de los aglomerados en diferentes soluciones desengrasantes. Para la disgregación de las partículas de oro los aglomerados se evaluaron algunas de las sustancias comúnmente empleadas como desengrasantes. En la Figura 13 se listan las soluciones estudiadas.

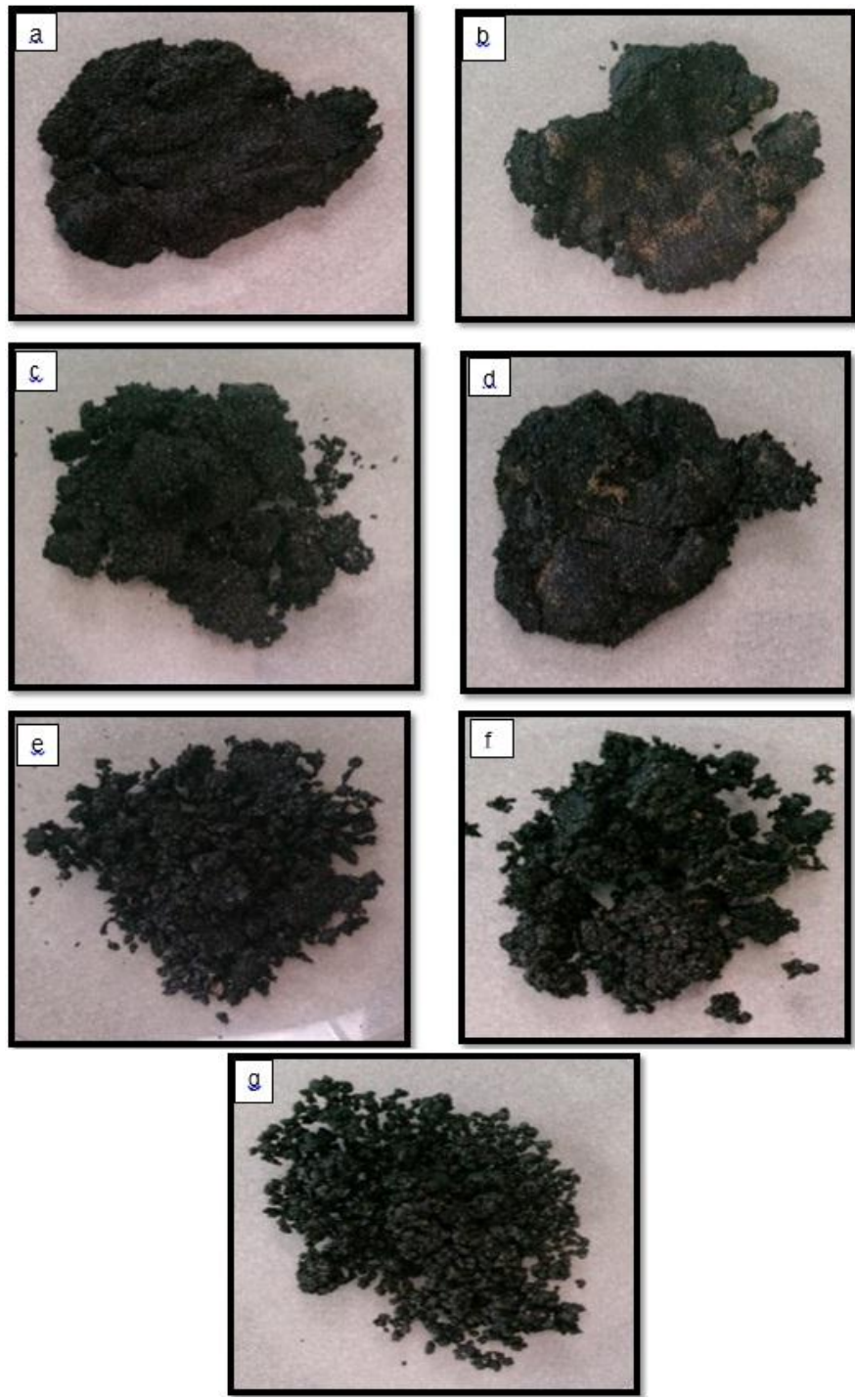
Figura 13. Soluciones usadas para la remoción del aceite de los aglomerados.



Los resultados de estos ensayos, mostrados en la Figura 14, demuestran que las soluciones de agua con bicarbonato, alcohol, acetona, sal y talcos no beneficiaron la separación entre el carbón y mineral, y por el contrario, se observa que aún existen aglomerados, lo cual quiere decir que estas soluciones no lograron eliminar el aceite, y por tanto se opta por descartarlas.

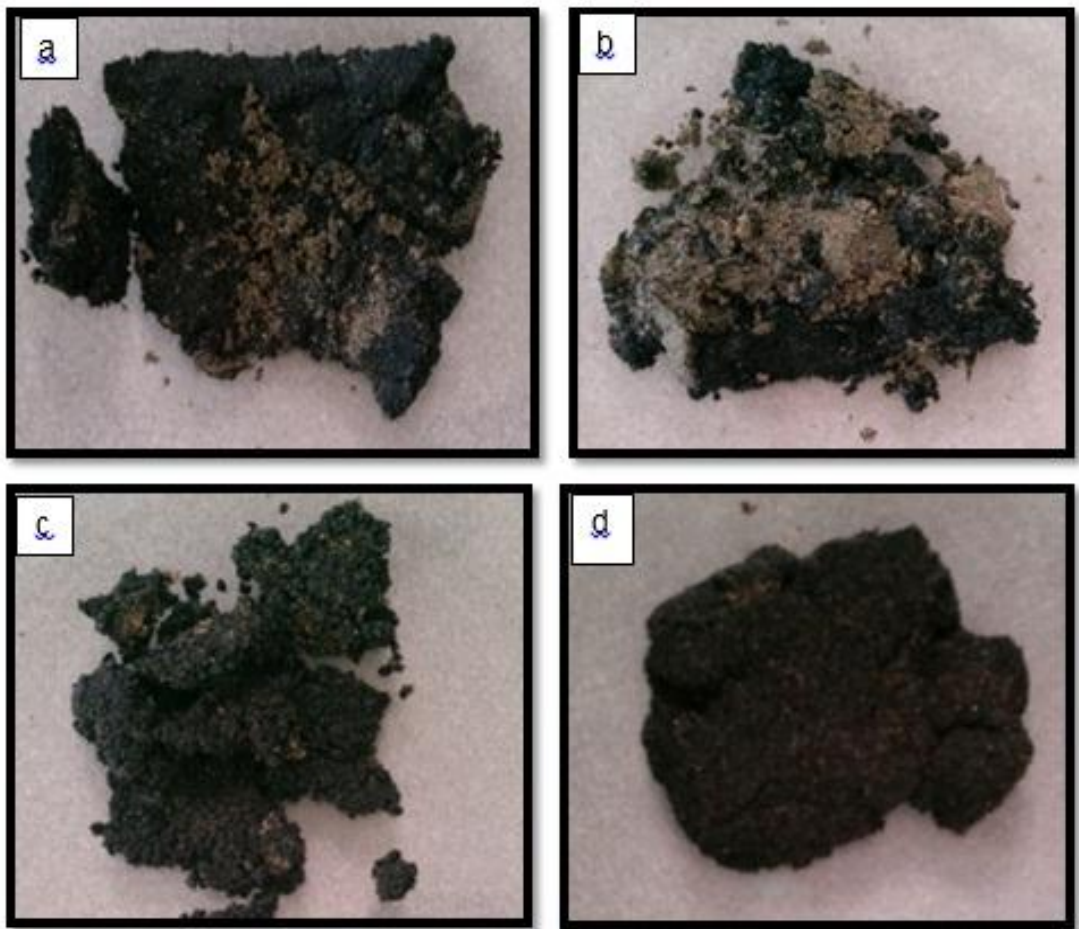
De igual forma se resalta que en la Figura 14b y 14d, para los productos obtenidos con agua a 50°C y agua + detergente, respectivamente, evidencian la liberación parcial de las partículas del carbón y del mineral, por lo cual se concluye que estas soluciones son una opción para eliminar el aceite y disgregar así los aglomerados.

Figura 14. Fotografías de los aglomerados luego de su lavado bajo diferentes condiciones: a) Agua + bicarbonato b) Agua a 50°C c) Agua + Talcos d) Agua + detergente temperatura ambiente e) Agua + acetona f) Agua + alcohol g) Agua + sal.



A partir de los resultados anteriormente mostrados, se procedió, por consiguiente, a combinar las pruebas del detergente y temperatura, además de esto se usaron otros tipos de jabones, en este caso shampoo y vanish. A continuación (Figura 15) se muestran los resultados de estos ensayos.

Figura 15. Fotografías de los aglomerados luego de su lavado con las soluciones desengrasantes finales: a) Agua + detergente a 50°C b) Agua + detergente a 70°C c) Agua + shampoo d) Agua + vanish



El registro fotográfico anterior evidencia que el detergente es el mejor agente desengrasante entre los estudiados, además su acción desengrasante es favorecida por el aumento de la temperatura. Es decir que con el lavado, bajo agitación, de los aglomerados con solución de detergente a 70°C, se consigue la

disgregación prácticamente completa de las partículas de los aglomerados cargados (Ver Anexo C). Por tal motivo, se seleccionan dichas condiciones como las más adecuadas para la disgregación de los aglomerados antes de las pruebas de concentración.

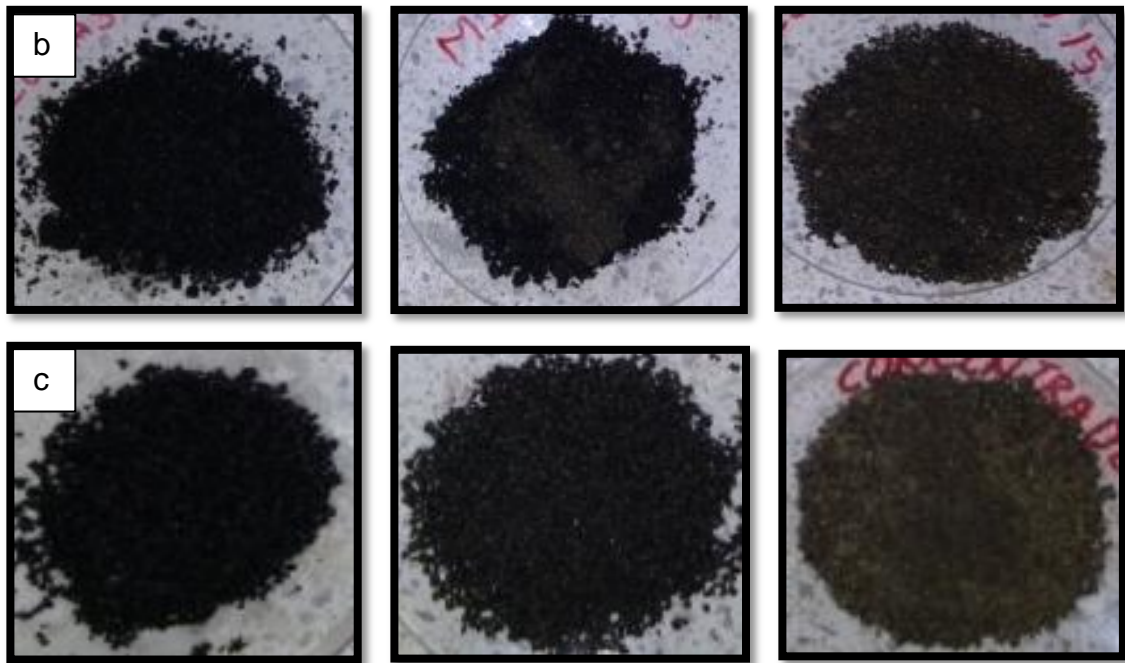
4.3.2. Concentración de los aglomerados

4.3.2.1. Concentración gravimétrica en Mesa Wilfley. Para los siguientes ensayos se usaron aproximadamente 160 gramos de aglomerados disgregados en una solución de agua + detergente a 70°C.

4.3.2.1.1. Efecto del ángulo de inclinación. En la Figura 16 muestran las fotografías de los productos obtenidos durante los ensayos de concentración en Mesa Wilfley a diferentes ángulos de inclinación. Cabe destacar que visualmente para el ángulo de 20° se obtuvo una muy buena separación física entre el carbón y el mineral, esto se puede apreciar en los productos denominados en la fotografía como concentrado y mixtos, ya que presentan una coloración dorada efecto de la alta concentración de pirita en estos.

Figura 16. Productos de concentración en Mesa Wilfley a) 20°, b) 15°, c) 10°





La Figura 17 muestra el efecto del ángulo de inclinación sobre la distribución del oro en los productos de concentración. Los resultados evidencian que el mayor porcentaje de recuperación de oro se obtuvo en el ángulo de 10° (53.51 %) y el menor porcentaje en el ángulo de 20° (24.52%). Aunque al observar la apariencia física de los productos obtenidos para el ángulo de 20° existe claramente una mayor separación física carbón-mineral/oro tanto en el concentrado como en los mixtos, lo cual no se resalta en ninguno de los otros productos obtenidos por los demás ángulos. Esto se puede comprobar en la Figura 18 en donde se muestran las leyes de los productos, calculados según el peso de estos y la cantidad de oro presente en ellos, indicando que para el ángulo de 20° hubo un mayor enriquecimiento comparado con los otros concentrados obtenidos a 10° y 15°, lo cual quiere decir que un menor peso produjo, en relación con los otros productos, una mayor retención de oro.

Figura 17. Distribución del oro en los productos de concentración en Mesa Wifley a diferentes ángulos de inclinación.

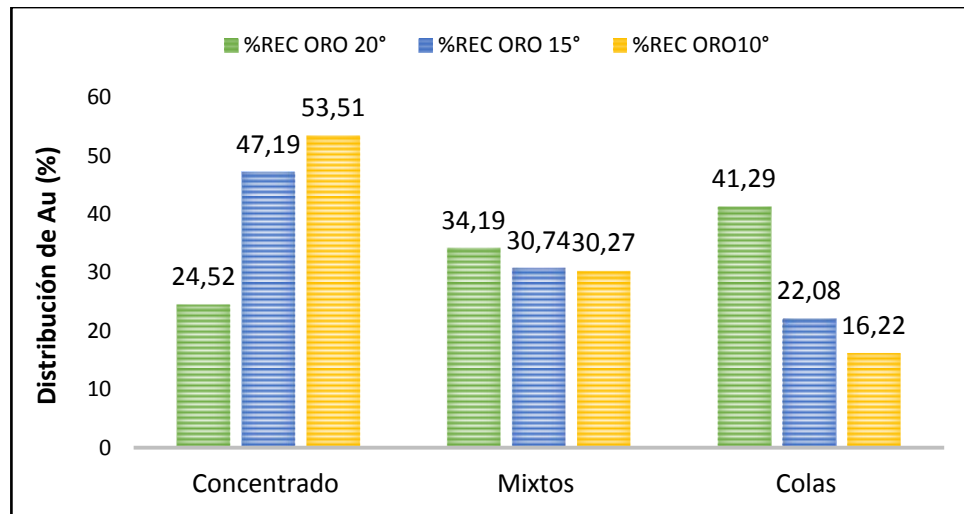
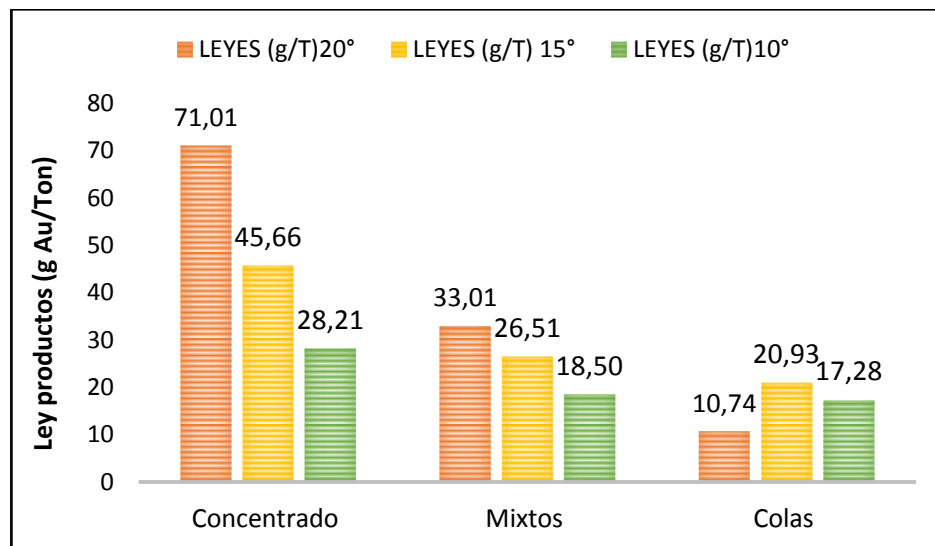


Figura 18. Leyes de oro de los productos obtenidos para cada ángulo de inclinación.



Los anteriores resultados no muestran un efecto significativo en la separación mineral-carbón, aunque se destaca los resultados alcanzados en el ángulo de 20°, lo cual propicia a indagar como puede obtenerse una mayor recuperación. Por

esta razón, se intenta aumentar la recuperación de oro implementando una variación en los tiempos de lavado con la finalidad de separar de una manera más completa las fases carbón- mineral ya que en los productos de mixtos y colas se encontraba gran cantidad de oro asociado a los aglomerados sin disgregar.

4.3.2.1.2. Efecto del tiempo de lavado sobre la recuperación de oro. Dado que los anteriores ensayos demostraron que la disgregación de los aglomerados no había sido completa durante el lavado, se propuso aumentar el tiempo de lavado con la hipótesis de que al mejorar la disgregación de los aglomerados. Así pues se implementaron lavados por tiempos de 20, 60, 120, 240 y 480 minutos.

Luego de ello, cada producto obtenido en el lavado fue sometido a un respectivo ensayo de concentración mediante la mesa Wilfley y procediendo a analizar el contenido de oro en cada producto por medio de ensayo al fuego.

La Figura 19 muestra la influencia del tiempo de lavado sobre la recuperación de oro a un ángulo de inclinación de 20° . Los resultados señalan claramente que el aumento del tiempo de lavado de los aglomerados incrementa la recuperación de oro en el concentrado, pasando de 25,12% a 20 minutos a 87,83% a 120 minutos de lavado, por otro lado si se observa detalladamente la Figura 20, es notable que quien presenta mayor enriquecimiento de oro es el concentrado obtenido a 120 minutos. Por encima de dicho tiempo no se mejora la recuperación, por lo que se selecciona dicho tiempo como el más adecuado.

Figura 19. Distribución del oro en los productos de concentración en Mesa Wilfley con ángulo de inclinación de 20° y diferentes tiempos de lavado.

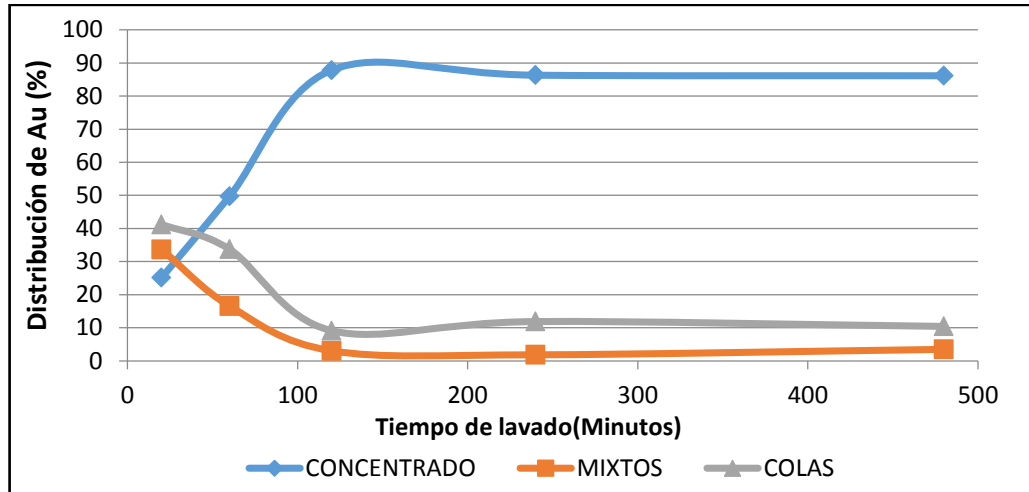
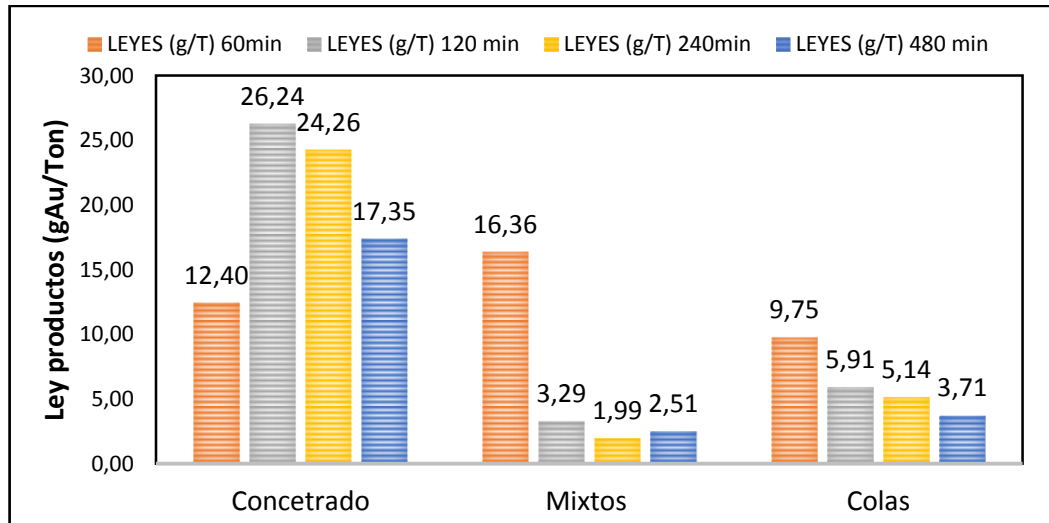


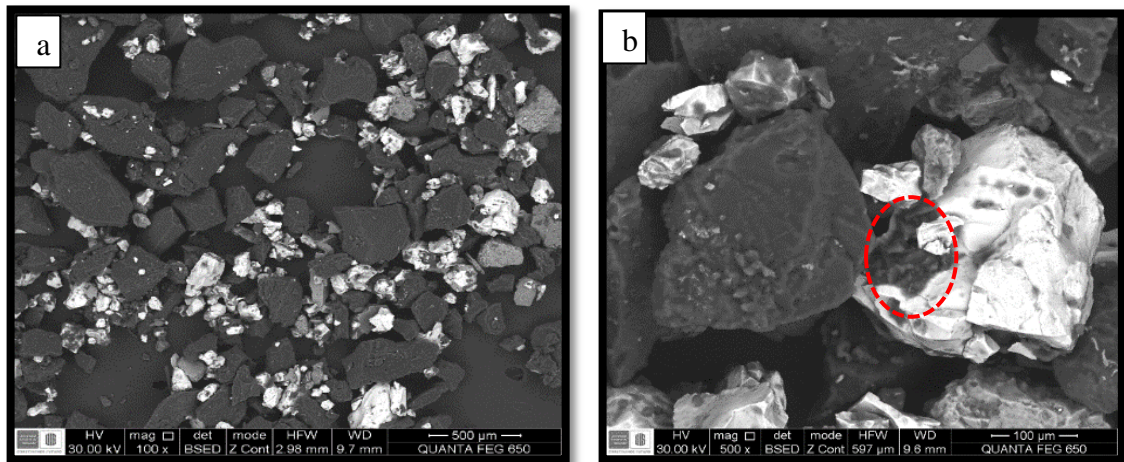
Figura 20. Leyes de oro de los productos obtenidos para el ángulo de inclinación de 20° y diferentes tiempos de lavado.



En la figura 21, se pueden observar las micrografías obtenidas por microscopía electrónica de barrido (SEM) de los aglomerados disgregados mediante su lavado bajo agitación en solución jabonosa a 70°C y durante 120 minutos. Se observa que las partículas de carbón (oscuras) y mineral (claras) se encuentran separadas

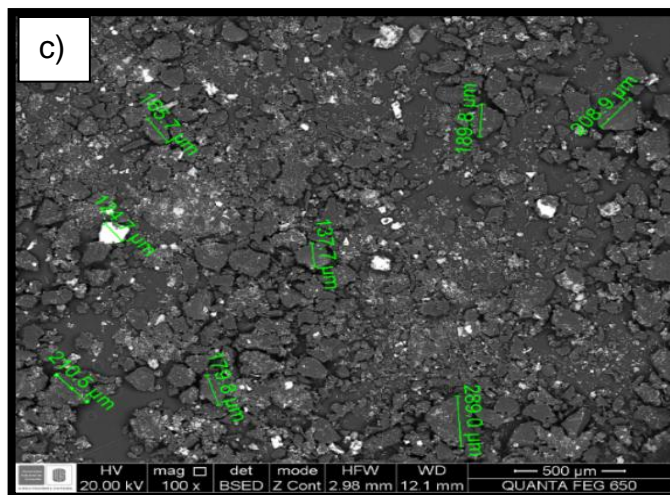
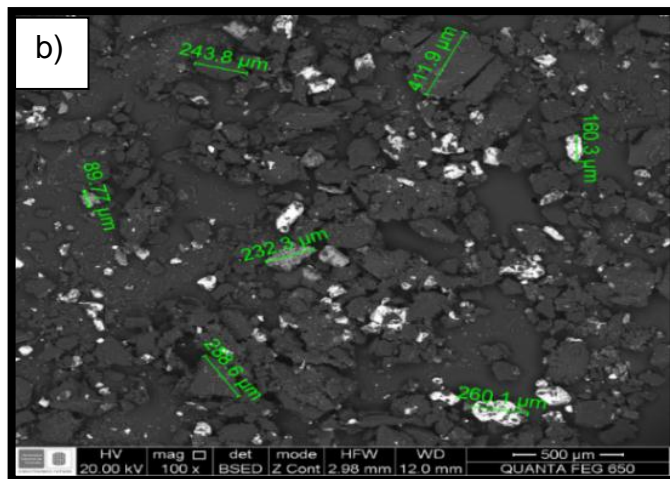
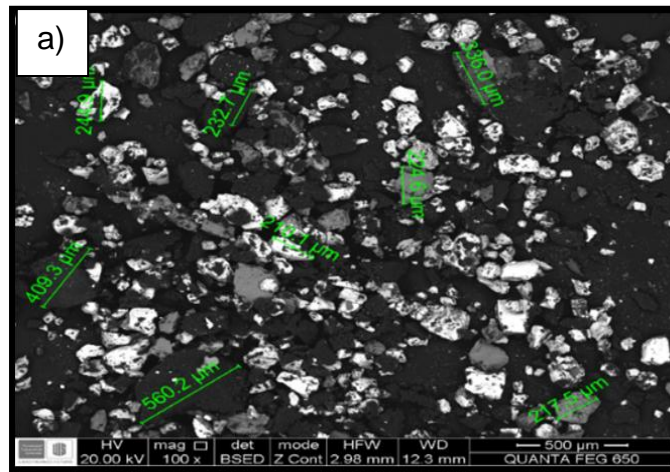
(Figura 21 (a)). No obstante, la micrografía tomada a 500X (Figura 21 (b)) evidencia que sobre la superficie de algunas partículas de pirita se presentan acumulaciones de partículas muy finas de carbón (circulo rojo), las cuales están adheridas al mineral.

Figura 21. Micrografías SEM de los aglomerados disgregados mediante el lavado durante 120 minutos a) 100x b) 500x



Por otro lado, en las Figuras 22(a), 22 (b) y 22 (c) se presentan, respectivamente, las micrografías SEM del concentrado, los mixtos y las colas del ensayo de concentración en Mesa Wilfley, con ángulo de inclinación de 20° y aglomerados lavados durante 120 minutos. Se resalta la existencia de una diferencia significativa en los tamaños de partículas encontrados en cada producto, siendo el concentrado quien presenta las partículas de mayor tamaño, las colas las de menor y los mixtos son una combinación de estas dos distribuciones de partículas. A partir de esta observación, se puede explicar por qué el producto concentrado poseía carbón, debido a que el gran tamaño de las partículas ocasionó un arrastre hacia la parte lateral de la mesa en donde se deposita el concentrado.

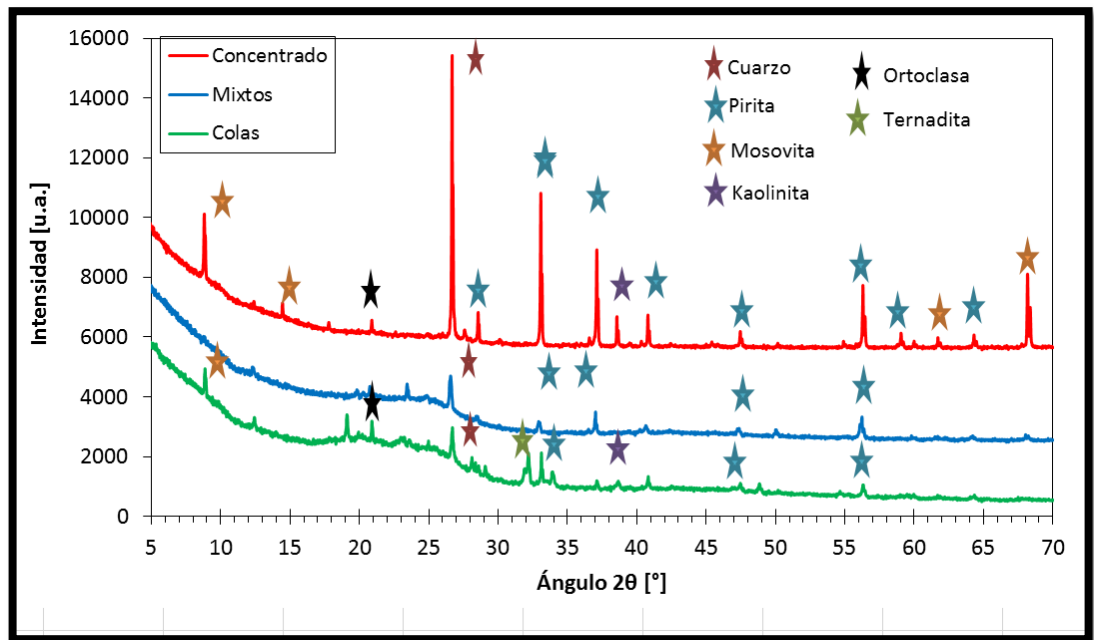
Figura 22. Micrografías SEM a 100 X de los productos de concentración en Mesa Wifley. a) Concentrado, b) Mixtos, c) Colas.



Otro aspecto importante que muestran las micrografías expuestas anteriormente, es la variación en la presencia de sulfuros (partículas con tonalidad clara), siendo el producto concentrado quien posee mayor cantidad, mientras que en las colas la presencia de sulfuros estaba en menor cantidad; al igual que el tamaño de partícula, los mixtos poseen una combinación de los dos productos del contenido de sulfuros. A partir de ello se corrobora el resultado expresado en recuperación de oro por la Figura 19, en donde el concentrado poseía la mayor cantidad de oro con un 87,83% de recuperación, los mixtos un 9,13% y las colas 3,04%

En la Figura 23 se comparan los difractogramas de rayos X de los tres productos de concentración. Se observan grandes diferencias en cuanto a las especies mineralógicas presentes en ellos.

Figura 23. Difractogramas de rayos x de los productos de concentración en mesa Wilfley



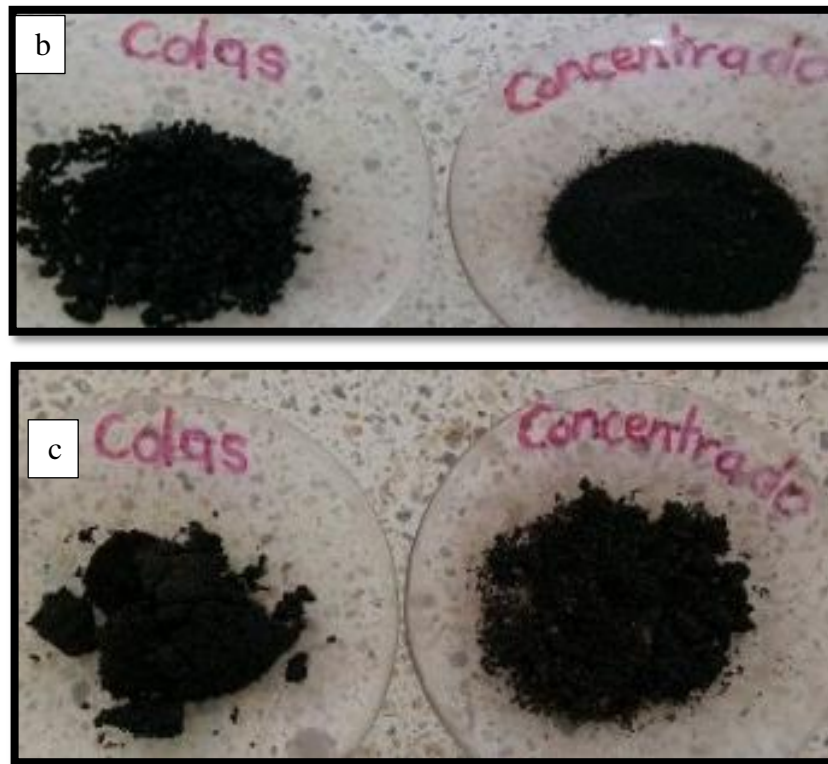
Mediante el análisis de los datos arrojados por el difractograma se puede evidenciar que el concentrado tiene mayor contenido de pirita y cuarzo, lo cual es respuesta de la gran intensidad de los picos. Por el contrario en las colas existe presencia de especies amorfas que no son de interés frente a la recuperación de oro, lo cual se corrobora con el resultado de oro encontrado en el ensayo al fuego de cada producto, evidenciando que el oro quedo en mayor proporción en el concentrado y un poco más libre de material de bajo interés, mientras los mixtos como se ha dicho anteriormente es una combinación de estos dos productos.

4.3.2.2. Flotación espumante. El último método de concentración evaluado fue la flotación espumante. Debido a que la flotabilidad de los carbones es elevada, se propuso un proceso de flotación inversa flotando el material estéril (carbón) y manteniendo el mineral de interés (pirita-oro) en suspensión, mediante su adecuación con un depresor (cal), a varios valores de pH. Como espumante se usó aceite de pino.

En la Figura 24 se presentan las fotografías de los productos de flotación obtenidos. La evidencia no mostró separación alguna de las especies minerales en estos ensayos, por el contrario se vio una tendencia a formarse pequeños aglomerados nuevamente, lo cual explica el mal resultado.

Figura 24. Productos obtenidos por medio de flotación inversa a diferentes valores de pH. a) pH 7; b) pH 9; c) pH 11.





Los resultados respecto a la recuperación de oro en cada producto se observa en la Figura 25, donde se muestra un comportamiento parecido en los tres ensayos, evidenciándose que ni la separación física carbón-mineral, ni la recuperación de oro fueron positivas, esto es debido en primera medida, a que la flotabilidad del carbón es elevada y también que el proceso benefició la aglomeración de partículas (Figura 26), hecho que generó que tanto en el concentrado y las colas hubiera una gran cantidad de oro.

A partir de ello se opta por descartar esta técnica ya que la agitación de la pulpa beneficia la aglomeración y no la recuperación de oro ni la separación física carbón-mineral.

Figura 25. Porcentajes de recuperación de oro en los productos de flotación para los diferentes pHs.

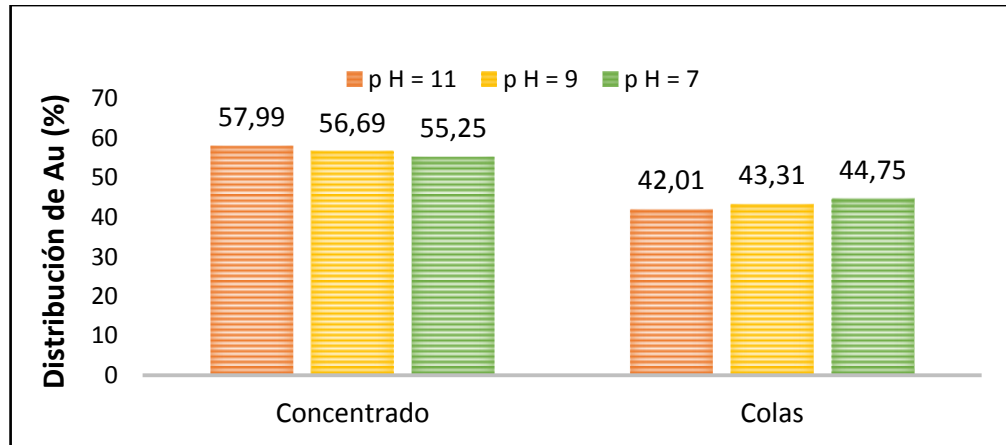
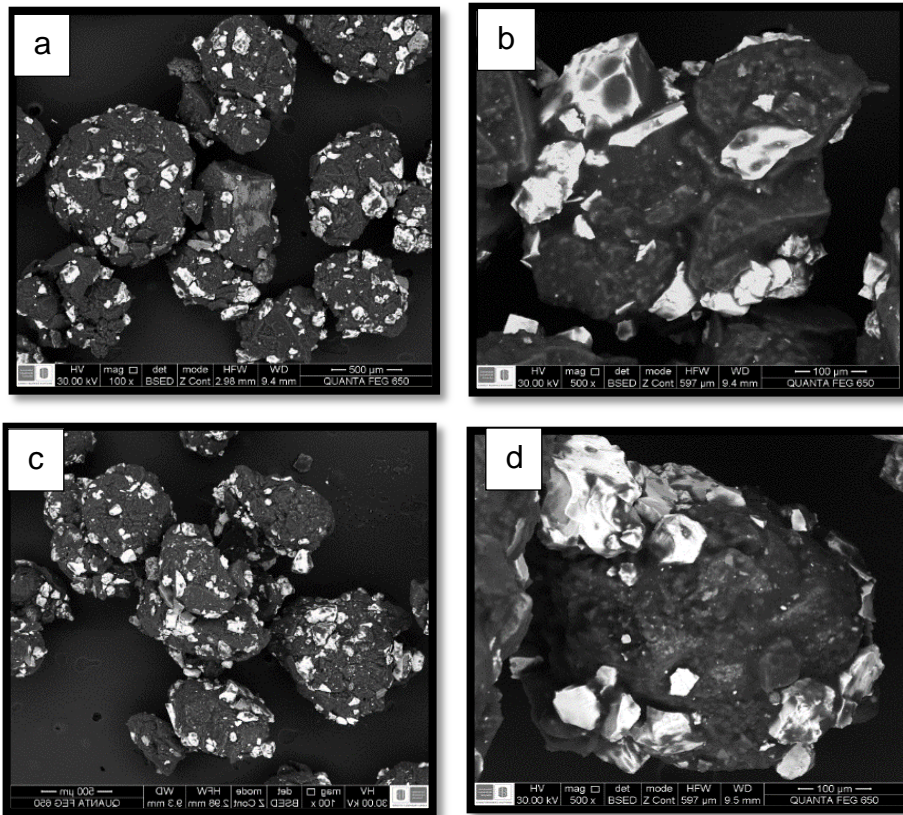


Figura 26. Micrografía SEM de los productos de flotación para la muestra ensayada con pH 11 a) Concentrado a 100x, b) Concentrado a 500x, c) Colas a 100x d) Colas a 500x



Tal y como se muestra en la figura 26, en donde se ven los productos de flotación, se evidencia en principio la formación subsiguiente de aglomerados por efecto de la agitación a la cual se realiza el proceso de flotación. Este efecto en las partículas no propicia un buen resultado, siendo la principal causa de descarte de este ensayo.

5. CONCLUSIONES

- De las pruebas de caracterización del mineral Reina de Oro, se concluye que éste no es de naturaleza refractaria, debido a que alrededor del 80% del oro contenido está asociado a óxidos o se encuentra en estado libre. Además, fue clasificado como “medianamente lixiviable”, alcanzándose un valor máximo de disolución de oro con cianuro del 78%. La presencia de elementos cianicidas como Cu, Zn y As y la asociación de más del 19% del oro a la pirita fueron las principales limitantes del proceso de lixiviación.
- El análisis próximo del carbón utilizado en la investigación, permitió clasificarlo como un Bituminoso Alto Volátil Tipo A. Además mediante la medición del ángulo de contacto se determinó que el carbón presenta características oleofílicas más que hidrofílicas, lo cual beneficia su aglomeración con aceite.
- De acuerdo con las variables estudiadas en la etapa preliminar del proceso CGA, las mejores condiciones de trabajo para la recuperación de oro fueron: velocidad de agitación para formación de aglomerados 2000 rpm, tamaño de aglomerados 2 mm, cantidad de acondicionante 100 µL y velocidad de contactación 600 rpm, bajo las cuales se obtuvo una recuperación de oro cercana al 78%.
- Se estableció que la disgregación, por agitación durante 120 minutos, de los aglomerados cargados con oro en una solución de detergente a 70°C, es un método eficiente para la remoción del aceite y la separación de las partículas de carbón y de mineral rico en oro.

- De las técnicas de concentración evaluadas para la recuperación del oro de los aglomerados, se concluye que la flotación no es un proceso adecuado para tal fin, debido a que este conlleva a la re-aglomeración de las partículas de carbón y mineral y no a su separación como se esperaba.
- El uso de fuerzas alternantes, como las involucradas en la mesa Wilfley, favorece la separación gravitacional del carbón y el mineral rico en oro, alcanzándose recuperaciones cercanas al 88%. Por lo que finalmente se concluye que dicho método de beneficio de minerales podría llegar a establecerse como un método ambientalmente amigable para la recuperación del oro de los aglomerados en el proceso CGA, en reemplazo de la quema y fusión de estos últimos.

6. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta que los resultados del proyecto, confirman la hipótesis de que es posible lograr la disgregación de los aglomerados y la separación de las partículas de carbón de las de mineral-oro, por medio de procesos de beneficio de minerales, tal como concentración en mesa Wilfley, se recomienda llevar a cabo estudios de optimización de tales procesos con el fin de maximizar la recuperación y el enriquecimiento del concentrado. Para tal fin, se propone la implementación de circuitos de concentración que incluyan las etapas de limpieza del concentrado y de barrido de las colas.
- Se recomienda llevar a cabo estudios exhaustivos sobre el efecto de las variables involucradas en las etapas de obtención de los aglomerados carbón-aceite y de puesta en contacto de los aglomerados con la pulpa mineral, con especial énfasis en los tamaños de partícula del carbón y del mineral. Para estos estudios, se recomienda incluir como variables respuestas, además de la calidad de los aglomerados y la recuperación de oro, la eficiencia de los procesos de disgregación de los aglomerados cargados y de separación (concentración) del carbón y del mineral rico en oro.
- Para futuras investigaciones, también se propone evaluar la eficiencia de la etapa de concentración (recuperación del oro de los aglomerados) en el proceso CGA, al implementar diversos tipos de minerales auríferos (de aluvión y filonianos, tanto oxidados como sulfurados con diferentes niveles de refractariedad). Con tal estudio se obtendría información sobre la facilidad con la que las asociaciones minerales del oro se pueden separar del carbón.

- Teniendo en cuenta que próximamente la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales adquirirá un Concentrador Knelson, se recomienda llevar a cabo un estudio de separación de las partículas de carbón y de mineral-oro con dicho equipo. Es de esperarse una alta eficiencia de separación en el concentrador Knelson, dado que en éste la fuerza centrífuga a la que están expuestas las partículas es equivalente a 60 veces la fuerza gravitacional.
- Aunque los ensayos de flotación llevados a cabo en el presente proyecto fueron ineficientes para la separación de las partículas de carbón y de mineral-oro, es posible obtener mejores resultados si el carbón es altamente hidrofóbico, dada la mayor facilidad para flotar. Por tanto, se recomienda implementar en el proceso carbones de alto rango y bajo contenido de cenizas, tal como las antracitas y semiantracitas. Además se propone el uso de agentes espumantes no aceitosos, para evitar que su presencia favorezca la re-aglomeración del carbón y de las partículas de mineral-oro.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] PEÑA PIRAZAN, Juan Diego. Minería y medio ambiente en Colombia. Bogotá, 2.003. Trabajo de grado de especialización (Especialista en gerencia para el manejo de los recurso naturales del medio ambiente y la prevención de desastres). Universidad Sergio Arboleda. Escuela de Postgrados.
- [2] RONDEROS, María Teresa. La fiebre minera se apoderó de Colombia. Revista Semana. 6 de septiembre de 2011.
- [3] PBI Colombia. Minería en Colombia: ¿A qué precio?. En: Colombia, Noviembre de 2.011, No 18, p 4-7.
- [4] HILSON, G., MONHEMIUS, A.J., Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future?. En: Cleaner Production. Vol. 14, Issue 12-13, (2.006); p 1158-1167.
- [5] CALVEZ, J.P.S., KIM, M.J. Use of coal-oil agglomerates for particulate gold recovery. En: Minerals Engineering. Vol. 11, Issue 9, (Sep, 1998); p 803–812.
- [6] MOSES, L. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. En: Science Direct. Vol. 13, (Mar., 2.000); p 255-264.
- [7] AKCIL, A., WU, X.Q. Coal-Gold Agglomeration: An Alternative Separation Process in Gold Recovery. En: Separation & Purification Reviews. Vol. 38, Issue 2, (Feb., 2.009); p 173-201.

- [8] CORDOBA TUTA, E.M. Recuperación de Oro Particulado con Aglomerados Carbón Aceite una Tecnología Limpia en la Extracción del Oro. Bucaramanga, 1.998. Trabajo de grado de maestría (Magister en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Departamento de Metalurgia.
- [9] ATEHORTÚA, Alba, GAVIRIA, Ana. Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón-aceite. En: Boletín de ciencias de la tierra. Número 18, (Jul., 2.006).
- [10] SAHINOGLU, Ercan, USLU, Tuncay. Role of recovery sieve size in upgrading of fine coal coal oil agglomeration technique. En: Science Direct. Vol. 138, (Oct., 2.015); p 21-29.
- [11] ARENAS, Tatiana, RUIDIAZ, Eddy. Estudio del comportamiento de las espumas generadas en el lavado de carbones por flotación mediante el uso de mezclas densas tipo CCTA. Bucaramanga, 2.006. Trabajo de grado (Ingeniero Químico). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
- [12] WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS A.J. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. En: Minerals Engineering. Vol. 17. Issue 1, (Jan., 2.004); p 33-38.
- [13] SEN, S, SEYRANKAYA, A. Coal-oil assisted flotation for the gold recovery. En: Science Direct. Vol.18, (May, 2.005); p 1086-1092.

- [14] CILINGIR, Y., SEN, S. An Investigation On The Effects Of Ore Grade And Particle-Liberation Size In Gold Recovery By Coal-Oil-Gold Agglomerate Flotation. En: Developments in Mineral Processing. Vol. 13, (Jun., 2.000); p C8a-6–C8a-13.
- [15] CARDENAS, Juan Manuel. Estudio de la recuperación del oro contenido en la laguna de colas de la asociación civil minera corregente, municipio Sifontes, estado Bolívar. Caracas, 2.003. Trabajo de grado (Ingeniero de Minas). Universidad Central de Venezuela. TAGGART, Arthur. Elementos de preparación de minerales. Madrid: Interciencia, 1.966.
- [16] PYOR, E.J. Mineral Processing, 3rd Edition, London: Elsevier, 1.965.
- [17] Universidad De Atacama Facultad De Ingeniería Departamento De Metalurgia. Apuntes concentración de minerales II [en línea]. <<http://www.metalurgia.uda.cl/apuntes/Pavez/APUNTES%20%20DE%20CONCENTRACION%20DE%20MINERALES%20II.pdf>>
- [18] GAUDIN, A. M. Principles of mineral dressing. McGraw-Hill Book Company, Incorporated, 1939.
- [19] ABARCA, Joaquín. Flotación de minerales. Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión. Perú, 2.001. p 6.
- [20] Facultad de Ingeniería. Evaluación de los procesos de concentración de minerales [en línea]. <<http://ingenieria.udea.edu.co/cim2005/mineralurgia/concentracion.pdf>>

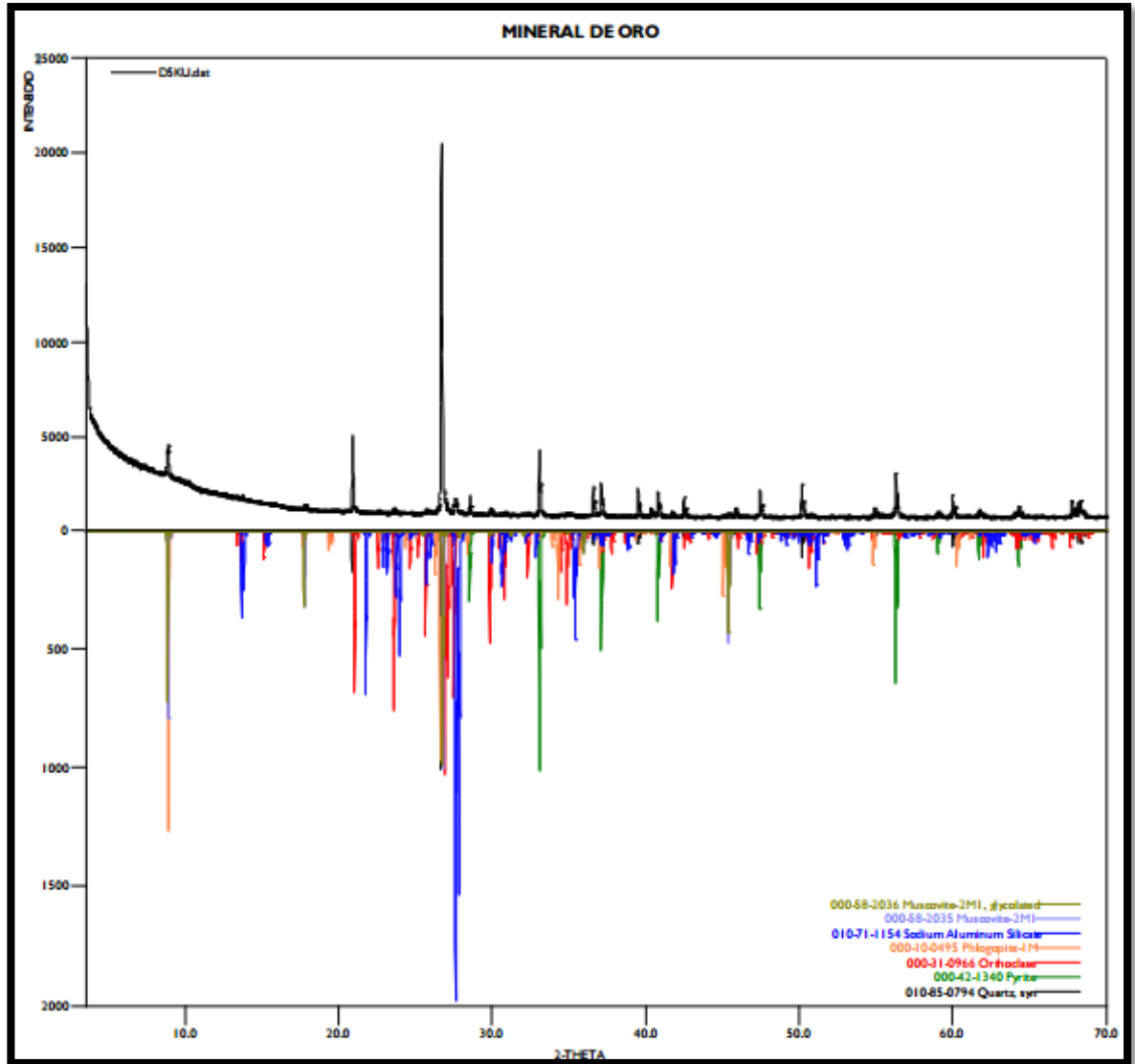
- [21] ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2.002
- [22] ASTM D-388. Standard Classification of Coals by Rank. 1.998.
- [23] TRASLAVIÑA, J., PEDRAZA, J.E., Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar-Colombia), para la selección de los procesos de extracción.
- [24] LA BROOY, S.R., Review of gold extraction from ores. En: Minerals Engineering, Vol. 7, Issue 10, (Oct. 1.994). p 1.213-1.241.
- [25] SYED, S., Recovery of gold from secondary sources- A review. En: Hydrometallurgy, Vol. 115-116, (Mar. 2.012), p 30-51.

BIBLIOGRAFÍA

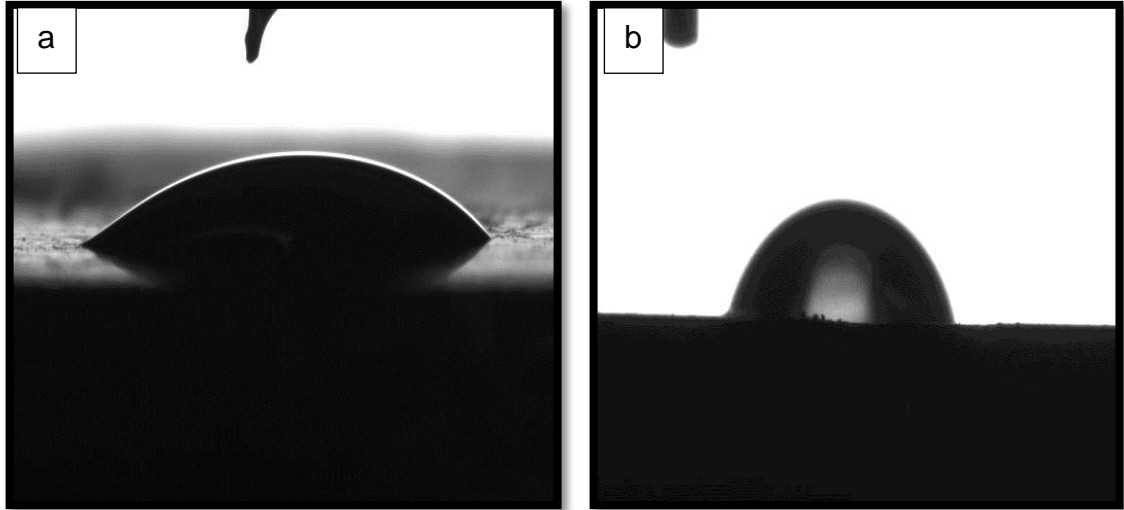
- ASTM D-388. Standard Classification of Coals by Rank. 1.998.
- ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2.002.
- CORDOBA TUTA, E.M. Recuperación de Oro Particulado con Aglomerados Carbón Aceite una Tecnología Limpia en la Extracción del Oro. Bucaramanga, 1.998. Trabajo de grado de maestría (Magister en Ingeniería Metalúrgica). Universidad Industrial de Santander. Departamento de Metalurgia.
- HILSON, G., MONHEMIUS, A.J., Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future?. En: Cleaner Production. Vol. 14, Issue 12-13, (2.006); p 1158-1167.
- LA BROOY, S.R., Review of gold extraction from ores. En: Minerals Engineering, Vol. 7, Issue 10, (Oct. 1.994). p 1.213-1.241.

ANEXOS

ANEXO A. DIFRACTOGRAMA DE LA MUESTRA MINERAL REINA DE ORO.



ANEXO B. FOTOGRAFÍA TOMADA DE LA MEDICIÓN DEL ÁNGULO DE CONTACTO UTILIZANDO COMO SUSTRATO a) ACEITE CRUDO DE SOYA, b) AGUA



ANEXO C. FOTOGRAFIA DEL LAVADO DE LOS AGLOMERADOS CARGADOS EN LA SOLUCIÓN DE DETERGENTE A 70°C

