

ESTUDIO DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS DE MINERALES
AURÍFEROS DE ALUVIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE
AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN Y ACEITE (CGA)

LAURA MILENA ORTIZ FONSECA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

ESTUDIO DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS DE MINERALES
AURÍFEROS DE ALUVIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE
AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN Y ACEITE (CGA)

LAURA MILENA ORTIZ FONSECA

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director

Dra. ELCY MARÍA CÓRDOBA TUTA

Ingeniera Metalúrgica

Codirector

Dr. PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA

Ingeniero Materiales

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA METALÚRGICA Y CIENCIA DE MATERIALES
BUCARAMANGA

2018

DEDICATORIA

A:

Dios, por darme la oportunidad de vivir y por estar conmigo en cada paso que doy, por fortalecer mi corazón e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación, tanto académica, como de la vida, por su incondicional apoyo perfectamente mantenido a través del tiempo.

Mi madre Teo Fonseca, por darme la vida, quererme mucho, creer en mí y porque siempre me apoyaste. Mamá gracias por darme una carrera para mi futuro, todo esto te lo debo a ti.

Mi padre Angel Ortiz, Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor

Mis hermanas, por estar conmigo y apoyarme en todo momento.

A mis amigos, Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos: Gustavo Alarcón y Fernanda Cárdenas.

Todos aquellos familiares y amigos que no recordé al momento de escribir esto. Ustedes saben quiénes son.

A mis amigos, Que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y que hasta ahora, seguimos siendo amigos: Gustavo Alarcón y Fernanda Cárdenas.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por haberme brindado los conocimientos necesarios para culminar este proyecto con éxito. A mis directores de proyecto, La Doctora Elcy María Córdoba Tuta y el Doctor Pedro Luis Delvasto Angarita por brindarme su apoyo, conocimiento y paciencia incondicional y lograr culminar esta etapa en mi vida.

Al Grupo de Investigaciones en Minerales, Biohidrometalurgia y Ambiente (GIMBA) y a la Técnica Yury López por el apoyo prestado durante las pruebas.

A los técnicos de la Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales: Javier Gaitán, Mario Navarrete, Domingo, Sergio, Oscar y en especial al Técnico Ambrosio Carrillo por su colaboración y paciencia durante todo el proyecto.

Al laboratorio de Rayos X, en especial al profesor Henao y al laboratorio de Microscopia, por su interés y contribución en la realización de las pruebas.

A la vicerrectoría de Investigación y Extensión (VIE) de la Universidad Industrial de Santander por la financiación del presente trabajo de grado, a través del proyecto de investigación titulado “Implementación del proceso CGA como una alternativa a los métodos tradicionales de amalgamación y cianuración para la recuperación de oro de minerales colombianos”, código 1884.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. ANTECEDENTES	16
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	21
3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA DE LOS MINERALES	21
3.1.1 Muestras minerales.....	21
3.1.2 Caracterización química y mineralógica	21
3.1.3 Cianuración en botella	22
3.1.4 Lixiviación diagnóstico.	22
3.1.5 Caracterización físico-química.....	23
3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO CGA	24
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA DE LOS MINERALES	26
4.1.1 Composición elemental.....	26
4.1.2 Fases cristalinas	27
4.1.3 Tenores de metales preciosos en los minerales	28
4.1.4 Grado de lixiviabilidad de los minerales.....	28
4.1.5 Lixiviación diagnóstico.	31
4.1.6 Análisis de sales disueltas desde los minerales.	32
5. CONCLUSIONES	40

6. RECOMENDACIONES.....	41
BIBLIOGRAFÍA.....	42
ANEXOS.....	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estado y procedencia de los minerales.....	21
Tabla 2. Resultados obtenidos por FRX.	26
Tabla 3. Fases cristalinas presentes en los minerales identificados por DRX.	27
Tabla 4. Ley de oro (Au) y plata (Ag) de los dos minerales estudiados, obtenidos por el método de ensayo al fuego.	28
Tabla 5. Clasificación de los minerales de oro según S.R. La Brooy [19].	31
Tabla 6. Resultados de pH, conductividad y sales disueltas en las pulpas.	32
Tabla 7. Resultado de análisis de aniones y cationes presentes en las sales disueltas de los dos minerales.	33

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas del proceso CGA [6].	16
Figura 2. Cinética de lixiviación de oro con cianuro durante 72 horas para los minerales Bagre (a) y Sabana (b).	29
Figura 3 Cinética del consumo de cianuro libre durante la cianuración de los minerales Bagre (a) y Sabana (b).	30
Figura 4 Lixiviación diagnóstico. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en los minerales Bagre (a) y Sabana (b).	31
Figura 5. Fotografías de los aglomerados antes (a) y después de su contacto con las pulpas minerales a pH 3 (b), 5 (c) y 7 (d) para Bagre y 3 (e), 5 (f) y 8 (g) para Sabana.	35
Figura 6. Tamaño promedio de los aglomerados.....	36
Figura 7. Reacción de conversión de fosfolípidos no hidratables del aceite en hidratables en presencia de un ácido [20].....	36
Figura 8. Índices metalúrgicos obtenidos de las pruebas de extracción de metales preciosos a través del proceso CGA.....	37
Figura 9. Micrografías SEM de los aglomerados luego del contacto con las pulpas minerales.	39

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Granulometría de los Minerales	45
Anexo B. resultados obtenidos mediante el análisis de DRX	46
Anexo C. Selección de agentes lixiviantes	47

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO DE ALGUNOS PARÁMETROS GEOMETALÚRGICOS DE MINERALES AURIFEROS DE ALUVIÓN Y SU EFECTO SOBRE EL PROCESO DE AGLOMERACIÓN DE ORO CON CARBÓN Y ACEITE (CGA)

AUTORES: Laura Milena Ortiz Fonseca**

PALABRAS CLAVES: Proceso CGA, minerales de aluvión, caracterización geometalúrgica.

DESCRIPCIÓN

En este proyecto se estudió el efecto de las características geometalúrgicas de dos minerales concentrados auríferos de aluvión procedente de Antioquia y Santander sobre la eficiencia del proceso de extracción de oro con aglomerados de carbón y aceite, lo que se propuesto como alternativa a los métodos tradicionales de amalgamación y cianuración. Siendo amigable con el medio ambiente al no requerir de sustancias altamente toxicas cómo el cianuro y el mercurio.

La experimentación consistió en la caracterización química y mineralógica de los minerales a través de las técnicas de difracción y fluorescencia de rayos x, caracterización metalúrgica a través de pruebas de cianuración en botella para determinar el grado de lixiviabilidad, lixiviación diagnóstico con el fin de determinar las asociaciones minerales de los metales preciosos y caracterización físico química consistente de análisis de sales disueltas, medición de pH en pulpa y conductividad eléctrica.

Finalmente, se evaluó la recuperación y la eficiencia del proceso CGA para la extracción de oro y plata de los minerales, bajo diferentes condiciones de pH en la pulpa mineral. Se encontró que las condiciones de pH ácidas en la pulpa mineral y la asociación del oro a silicatos y otros óxidos son los factores que limitan la recuperación y eficiencia del proceso CGA para la extracción del metal precioso desde minerales de aluvión.

*Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de Materiales. Director: PhD. Elcy María Córdoba Tuta. Codirector: PhD. Pedro Luis Delvasto Angarita

ABSTRACT

TITLE: STUDY OF SOME PARAMETERS OF MINERAL geometallurgical auriferous alluvium AND ITS EFFECT ON GOLDEN agglomerating process COAL AND OIL WITH (CGA)

AUTHORS: Laura Milena Ortiz Fonseca **

KEYWORDS: Process CGA, alluvial minerals, geometallurgical characterization.

DESCRIPTION

In this project the impact of the metallurgic characteristics of two auriferous ore concentrates alluvium from Antioch and Santander on the efficiency of the extraction of gold with agglomerates of coal and oil is studied, which is proposed as an alternative to traditional methods of amalgamation and cyanidation. It is friendly to the environment by not requiring highly toxic as cyanide and mercury substances.

Experimentation consisted of chemical and mineralogical mineral characterization through diffraction techniques and x-ray fluorescence, metallurgical characterization through testing cyanidation bottle to determine the degree of leachability, leaching diagnosis in order to determine the mineral assemblages consisting of precious metals and physicochemical characterization analysis of dissolved salts, pH measurement in pulp and electrical conductivity.

Finally, recovery and efficiency CGA process for the extraction of gold and silver ores, under different pH conditions in the mineral pulp was evaluated. It was found that acidic pH conditions in the mineral pulp and the association of gold silicates and other oxides are the factors limiting the efficiency of recovery and CGA process for the extraction of the precious metal from mineral alluvium.

*Degree work

** Faculty of Engineering Physicochemical. School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Director: PhD. Elcy Maria Cordoba Tuta. Co-Director: PhD. Pedro Luis Angarita Delvasto

INTRODUCCIÓN

La extracción de oro en Colombia, es un tema de gran importancia en la generación de ganancia para el país. Sin embargo, la extracción de dicho metal involucra procesos en los cuales se utilizan cianuro y mercurio, sustancias de gran toxicidad que al ser manipuladas en forma inadecuada generan graves daños al medio ambiente y a la salud¹.

El efecto tóxico del mercurio puede ser atribuido a los iones Hg^{2+} , el envenenamiento por la penetración de mercurio a través de la inhalación del vapor puede conllevar a enfermedades de los riñones y del tracto urinario y a daños en las terminaciones nerviosas ²Por su parte, en cantidades excesivas, el cianuro puede ser letal para los seres humanos y las especies animales, ya que se une a las enzimas portadoras de hierro requeridas por las células que necesitan oxígeno, inhibiendo así que los tejidos corporales, especialmente el miocardio y el sistema nervioso central, puedan extraer el oxígeno de la sangre, tal situación de falta de oxígeno y asfioxio puede llevar a la muerte en minutos³.

Es por eso que, en búsqueda de alternativas amigables con el ambiente, se desarrolló un proceso denominado CGA (aglomeración de oro con carbón y aceite), el cual aprovecha las características superficiales del oro (hidrofobicidad / oleofilicidad) permitiendo que este se adhiera a aglomerados de carbón y aceite, pudiéndose así separar las partículas de oro desde una pulpa mineral. Además del

¹ATEHORTÚA E., ALBA MILENA, GAVIRIA C., ANA CECILIA, PEREZ S., JUAN DAVID, Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón - aceite. Boletín de Ciencias de la Tierra [en línea] 2006, (Julio-Sin mes): [Fecha de consulta: 23 de junio de 2018] Disponible en: <<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169517424005>> ISSN 0120-3630.

² R. DAVIES GEORGE, A toxic free future: Is there a role for alternatives to mercury in small-scale gold mining [en línea] 2014, (octubre): [Fecha de consulta: 23 de junio de 2018] Disponible en: <http://daneshyari.com/article/preview/1015490.pdf>.

³ HILSON, G., MONHEMIUS, A.J. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? *Journal of Cleaner Production*, Volume 14, Issue 12, Pages 1158-1167.

no uso de sustancias tóxicas, otra ventaja de este proceso es que se pueden recuperar tanto partículas finas como gruesas⁴.

Sin embargo, se conoce que el proceso CGA no aplica para cualquier tipo de mineral aurífero, razón por la cual se requiere de estudios que relacionen las características geometalúrgicas de los minerales auríferos con la eficiencia de extracción del oro a través del proceso. Con base en lo anterior, se propuso como alcance del presente proyecto, realizar la caracterización geometalúrgica de minerales auríferos colombianos de aluvión, de distintas procedencias, con el fin de establecer si sus propiedades, los hacen aptos para extraerles el oro que contienen utilizando el proceso CGA⁵.

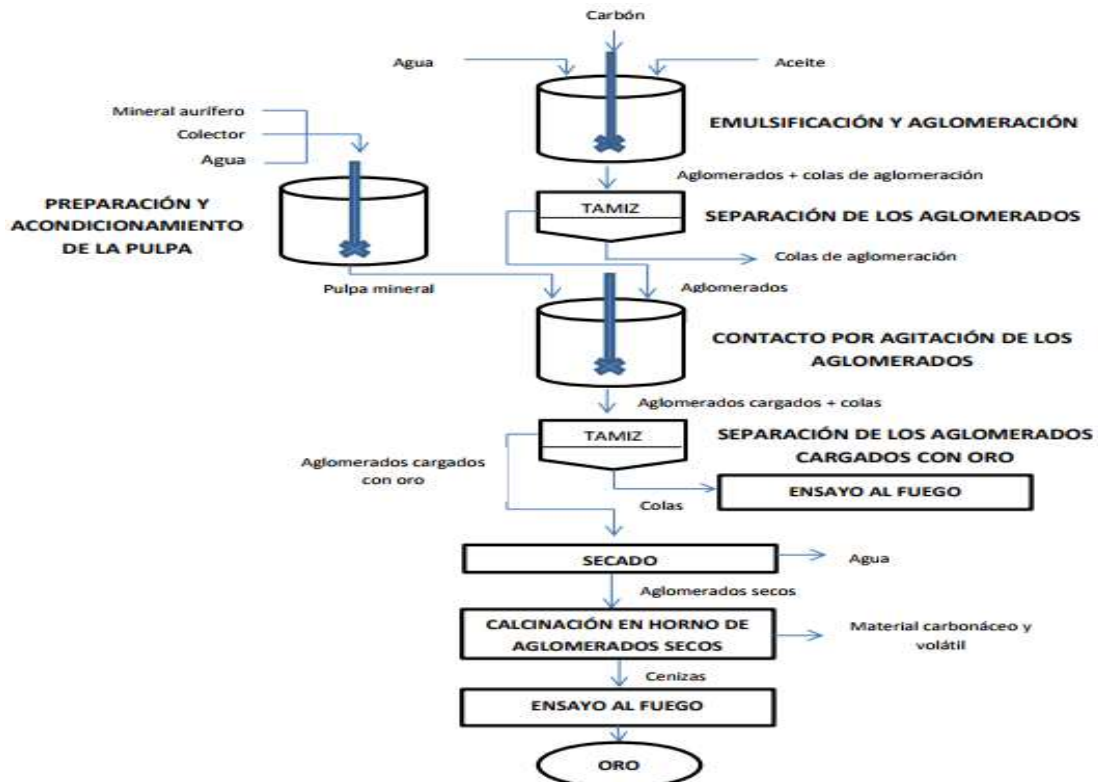
⁴ MADS, Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Proyecto: contribución a la construcción de un plan estratégico regional para la reducción del uso de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (ASGM, SIGLAS EN INGLÉS). [En línea]. Disponible en internet: https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosAmbientalesySectorialyUrbana/pdf/mercurio_Sinopsis_Nacional_de_la_ASGM.pdf.

⁵ *Ibíd.*

1. ANTECEDENTES

El proceso CGA (coal-gold agglomeration) fue desarrollado por British Petroleum (BP) a principio de los años ochenta⁶, como alternativa a los procesos convencionales de cianuración y especialmente amalgamación, para la extracción de oro. Tal proceso permite obtener partículas de oro, a partir de la suspensión de mineral y aglomerados formados por carbón y aceite. La Figura 1 muestra el diagrama de flujo general del proceso CGA.

Figura 1. Etapas del proceso CGA.



Fuente. E.M. Córdoba. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón-aceite- una tecnología limpia en la extracción del oro.

⁶ House, CI Townsend, IG, Veal, C J, Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process (GCA) process, International Mining, 1988.

El proceso CGA, usa la fisicoquímica de superficies, basándose en las características de las partículas de oro (hidrofobicidad/oleofilicidad). El proceso recupera de la pulpa mineral las partículas de oro hidrofóbicas sobre los aglomerados de carbón y aceite previamente formados, los cuales una vez cargados, son separados de la pulpa y llevados a calcinación durante el tiempo necesario para obtener cenizas enriquecidas en Au, que posteriormente son fundidas para generar lo que comúnmente se conoce como botón de oro.⁷

Son diversas las variables que afectan el resultado de la primera etapa del proceso CGA, tal como la naturaleza y las proporciones de aceite y carbón usados para la obtención de los aglomerados. En una de las primeras investigaciones realizadas sobre el tema, Marciano y Costa (1994) evaluaron la capacidad aglomerante de sustancias tales como aceite diesel, queroseno y aceites vegetales. En este trabajo se usaron tres materiales que contenían oro: una mezcla artificial de arena y partículas de oro, un concentrado gravimétrico y colas de concentración gravimétrica. Los mejores resultados (90% de recuperación de oro) fueron comparables a los obtenidos por amalgamación⁸.

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 de carbón. En la contactación (aglomerados/mineral) se debe tener en cuenta que la recuperación de oro es afectada por factores como la resistencia y la estabilidad de los aglomerados; igualmente, existen otros parámetros de los que depende la eficiencia del proceso, tal como las asociaciones minerales del oro y su grado de liberación, el tipo y la cantidad de colector, la relación de aglomerados/mineral y el

⁷ *Ibíd.*

⁸ MARCIANO, A., COSTA, L.S.N., LINS, F.F., Utilization of coal-oil agglomerates to recover gold particles. *Minerals Engineering* 7, 1401-1409.

tiempo de contactación. X.Q. Wu y col.⁹ concluyeron que en la etapa de contactación, la adición de colectores mejora la eficiencia del proceso ya que con ello se incrementa el carácter hidrofóbico del mineral.

R.J Gochin, A.J, Monhemius en 2003 ¹⁰, presentaron un estudio de la adhesión de partículas de oro a los aglomerados de carbón-aceite después de varios ciclos de contacto (entre la pulpa mineral y los aglomerados propiamente dichos). El análisis se llevó a cabo mediante imágenes obtenidas por la aplicación de microscopia electrónica de barrido (SEM) para tiempos de contacto de 5 min, 1 h y 5 h. Los análisis evidenciaron que tanto la composición como la estructura, o morfología superficial de los aglomerados, cambian durante el proceso de carga de los aglomerados de oro, donde para un solo contacto a largo plazo, o con múltiples ciclos de contacto, las partículas de oro tienden a entrar al interior de los aglomerados debido a las deformaciones estructurales causadas por los impactos resultantes de la etapa de agitación.

C.A. Hinojosa, D.F. Montoya y D.L. Pinzón¹¹ evaluaron el efecto de la mineralogía de cuatro minerales auríferos filonianos en el rendimiento del proceso CGA. Los autores determinaron que la presencia de alto contenido de sales solubles en los minerales promueve la aglomeración indiscriminada de las partículas minerales, minimizando así la eficiencia del proceso CGA. Así mismo concluyeron que los bajos tenores de oro y la asociación del metal precioso a sulfuros limitan su recuperación.

⁹ WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS, A.J., The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. *Minerals Engineering* 17, 33-38 176-197.

¹⁰ ANDERSON E. L. MLAKI, JAMIDU H. Y. KATIMA, HENRY T. KIMWERI, Effect of Gangue Minerals on Hydrophobic Recovery of Gold. *Scientific Research*, 5, 316-321.

¹¹ HINOJOSA C.A., MONTOYA D.F. y PINZON D.L., Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físicoquímicas. Programa ingeniería de materiales.

J.G. Cantillo¹² evaluó la influencia del pH y de las sales solubles, comúnmente encontradas en minerales auríferos colombianos, sobre la recuperación de oro con aglomerados de carbón – aceite, para lo cual utilizó un mineral sintético compuesto de arena y partículas de oro, bajo diferentes condiciones de pH y contenido de sales disueltas. Los resultados evidenciaron que las sales solubles que prevalecen en los minerales auríferos colombianos son sulfatos de calcio, hierro y zinc. Independientemente del tipo y concentración de los iones presentes en la pulpa mineral, la recuperación de las partículas de oro sobre aglomerados carbón-aceite es favorecida a pH 5 en la solución. También encontró que el aumento en la concentración de las sales en la pulpa mineral favorece la recuperación de oro sobre los aglomerados carbón-aceite, por efecto del aumento de la adsorción de iones sobre la superficie de las partículas de oro, lo que conlleva a un aumento en la hidrofobicidad del metal precioso.

Teniendo en cuenta lo anterior, el propósito del presente trabajo de grado fue evaluar si las especies presentes en los minerales de aluvión colombiano limitan o favorecen la recuperación del oro a través del proceso CGA.

¹² CANTILLO, JOSE GUSTAVO. Estudio del efecto de la variación del pH y la presencia de sales solubles sobre la recuperación de oro en el proceso CGA. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería de materiales.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Caracterizar desde un punto de vista químico, mineralógico, metalúrgico y fisicoquímico dos minerales auríferos de aluvión colombianos, a fin de establecer el efecto de sus características sobre el desempeño del proceso CGA.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Evaluar las características químicas, fisicoquímicas y mineralógicas de dos minerales auríferos de aluvión colombianos con diferente origen.
- Determinar las diferencias en las características metalúrgicas de los dos minerales mediante las pruebas de cianuración en botella y lixiviación diagnóstico.
- Evaluar el desempeño del proceso CGA para la extracción del oro de los minerales de aluvión determinando cómo las diferencias en sus características afectan tal proceso.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

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

3.1 CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA DE LOS MINERALES

3.1.1 Muestras minerales Para el desarrollo del proyecto se utilizaron dos minerales con las especificaciones mostradas a continuación.

Tabla 1. Estado y procedencia de los minerales.

Mina	Departamento	Región	Estado
Bagre	Antioquia	El bagre	Concentrado
Sabana	Santander	Sabana de Torres	Concentrado

Los minerales auríferos de aluvión se sometieron a un análisis granulométrico con base a la normativa ASTM-C136¹³, se tamizaron 100 g de cada mineral, utilizando un Ro-tap y la serie de mallas Tyler 60, 80, 100, 120, 160, 200 y 270, por un tiempo de 16 minutos según lo estipula la norma (2 min por tamiz). Posteriormente se pesó la muestra retenida en cada tamiz (ver anexo A).

Se realizó un proceso de conminución en un molino de bolas para obtener un tamaño pasante Tyler ASTM malla 200 tamaño, determinado previamente como el adecuado para realizar los ensayos a realizar en el proyecto.

3.1.2 Caracterización química y mineralógica En esta etapa se determinó la presencia de especies cristalinas en los minerales mediante Difracción de rayos X

¹³ AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates 2006. ASTM C136-06. Philadelphia, PA, United States. p 1-5.

(DRX), así como la composición elemental con la técnica de Fluorescencia de rayos X (FRX). Las condiciones de cada análisis, junto con la referencia de los equipos usados, se detallan en el anexo B. también se empleó microscopía electrónica de barrido (SEM-EDS) como una herramienta de soporte a la caracterización de los minerales y de los productos del CGA. Igualmente, se determinaron los tenores de metales preciosos por el método de ensayo al fuego, tomando como base la norma ASTM E400¹⁴, tales ensayos se realizaron por triplicado, por lo que los resultados reportados son el promedio junto con el valor de desviación estándar.

3.1.3 Cianuración en botella. El ensayo de cianuración en botella¹⁵ se llevó a cabo por agitación en rodillos durante 72 horas, para la cual se tomaron 500 g de cada mineral, pasante malla 200 y 1000 mL de agua destilada, se envasaron en un recipiente de ámbar y se agitó fuertemente para homogenizar la mezcla, se ajustó el pH con cal hidratada a un valor mayor de 10.5, posteriormente se agregó 1 g de cianuro de sodio, y se colocó en agitación continua en un sistema de rodillos por el tiempo descrito anteriormente. Para los tiempos 2, 4, 8, 24, 48, y 72 horas se tomaron alícuotas de 20 mL, los cuales se filtraron y posteriormente se titularon con nitrato de plata, para calcular la cantidad de cianuro a reponer (según hubiese sido su consumo), tales muestra también se analizaron por espectroscopia de absorción atómica (AA) con el fin de determinar la concentración de metales disueltos.

3.1.4 Lixiviación diagnóstico. Esta prueba se realizó siguiendo el protocolo propuesto por L. Lorenzen¹⁶. El cual se fundamenta en la destrucción secuencial de las asociaciones minerales del oro, seguido de cianuración para determinar el oro liberado en cada etapa de lixiviación. Los agentes lixiviantes se determinaron tomando como base la caracterización mineralógica de los minerales (ver anexo D).

¹⁴ ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2.002

¹⁵ L. ORLANDO AGUIRRE R., JULIO E. PEDRAZA R., VLADIMIR A. ARIAS ARCE manual de laboratorio de metalurgia extractiva I.

¹⁶ LORENZEN, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals engineering 8, 3 (1995) 247-256.

Para estos ensayos se partió de 100 g de cada mineral, 70% pasante malla 200, se añadió agua destilada a razón de 1:1 (l/s) en masa, se agitó durante 30 min, se ajustó el pH con cal hidratada a un valor de 10 o más, luego se agregó 0.1 g de cianuro de sodio, y se colocó en agitación magnética por un lapso de tiempo de 24 horas. Terminado dicho tiempo la pulpa se filtró, guardándose la solución clara para el análisis de oro por espectroscopia de absorción atómica (AA), mientras que los sólidos se lavaron secuencialmente con una solución diluida de cianuro y con agua destilada; cada lavado se realizó con una relación líquido/sólido de 2:1. Seguido se realiza la lixiviación con ácido clorhídrico (32% en peso) a una razón líquido/sólido 2:1 con una temperatura de 80° C por 1 hora, se lavó con agua destilada y se secó por una hora a 60°C; luego de esto se llevó a cabo una nueva etapa de cianuración, utilizando el procedimiento antes descrito.

3.1.5 Caracterización físico-química. A los dos minerales auríferos de aluvión se les midió el pH y la conductividad eléctrica en pulpa, para ello se tomaron 100 mL de agua destilada mezclados con 20 g de mineral pasante malla 80, llevando esta mezcla a agitación magnética a una velocidad de 300 rpm por un intervalo de 30 minutos, se dejó asentar la mezcla durante un periodo de 15 minutos, se filtró la mezcla reposada tomando muestras para medición de pH, conductividad eléctrica, y concentración de sales disueltas. La concentración de los cationes asociados a las sales disueltas (K, Na, Mg, Fe y Ca), se determinó por la técnica de espectroscopía de absorción atómica, mientras que la concentración de fosfatos se midió por la técnica de colorimetría aplicando el método de vanadato molibdato¹⁷. También se determinó la concentración de sulfatos por turbidimetría.

Se aplicó un procedimiento párelo al anterior con el fin de analizar sales disueltas por diferencia de peso, realizando una evaporación de la fase líquida filtrada en muestras con un volumen conocido. Para ello se tomó un vaso de precipitado (con

¹⁷ FEDERATION, W. E., & American Public Health Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.

un procedimiento previo de limpieza y secado) para tener el peso del mismo en seco, se agregó el volumen conocido de la muestra filtrada y se evaporó a una temperatura de 80 °C, luego de evaporado se midió el nuevo peso y se calculó la cantidad de sales disueltas. Todos los ensayos descritos en este apartado se realizaron por triplicado, los resultados que se reportan son el promedio junto con el valor de desviación estándar.

3.2 IMPLEMENTACIÓN DEL PROCESO CGA

Teniendo en cuenta los resultados de un trabajo de grado previo¹⁸ en el cual se concluyó que el pH y las sales disueltas en la pulpa mineral afectan la eficiencia del proceso CGA, se decidió modificar el pH natural de las pulpas para corroborar lo concluido en el trabajo antes mencionado, y en el cual se trabajó con un mineral sintético compuesto de arena y partículas de oro.

El procedimiento utilizado para esta parte de la investigación inició con la formación de los aglomerados de carbón y aceite, para lo cual se preparó una emulsión de agua y aceite, mezclando un volumen de 500 mL de agua y 17 mL de aceite, esta mezcla de agua aceite se llevó a agitación mecánica con una velocidad de 2000 rpm por un tiempo de 5 minutos; inmediatamente después se agregaron 50 g de carbón y se mantuvo la agitación durante 10 minutos más, para formar los aglomerados. La segunda etapa de los ensayos consistió en la puesta en contacto de los aglomerados con el mineral, para lo cual se prepararon pulpas minerales con 250 mL de agua y 50 g de mineral y se modificó el pH según lo requerido, además se utilizó un colector para favorecer la hidrofobicidad de los metales preciosos, específicamente se adicionaron 200 µl de Aerofloat 208 prometer (mezcla de sales de ditiofosfato en agua), el tiempo de acondicionamiento de las pulpas fue de 5

¹⁸ CANTILLO, JOSE GUSTAVO. Estudio del efecto de la variación del pH y la presencia de sales solubles sobre la recuperación de oro en el proceso CGA. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería de materiales.

minutos, bajo agitación mecánica a una velocidad de 600 rpm. A las pulpas acondicionadas se le agregó 50 g de los aglomerados previamente formados, manteniendo la agitación por un tiempo de 45 minutos; una vez finalizado dicho tiempo, los aglomerados cargados se separaron de las colas minerales con ayuda de un tamiz. Luego del secado de los aglomerados y de las colas, se determinó su contenido de oro y plata mediante análisis por ensayo al fuego, según norma ASTM-E400¹⁹. A partir de estos resultados, se determinaron los índices metalúrgicos de recuperación y eficiencia del proceso CGA para cada uno de los minerales.

Adicionalmente, los aglomerados obtenidos luego de su contacto con las pulpas minerales fueron analizados por microscopía electrónica de barrido para corroborar la adhesión de las partículas minerales sobre su superficie, así mismo se tomaron fotografías de los aglomerados con el fin de determinar su tamaño promedio, para lo cual se empleó el software Digimizer 4.3.0.

¹⁹ FEDERATION, W. E., & AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 CARACTERIZACIÓN GEOMETALÚRGICA DE LOS MINERALES

4.1.1 Composición elemental. En la Tabla 2 se presentan los resultados obtenidos por FRX para los dos minerales de estudio donde los elementos que se reportan con unidad de [mg/kg] son elementos minoritarios:

Tabla 2. Resultados obtenidos por FRX.

Elemento	Bagre	Sabana
Fe	3.55%	2.60%
S	0.12%	0.06%
Si	36,09%	34.77%
Al	2.33%	6.63%
K	1.40%	2.93%
As	33 mg/Kg	-
Mg	0,05%	0,43%
Ti	0,43%	0,24%
P	0.19%	0,28%
Zn	59 mg/Kg	58 mg/Kg
Ca	0,05%	0,44%
Mn	-	0.03%
Cu	0,02%	56 mg/Kg
Zr	6 mg/Kg	0,02%
Cr	0,02%	0,01%
Ni	37 mg/Kg	45 mg/Kg
Ag	0,06%	-
Co	-	-
Sr	8 mg/Kg	93 mg/Kg
V	-	95 mg/Kg
Na	0,05%	1.11%
Ba	-	0,07%
Nb	-	10 mg/Kg

Los resultados de la Tabla 2 evidencian que, sin tener en cuenta el oxígeno, los principales elementos que constituyen los dos minerales son silicio, aluminio, potasio y hierro; lo cual es concordante con la naturaleza de los minerales de aluvión, en los cuales los aluminosilicatos son las especies minerales que prevalecen.

En este mismo sentido, se resalta el bajo contenido de azufre en los minerales, 0.12% y 0.06% para los minerales Bagre y Sabana respectivamente, lo que indica un mínimo contenido de minerales sulfurados. Entre los elementos secundarios se pueden destacar titanio, calcio, sodio, magnesio y fosforo.

4.1.2 Fases cristalinas. En la Tabla 3 se listan las especies cristalinas presentes en los minerales, las cuales fueron identificadas con ayuda de la técnica DRX. Los difractogramas correspondientes se presentan en el anexo C.

Tabla 3. Fases cristalinas presentes en los minerales identificados por DRX.

Fase cristalina	Formula Química	Bagre	Sabana
Cuarzo	SiO ₂	-	X
Cuarzo alfa	SiO ₂	X	-
Albita tratada térmicamente	NaAlSi ₃ O ₈	-	X
Zircón	ZrSiO ₄	X	-
Ortoclasa	KAlSi ₃ O ₈	-	X
Ilmenita	Fe ²⁺ Ti ⁴⁺ O ₃	X	-
Ilmenita alfa	Fe ²⁺ Ti ⁴⁺ O ₃	X	-
Hematita alfa	Fe ₂ O ₃	X	-
Magnetita	Fe ²⁺ Fe ³⁺ ₂ O ₄	X	-
Moscovita-2M	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	-	X
Moscovita- 2 MI	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂	X	-
Microclina	KAlSi ₃ O ₈	X	X
Clinocloro	(Mg,Fe ²⁺) ₅ Al((OH) ₈ /AlSi ₃ O ₁₀)	-	X
Clinocloro – I MIIB	(Mg,Fe ²⁺) ₅ Al((OH) ₈ /AlSi ₃ O ₁₀)	X	-
Magnesiohornblenda	(Ca ₂ [Mg ₄ (Al,Fe ³⁺)	X	X
Cristobalita	SiO ₂	X	-
Phillipsita(NH4)	(Ca,K,Na) ₆ (Si ₁₀ Al ₆)O ₃₂ ·12H ₂ O	-	X
Caolinita-1^a	Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄	-	X

Los resultados presentes en la Tabla 3 concuerdan con lo inferido a partir del análisis elemental de los minerales, en el sentido de que los mismos están constituidos por aluminosilicatos, tales como cuarzo, albita, ortoclasa, moscovita, etc. Se destaca también la presencia de hematita, magnetita e ilmenita en el mineral Bagre, lo que concuerda con el hecho de que el hierro y el titanio son los principales elementos secundarios en dicho mineral.

4.1.3 Tenores de metales preciosos en los minerales. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al realizar el ensayo al fuego a los dos minerales para obtener su ley de oro y plata correspondiente.

Tabla 4. Ley de oro (Au) y plata (Ag) de los dos minerales estudiados, obtenidos por el método de ensayo al fuego.

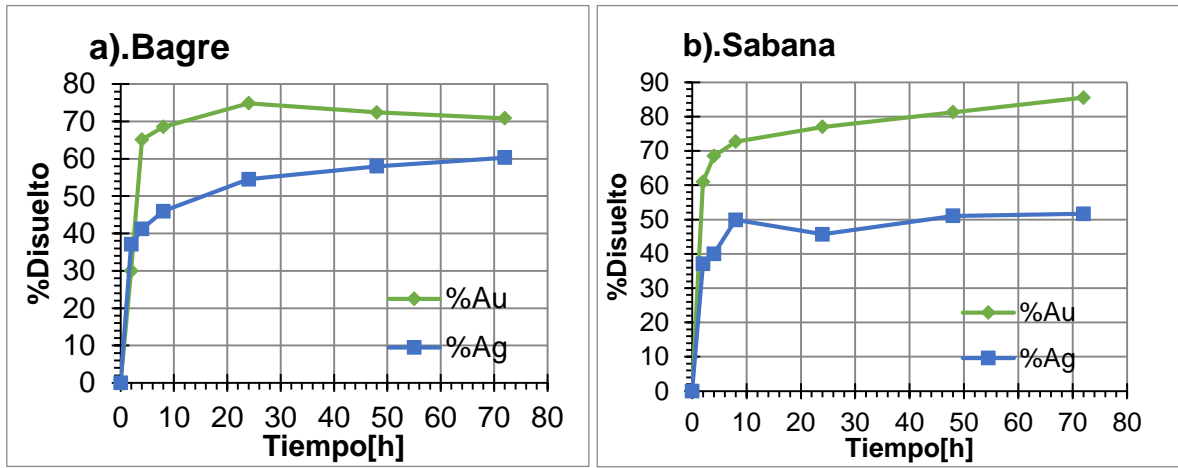
Mineral	Ley Au[g/ton]	Ley Ag[g/ton]
Bagre	155±3.7	54.2 ± 0.8
Sabana	56.6 ± 2	19± 6.8

Los resultados indican que para ambos minerales el contenido de oro es muy superior, casi el triple, al de la plata. Así mismo, el contenido de metales preciosos en el mineral Bagre supera ampliamente al de Sabana, dado que los tenores para este último son 56.6 g Au/ton y 19 g Au/ton, mientras que para el primero alcanzan valores de 155 g Au/ton y 54.2 g Au/ton. Tal diferencia podría generar una respuesta diferente en la recuperación de los metales preciosos por el método CGA, teniendo en cuenta que la saturación de la superficie de los aglomerados constituye una limitante del proceso²⁰.

4.1.4 Grado de lixiviabilidad de los minerales. A continuación, en la Figura 2, se presentan los resultados de los ensayos de cianuración en botella para los dos minerales estudiados.

²⁰ 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 línea]. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress. 2000. p. C8a-6 – C8a-7.

Figura 2. Cinética de lixiviación de oro con cianuro durante 72 horas para los minerales Bagre (a) y Sabana (b).



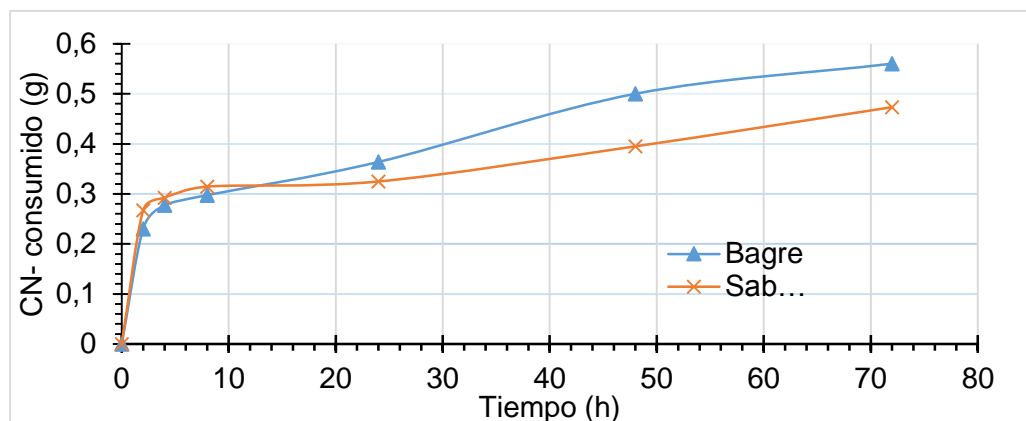
Para el mineral Bagre (Figura 2a) se observa una cinética rápida para los primeros tiempos (hasta 4h), alcanzándose en dicho tiempo un 65% de disolución de oro y 41% de disolución de plata. Posteriormente la cinética se ralentiza llegándose a valores máximos de disolución de 70% de oro y 60% para la plata al cabo de 72h de iniciada la lixiviación del mineral. Tal comportamiento cinético se relaciona ya sea con la formación de capas pasivantes sobre la superficie del oro o con el agotamiento de partículas de oro y plata libres, es decir que una porción de los metales preciosos estaría asociada a silicatos u otros de los óxidos presentes en el mineral.

Por su parte, las curvas cinéticas para el mineral Sabana muestran un comportamiento similar al del mineral Bagre, alcanzándose valores máximos de disolución de 86% de oro y 52% de plata en 72h. Estos resultados indicarían que el oro de este mineral está mayormente libre mientras que casi la mitad de la plata estaría asociada a silicatos u otros óxidos presentes en el mineral. A pesar de la presencia de óxidos de hierro en los minerales, los cuales tienen carácter cianicidas,

al competir con los metales preciosos por el oro²¹, las cinéticas de disolución rápidas en las primeras horas de lixiviación permiten inferir que la presencia de especies cianicidas en los minerales no constituyen la limitante del proceso de lixiviación de estos minerales.

Lo anterior es sustentado por los valores de consumo de cianuro (ver Figura 3), ya que para ambos minerales el mayor consumo de cianuro se presenta en los primeros tiempos de lixiviación, en los cuales se tiene también las mayores cinéticas de disolución de los metales preciosos.

Figura 3 Evolución con el tiempo del consumo de cianuro libre durante la cianuración de los minerales Bagre (a) y Sabana (b).



Teniendo en cuenta los anteriores resultados y la clasificación de los minerales de oro de acuerdo a su lixivabilidad propuesta por La Brooy²²(ver Tabla 5), el mineral Bagre, con un máximo de disolución de Au de 71%, se clasificó como “medianamente lixiviable” mientras que el mineral Sabana, en el cual se alcanzó una disolución de Au del 86%, se clasifica como “altamente lixiviable”.

²¹ Baum, W. 1988. Mineralogy related processing problems of epithermal gold ores. Páginas3-20 en Process Mineralogy VIII. Editado por D.J.T. Carson y A.H. Vassiliou. Warrendale, PA: TMS

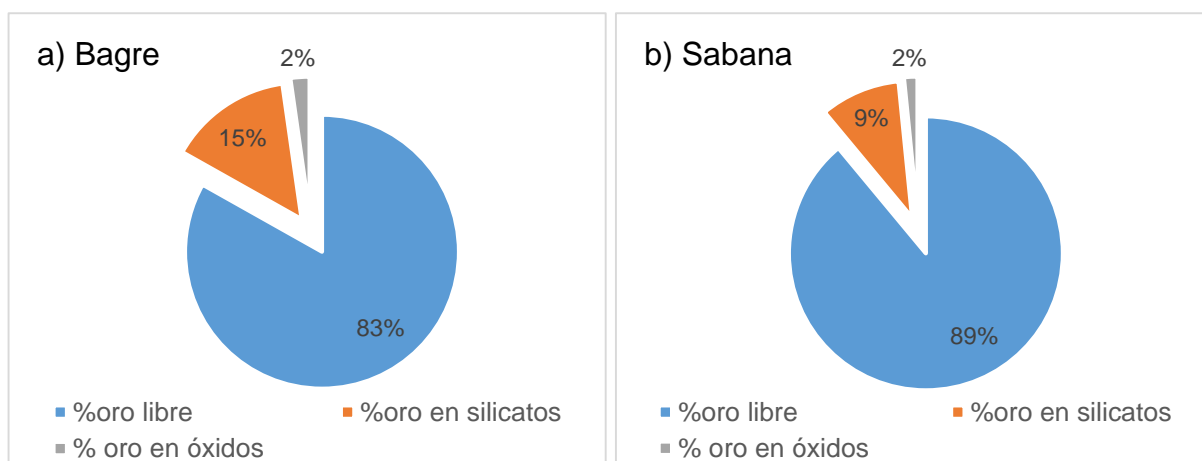
²² La Brooy S.R et al. Review of gold extraction from ores 1994 En: Minerals Engineering, Vol. 7, Issue 10, (oct. 1994). p 1.213-1.241.

Tabla 5. Clasificación de los minerales de oro según S.R. La Brooy²³

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

4.1.5 Lixiviación diagnóstico. En la Figura 4 se reportan los resultados obtenidos por la prueba de lixiviación diagnóstico realizada a los dos minerales, el esquema muestra cómo se distribuye el oro de forma libre y asociado a otros minerales.

Figura 4. Lixiviación diagnóstico. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en los minerales Bagre (a) y Sabana (b).



Como era de esperarse, teniendo en cuenta la naturaleza de los minerales, la mayor parte del oro se encuentra en forma libre (83% para Bagre y 89% para Sabana), mientras que la principal asociación del oro lo constituyen los silicatos (15% para Bagre y 9% para Sabana). Finalmente, la cantidad de oro asociado a óxidos metálicos es tan solo del 2% para ambos minerales.

Estos resultados explican las tendencias de las curvas cinéticas de cianuración, de acuerdo con las cuales los máximos valores de disolución de oro se alcanzan durante las primeras horas de lixiviación, correspondiendo al oro libre de los

²³ Ibít.

minerales. Por su parte el oro no disuelto es el asociado a óxidos y principalmente a silicatos.

4.1.6 Análisis de sales disueltas desde los minerales. En la Tabla 6 se presenta los resultados de sales disueltas, pH y conductividad eléctrica en las pulpas de los dos minerales. Como blanco de comparación en la tabla también se indican los valores de pH y conductividad eléctrica del agua destilada utilizada para las pruebas.

Tabla 6. Resultados de pH, conductividad y sales disueltas en las pulpas.

Mineral	pH	Conductividad [μ S/cm]	Sales Disueltas g/L
Bagre	7,07 \pm 0,07	107.7 \pm 3,66	0.064 \pm 0.008
Sabana	8,06 \pm 0,02	156.46 \pm 0.2	0.077 \pm 0.002
Agua	6,4	1.10	-

Los resultados indican que la disolución de sales desde los minerales con llevan a un aumento de la basicidad del agua, así como de la conductividad, siendo estos parámetros mayores para el mineral Sabana comparada con el Bagre. No obstante, comparativamente con lo que ocurre en pulpas de minerales filonianos²⁴, la cantidad de sales disueltas, así como las variaciones en los valores de conductividad asociadas son pequeñas en los minerales de aluvión.

En la Tabla 7 se presentan los resultados del análisis de aniones y cationes para cada pulpa mineral. Tales resultados indican que las sales presentes en los minerales contienen fosfatos y sulfato, asociados a varios cationes, principalmente calcio.

²⁴ HINOJOSA C.A., MONTOYA D.F. y PINZON D.L., Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físicoquímicas. Programa ingeniería de materiales.

Tabla 7. Resultado de análisis de aniones y cationes presentes en las sales disueltas de los dos minerales.

Minerales	Aniones		Cationes				
	Fosfatos [ppm]	Sulfatos [ppm]	Mg [ppm]	Fe [ppm]	K [ppm]	Ca [ppm]	Na [ppm]
Bagre	8.63	34.60	1.58	10.02	0.21	149.53	3.41
Sabana	10.58	19.43	1.33	2.50	4.08	61.71	0.36

4.2 RECUPERACIÓN DE METALES PRECIOSOS A TRAVÉS DEL PROCESO CGA

Tal como se mencionó en el apartado metodológico, los ensayos de recuperación de oro a través del proceso CGA se llevó a cabo variando el pH de las pulpas minerales con el fin de evaluar si la presencia de sales ácidas, que puedan estar presentes en otros minerales, afecta la eficiencia del proceso. Los valores de pH estudiados fueron 3, 5 y el natural de las pulpas minerales, es decir 7.07 y 8.06 para los minerales Bagre y Sabana respectivamente.

En las figuras 5 y 6 se presentan, respectivamente, las fotografías y los tamaños promedios de los aglomerados carbón-aceite antes y después de su contacto con las pulpas minerales. Se observa que los aglomerados originales (Figura 5a) tienen una forma ovalada más que esférica y que su diámetro medio es de 4.3 mm (Figura 6), no obstante, tales características de los aglomerados se ven afectadas por su contacto con las pulpas minerales. Por efecto de su contacto con las pulpas con pH neutro (7) o ligeramente básico (8), correspondientes a los valores de pH naturales en las pulpas de los minerales Bagre y Sabana, los aglomerados se hacen más esféricos y de mayor tamaño (5.6 mm y 6.5 mm para Bagre y Sabana respectivamente). Tal aumento de tamaño se debe en algún grado a la adhesión de partículas minerales sobre la superficie de los aglomerados, pero principalmente a la unión de aglomerados para conformar uno de mayor tamaño. Los resultados también parecen indicar que al aumentar la acidez de la pulpa la capacidad de unión

de los aglomerados disminuye, dado que el tamaño de ellos, luego del contacto con la pulpa, es menor que para el caso de las pulpas con pH natural. Tal tendencia es especialmente evidente con el mineral Sabana, ya que los tamaños finales de los aglomerados (3.4 mm para pH 5 y 2.7 mm para pH 3) son menores al original (4.3 mm), lo cual indicaría la disgregación de los aglomerados por efecto de la degradación del aceite (pérdida de su poder aglomerante) por su reacción con el ácido presente en la pulpa. Tal situación corresponde a una de las primeras etapas de la refinación de los aceites vegetales, conocida como desgomado, en la cual se eliminan los fosfolípidos del aceite crudo con ácido fosfórico o ácido cítrico (ver Figura 7), no obstante, tal reacción también ocurre con otros ácidos²⁵.

²⁵ BLANCO. (2007). Diseño de una planta piloto de refinación de aceites vegetales. Universidad de Cádiz (España). Facultad de Ciencias. Programa de Ingeniería Química.

Figura 5. Fotografías de los aglomerados antes (a) y después de su contacto con las pulpas minerales a pH 3 (b), 5 (c) y 7 (d) para Bagre y 3 (e), 5 (f) y 8 (g) para Sabana.

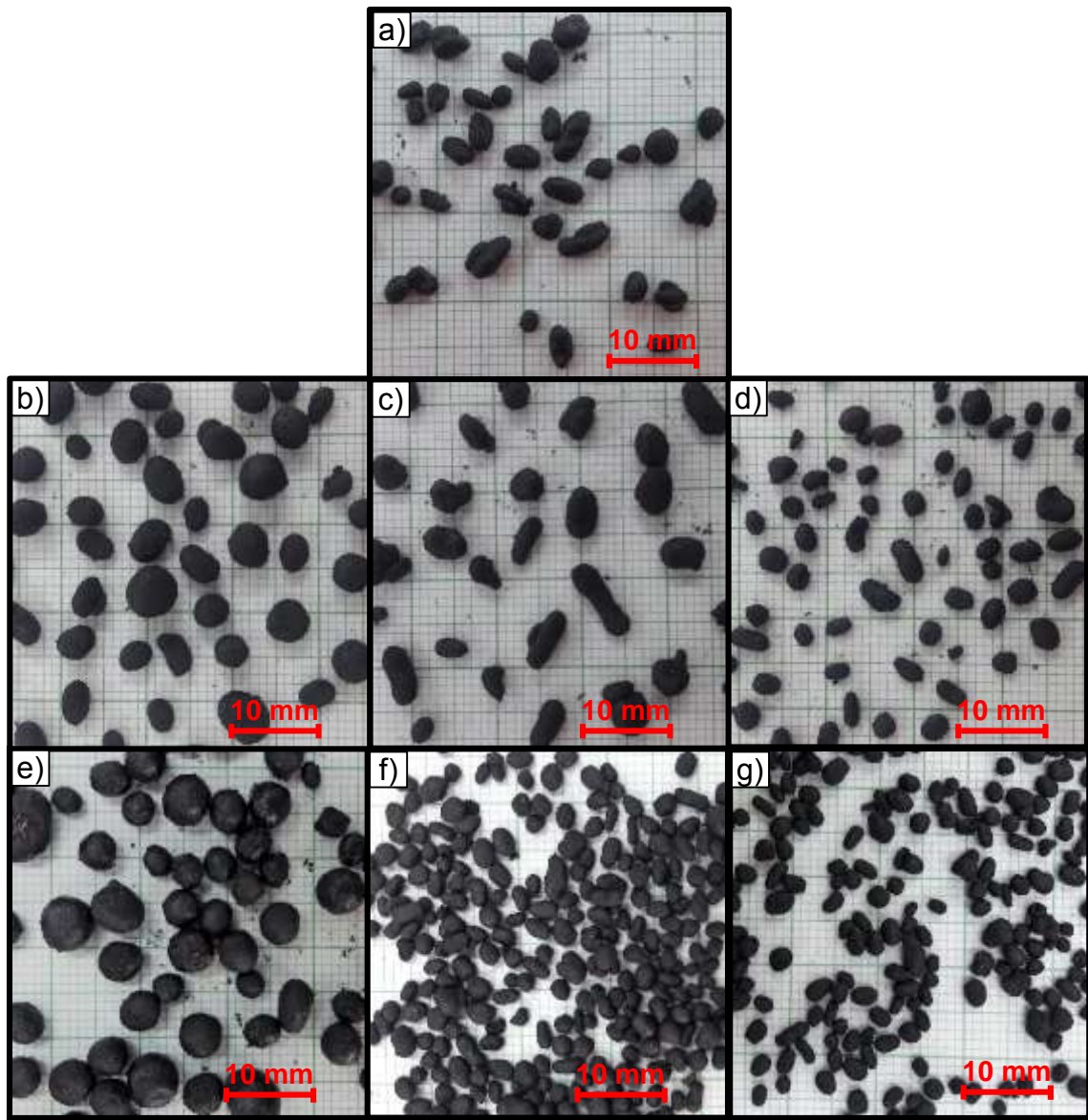


Figura 6. Tamaño promedio de los aglomerados.

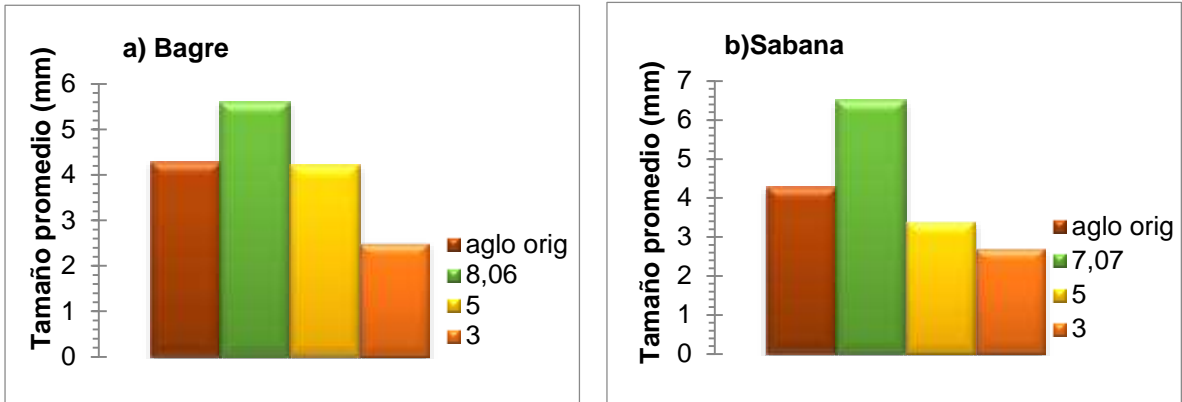
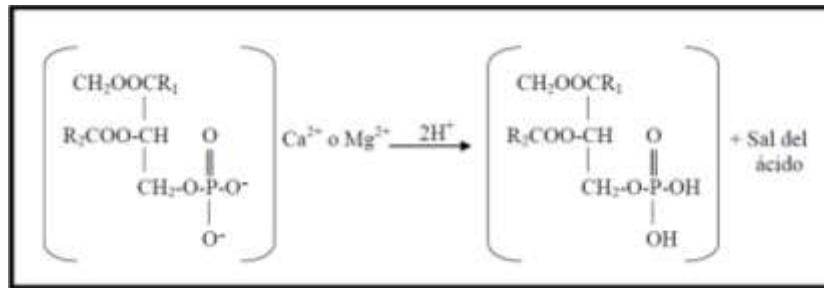


Figura 7. Reacción de conversión de fosfolípidos no hidratables del aceite en hidratables en presencia de un ácido²⁶.



En la Figura 7 se presentan los índices metalúrgicos obtenidos para los diferentes ensayos de extracción de oro y plata a través del proceso CGA. Los índices calculados fueron la Recuperación y la Eficiencia, para lo cual se utilizaron las siguientes formulas²⁷:

Recuperación:
$$R = \frac{c \cdot t_c}{A \cdot t_a}$$

Rendimiento de separación:
$$V = \frac{c}{A}$$

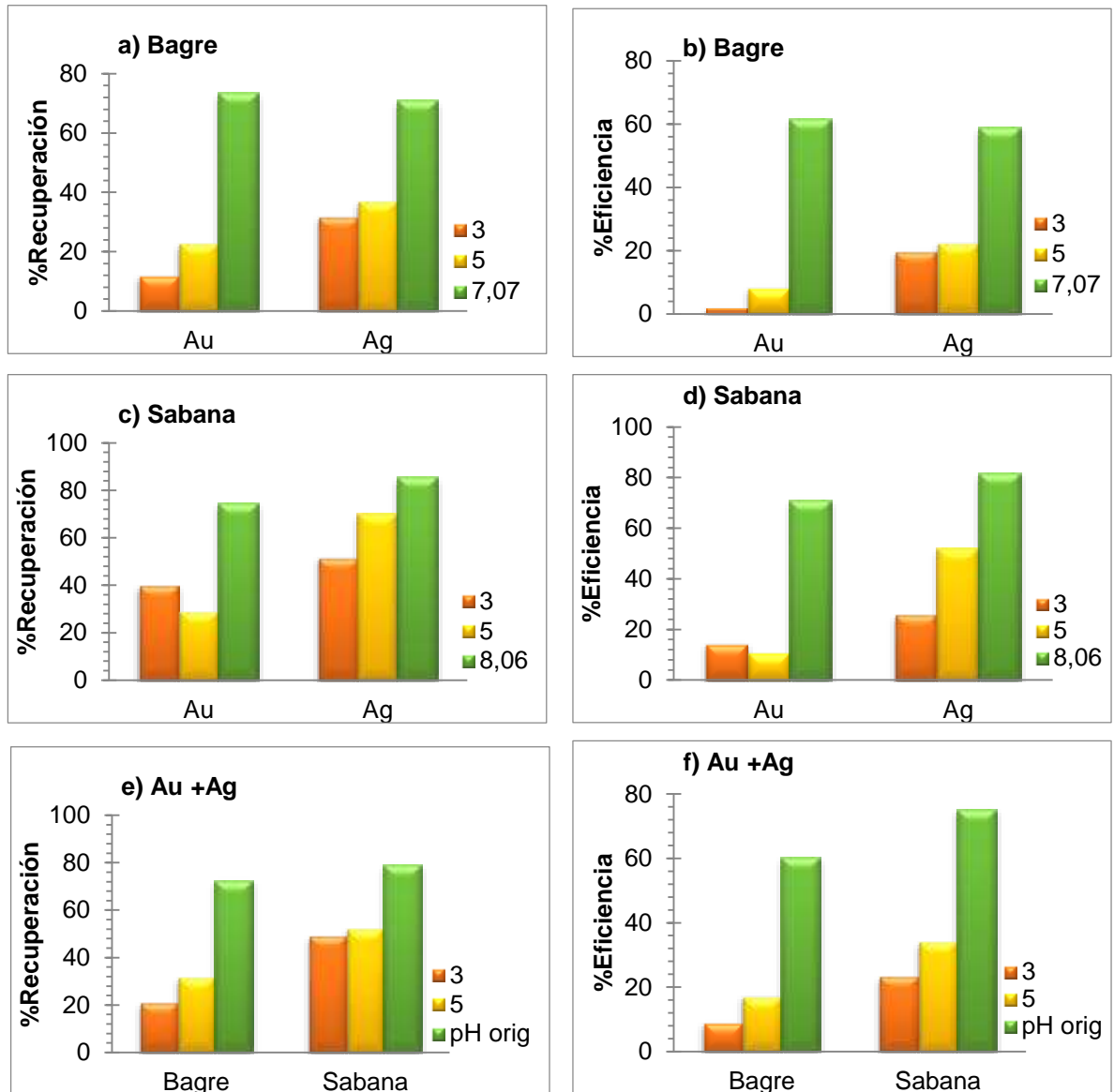
Eficiencia:
$$E = \frac{(R-V)}{(1-V_{ideal})}$$

²⁶ Ibít.

²⁷ BUSTAMANTE, M. O., GAVIRIA, A.C., RESTREPO, O.J. (2007). Notas de clase asignatura Concentración de minerales. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Medellín.

Donde C: masa del concentrado, A: masa de la alimentación, t_c : tenor del concentrado, t_a : tenor de la alimentación, V_{ideal} : rendimiento de separación ideal.

Figura 8. Índices metalúrgicos obtenidos de las pruebas de extracción de metales preciosos a través del proceso CGA.



Los resultados obtenidos para el mineral Bagre muestran claramente que la recuperación de los metales preciosos es favorecida al pH natural de la pulpa (7), alcanzándose recuperaciones de 73% de Au y 71% de Ag (Figura 8a) y una

recuperación combinada (Au + Ag) de 72% (Figura 8e). Por su parte, la eficiencia para estas condiciones de trabajo fue aproximadamente del 60% (Figuras 8b y 8f), lo cual indica que sobre los aglomerados no sólo se adhirieron las partículas de los metales preciosos sino también las de otras especies presentes en el mineral. La disminución del pH hasta 3 conlleva a una fuerte caída en los valores de los índices metalúrgicos, alcanzándose para el oro una recuperación tan sólo del 12% y una eficiencia prácticamente nula, mientras que la recuperación combinada llegó al 21% y la eficiencia al 9%.

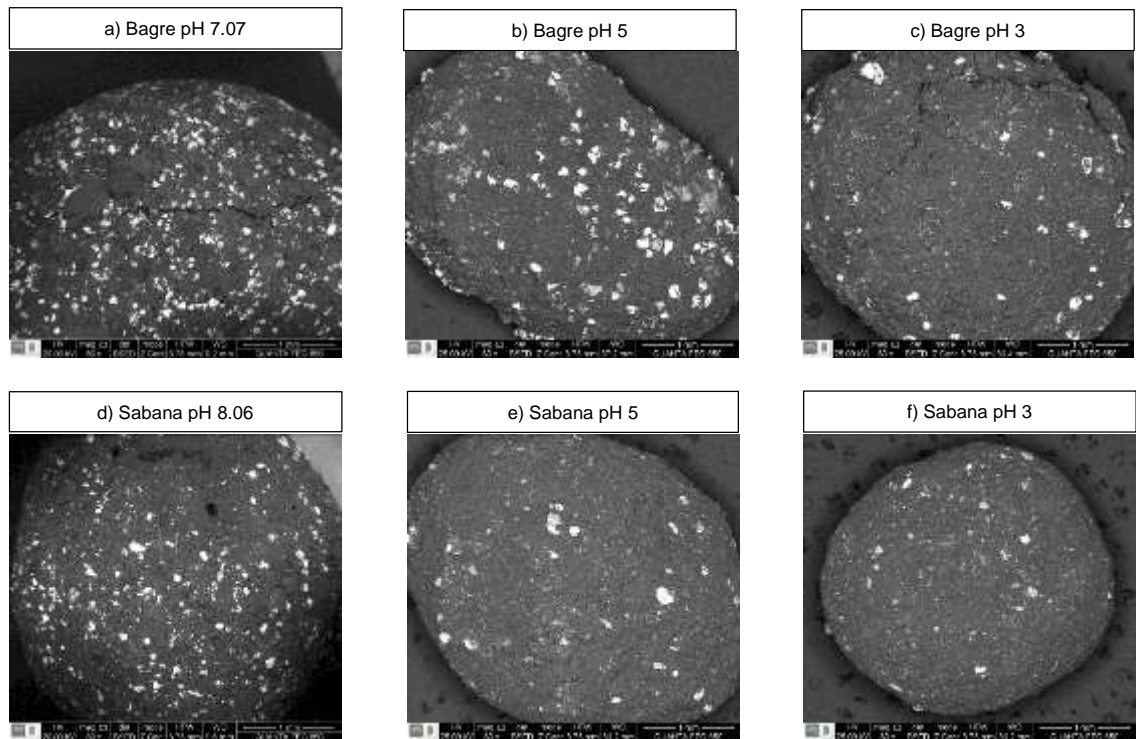
Para el caso del mineral Sabana se encontró un efecto similar al del mineral Bagre para el caso de la plata, no obstante, para el oro la recuperación fue mejor para el pH 3 que para el 5. Sin embargo, la variación de los índices para la extracción combinada de los dos metales es similar a la observada para el mineral Bagre, es decir la extracción de los metales preciosos aumenta a medida que se incrementa el pH hasta 8, alcanzándose valores de 79% de recuperación y una eficiencia del proceso del 75%, valores superiores a los obtenidos para el mineral Bagre.

Estos resultados podrían corroborar lo antes expuesto sobre el efecto que tiene el ácido de la pulpa en la degradación del aceite, al disminuir sus propiedades aglomerantes, lo cual se refleja no sólo en la disminución de la cohesión de las partículas de carbón en los aglomerados, sino también en la disminución de la adherencia de las partículas de los metales preciosos sobre la superficie de estos, lo que finalmente se traduce en una disminución en la recuperación y la eficiencia del proceso.

Finalmente, en la Figura 9 se presentan las micrografías SEM de los aglomerados luego de su contacto con las pulpas minerales. Tales imágenes concuerdan con los resultados antes presentados, en el sentido de que a medida que se disminuye el pH de la pulpa, la adhesión de las partículas sobre los aglomerados también lo hace,

lo cual se refleja en bajos valores de recuperación de los metales y en general de la eficiencia del proceso.

Figura 9. Micrografías SEM de los aglomerados luego del contacto con las pulpas minerales.



De los resultados anteriores se concluye que las condiciones de pH ácidas en la pulpa mineral y la asociación del oro a silicatos y otros óxidos son los factores que limitan la recuperación y eficiencia del proceso CGA para la extracción del metal precioso desde minerales de aluvión.

5. CONCLUSIONES

- La caracterización geometalúrgica de los minerales de aluvión estudiados permite concluir que, en concordancia con su naturaleza, las especies minerales que prevalecen en ellos son aluminosilicato, mientras que el contenido de especies sulfuradas o refractarias es mínimo. No obstante, lo anterior, no todo el oro se encuentra libre en estos minerales, sino también asociado a los óxidos presentes y principalmente a silicatos.
- La disolución de sales desde los minerales de aluvión es baja comparativamente con los minerales filonianos, no obstante, estas generaron un aumento de la conductividad eléctrica y del pH de las pulpas minerales a valores de 7 y 8, indicando la presencia de sales básicas en los minerales.
- Se encontró que al disminuir el pH de la pulpa los aglomerados disminuyen su tamaño durante su contacto para la extracción del oro a través del proceso CGA, lo cual se relacionaría con la pérdida de cohesión entre las partículas de carbón por efecto de la eliminación de fosfolípidos del aceite por su reacción con los grupos ácidos de la solución. Por el contrario, el pH neutro o ligeramente básico de la pulpa genera crecimiento de los aglomerados por unión entre ellos.
- La tendencia a la disgregación de los aglomerados carbón-aceite, durante su contacto con las pulpas ácidas, conlleva a una baja eficiencia del proceso CGA para la extracción de los metales preciosos, dada la disminución de su capacidad aglomerante y de adhesión de las partículas de oro y plata.
- Finalmente, se concluye que el grado de extracción de oro desde minerales de aluvión es similar al alcanzado por el método tradicional de cianuración, estableciéndose como limitantes de ambos procesos, la liberación de las partículas del metal precioso.

6. RECOMENDACIONES

- Se recomienda llevar a cabo estudios que permitan corroborar la degradación del aceite en pulpas ácidas y que disminuye la eficiencia del proceso CGA.
- Se recomienda evaluar el efecto de condiciones fuertemente básicas sobre la eficiencia del proceso CGA para la extracción del oro desde minerales de aluvión.

BIBLIOGRAFÍA

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates 2006. ASTM C136-06. Philadelphia, PA, United States. p 1-5. (s.f.).

ANDERSON E. L. MLAKI, JAMIDU H. Y. KATIMA, HENRY T. KIMWERI, Effect of Gangue Minerals on Hydrophobic Recovery of Gold. Scientific Research, 5, 316-321. (s.f.).

ASTM E 400-02 Standard Test Method for Analysis of Ores, Minerals, and Rocks by the Fire Assay Preconcentration Optical Emission Spectroscopy. 2.002. (s.f.).

ATEHORTÚA E., ALBA MILENA, GAVIRIA C., ANA CECILIA, PEREZ S., JUAN DAVID, Recuperación de oro libre mediante su aglomeración con un agregado carbón - aceite. Boletín de Ciencias de la Tierra [en línea] 2006, (Julio-Sin mes) : [Fecha de consulta: 23 de jun. (s.f.).

Baum, W. 1988. Mineralogy related processing problems of epithermal gold ores. Páginas3-20 en Process Mineralogy VIII. Editado por D.J.T. Carson y A.H. Vassiliou. Warrendale,PA:TMS. (s.f.).

BLANCO. (2007). Diseño de una planta piloto de refinación de aceites vegetales. Universidad de Cádiz (España). Facultad de Ciencias. Programa de Ingeniería Química. (s.f.).

Bustamante, M. O., Gaviria, A.C., Restrepo, O.J. (2007). Notas de clase asignatura Concentración de minerales. Editorial Universidad Nacional de Colombia, Medellín. (s.f.).

CANTILLO, JOSE GUSTAVO. Estudio del efecto de la variación del pH y la presencia de sales solubles sobre la recuperación de oro en el proceso CGA.

Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingeniería de material. (s.f.).

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 línea]. Proceedings of the XXI International Mineral Processing Congress. 2000. p. C8a-6 –C8a-7. (s.f.).

FEDERATION, W. E., & American Public Health Association. (2005). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association (APHA): Washington, DC, USA. (s.f.).

HILSON, G., MONHEMIUS, A.J. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: what prospects for the future? Journal of Cleaner Production, Volume 14, Issue 12, Pages 1158-1167. (s.f.).

HINOJOSA C.A., MONTOYA D.F. y PINZON D.L., Aplicación del proceso CGA a minerales auríferos oxidados: establecimiento de los parámetros metalúrgicos de interés. Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería fisicoquímicas. Programa ingenierí. (s.f.).

L. ORLANDO AGUIRRE R., JULIO E. PEDRAZA R., VLADIMIR A. ARIAS ARCE manual de laboratorio de metalurgia extractiva I. (s.f.).

La Brooy S.R et al. Review of gold extraction from ores 1994 En: Minerals Engineering, Vol. 7, Issue 10, (oct. 1994). p 1.213-1.241. (s.f.).

LORENZEN, L. Some guidelines to the design of a diagnostic leaching experiment. Minerals engineering 8, 3 (1995) 247-256. (s.f.).

MADS, Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Proyecto: contribución a la construcción de un plan estratégico regional para la

reducción del uso de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (ASGM, SIGLAS. (s.f.).

MADS, Sinopsis nacional de la minería aurífera artesanal y de pequeña escala. Proyecto: contribución a la construcción de un plan estratégico regional para la reducción del uso de mercurio en la minería aurífera artesanal y de pequeña escala (ASGM, SIGLAS. (s.f.).

MARCIANO, A., COSTA, L.S.N., LINS, F.F., Utilization of coal–oil agglomerates to recover gold particles. *Minerals Engineering* 7, 1401–1409. (s.f.).

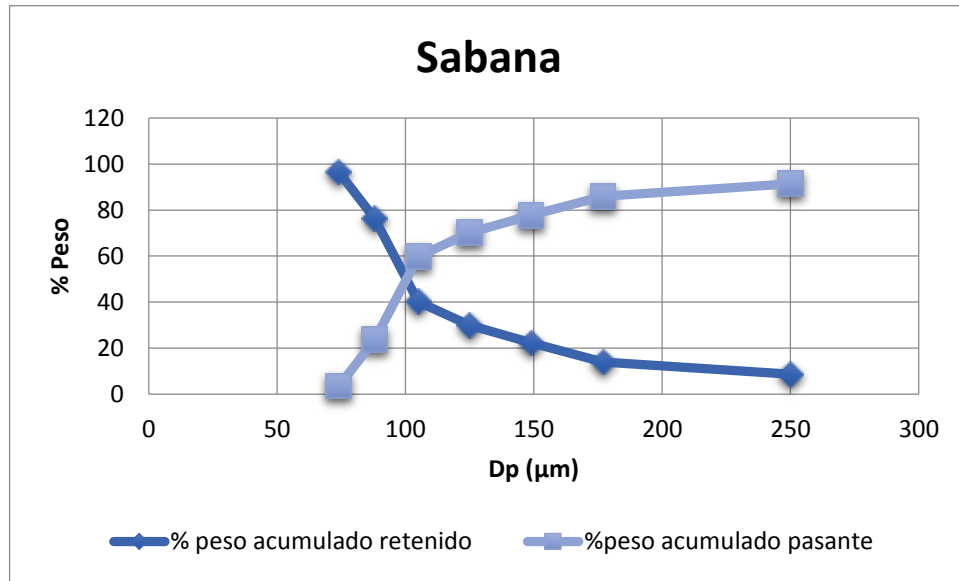
R. DAVIES GEORGE, A. t. (s.f.). a role for alternatives to mercury in small-scale gold mining [en línea] 2014, (octubre): [Fecha de consulta: 23 de junio de 2018] Disponible en: <http://daneshyari.com/article/preview/1015490.pdf>.

WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS, A.J., The adhesion of gold to oil–carbon agglomerates. *Minerals Engineering* 17, 33-38 176–197. (s.f.).

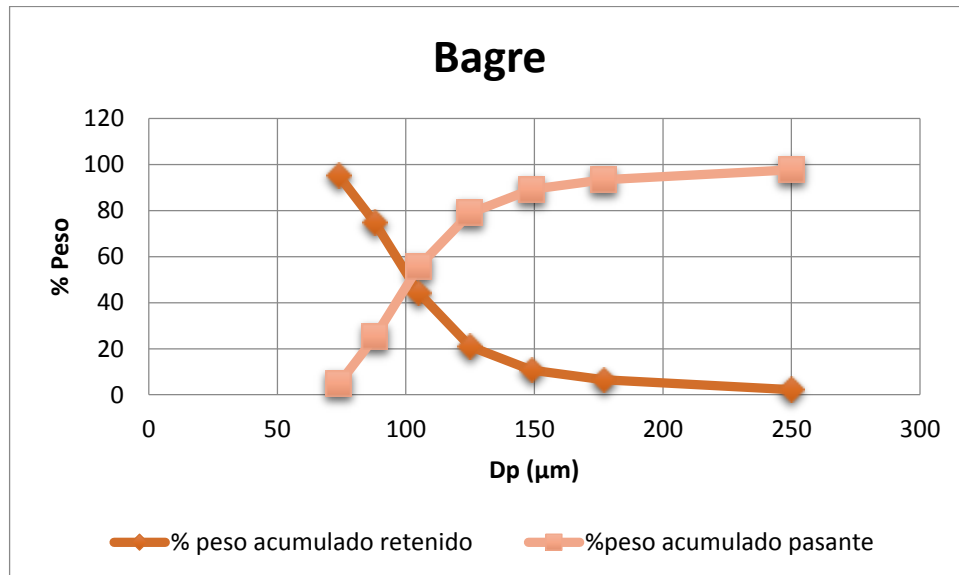
ANEXOS

Anexo A. Granulometría de los Minerales

A.1

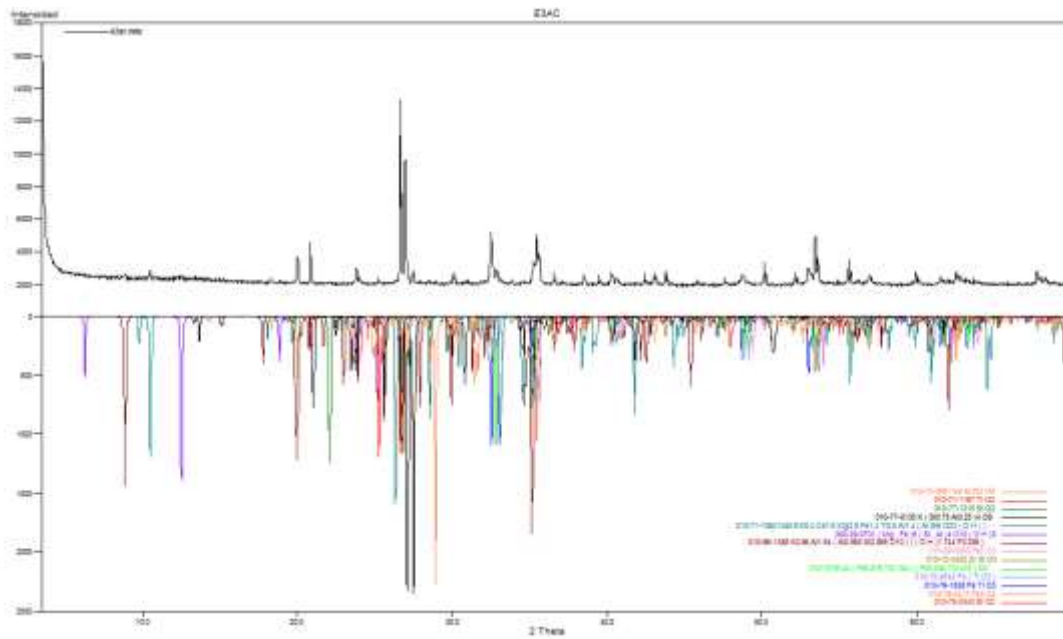


A.2

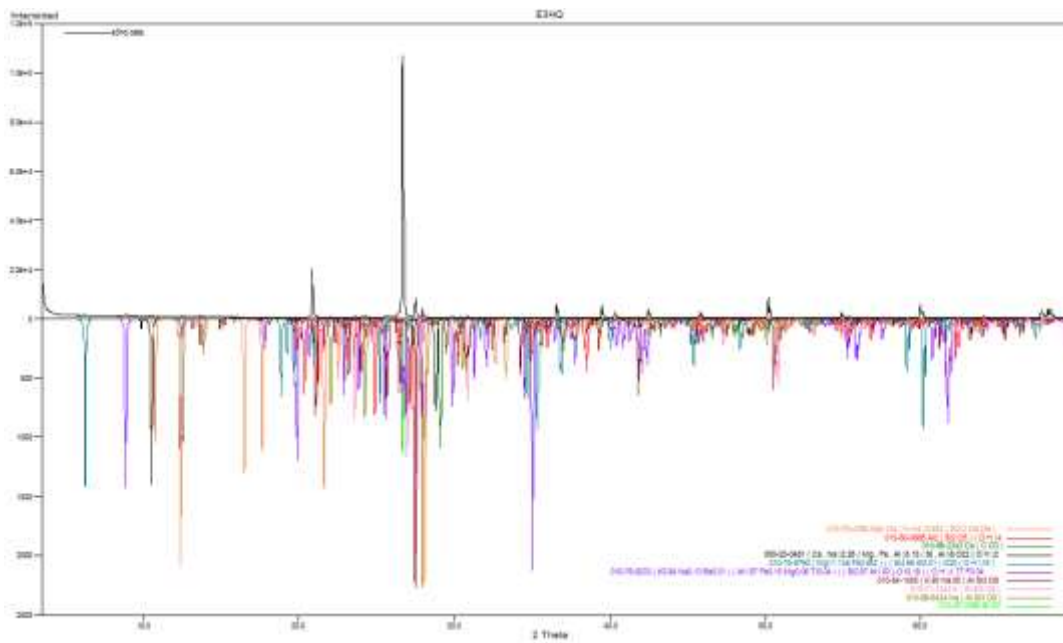


Anexo B. Resultados obtenidos mediante el análisis de DRX

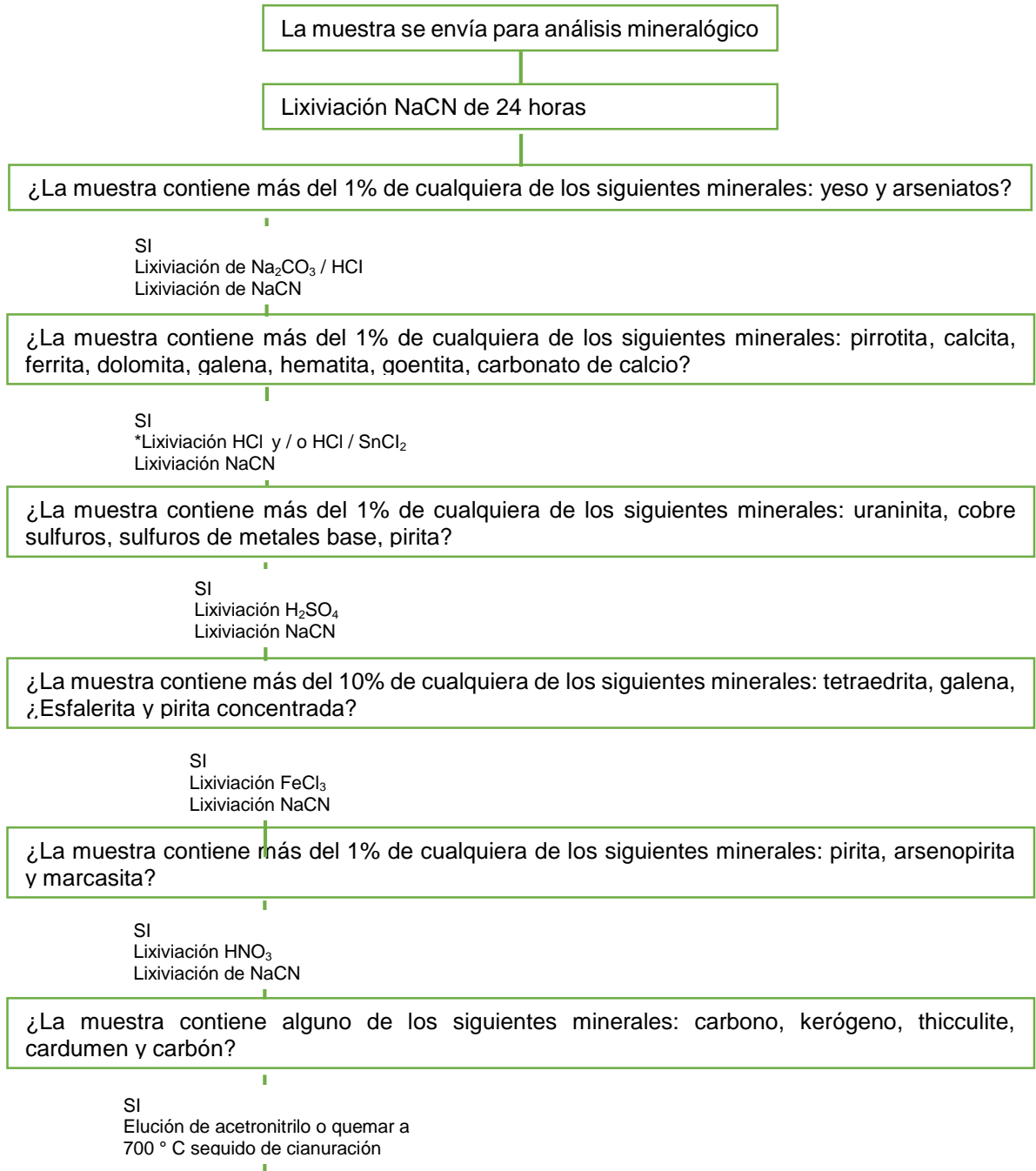
B.1 DIFRACTOGRAMA BAGRE



B.2 DIFRACTOGRAMA BAGRE



Anexo C. Selección de agentes lixiviantes



El residuo se puede destruir con una lixiviación HF (que no se recomienda) seguido de un cianuro

Lixiviación, y / o puede analizarse para determinar el contenido de oro

* Puede repararse con una lixiviación HCl / SnCl₂ si hay más de 5% de calcina y / o hematita presente

Puede ser reemplazado o seguido por una lixiviación FeCl₃ si hay cantidades significativas de esfalerita y tetraedritas presente con galena en la muestra.