

**APLICACIÓN DEL PROCESO CGA A MINERALES AURÍFEROS OXIDADOS:  
ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS METALÚRGICOS DE INTERÉS**

**CARLOS ANDRÉS HINOJOSA FERREIRA  
DANIEL FELIPE MONTOYA YUSTI  
DAVID LEANDRO PINZÓN CASTAÑEDA**

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

**2017**

**APLICACIÓN DEL PROCESO CGA A MINERALES AURÍFEROS OXIDADOS:  
ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS METALÚRGICOS DE INTERÉS**

**CARLOS ANDRÉS HINOJOSA FERREIRA  
DANIEL FELIPE MONTOYA YUSTI  
DAVID LEANDRO PINZÓN CASTAÑEDA**

**Trabajo de grado proyecto de investigación para optar al título de  
Ingeniero Metalúrgico**

**Directores:**

**Dra. ELCY MARIA CÓRDOBA TUTA  
Ingeniera Metalúrgica**

**Dr. PEDRO LUIS DELVASTO ANGARITA  
Ingeniero de Materiales**

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

**2017**

## DEDICATORIA

**A Dios**, le debemos el haber logrado culminar la meta que nos propusimos, fue un camino largo y difícil de transitar pero teníamos la convicción de que delante de nosotros iba ÉL cómo poderoso gigante apoyándonos y fortaleciéndonos en todo momento, comprendiendo a la perfección que cuando damos nuestro mejor esfuerzo Dios nos recompensa y nos da lo que nos hace falta para logra realizar nuestros sueños. . **A nuestras familias** por ser nuestro apoyo incondicional, gracias por ayudarnos en este camino de esfuerzo y sacrificio sin su guía y modelo pulcro de personas no podríamos haber culminado esta etapa. **A nuestros amigos** por estar con nosotros en este arduo camino de tristezas, dificultades y alegrías, darnos soporte mutuo en cualquier circunstancia que se nos presentara y sobrellevarla con nosotros en todas las noches de estudio.

## **AGRADECIMIENTOS**

La lista de agradecimientos sería interminable ya que han sido muchas las personas que han contribuido no sólo en la realización de este proyecto, sino también en nuestro crecimiento como personas e ingenieros. A continuación, agradeceremos a aquellas personas que contribuyeron en la culminación del presente proyecto:

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander por habernos brindado los conocimientos necesarios para culminar este proyecto con éxito. A nuestros directores de proyecto, La Doctora Elcy María Córdoba Tuta y el Doctor Pedro Luis Delvasto Angarita por brindarnos su apoyo, conocimiento y paciencia incondicional y permitirnos culminar esta etapa en nuestras vidas.

Al grupo de investigación 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, Óscar 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 Microscopía, 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

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	16
1. ANTECEDENTES.....	18
2. OBJETIVOS.....	22
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	22
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	22
3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	23
3.1 OBTENCIÓN DE MATERIAS PRIMAS.....	23
3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA-MINERALÓGICA DE LOS MINERALES AURÍFEROS .....	23
3.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA DE LOS MINERALES .....	24
3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS MINERALES.....	25
3.5 ENSAYO DEL PROCESO CGA EXPLORATORIO .....	26
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	28
4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA-MINERALÓGICA.....	28
4.2.1 Composición elemental. ....	28
4.2.2 Composición mineralógica.....	29
4.2.3 Tenores de los minerales.....	30
4.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA.....	31
4.3.1 Lixiviación diagnóstico.. ....	31
4.3.2 Grado de lixiviabilidad de los minerales.....	32
4.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA .....	35
4.4.1 pH, conductividad eléctrica y sales solubles en las pulpas minerales. ....	35
4.5 PROCESO CGA EXPLORATORIO .....	38
5. CONCLUSIONES .....	43
6. RECOMENDACIONES.....	44
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	45

BIBLIOGRAFÍA.....48  
ANEXOS .....52

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Procedencia y estado de los minerales.....	23
Tabla 2. Resultados obtenidos por FRX .....	28
Tabla 3. Resultados de las fases cristalinas presentes en los minerales las cuales se obtuvieron por DRX.....	29
Tabla 4. Ley de oro (Au) y plata (Ag) de los cuatro minerales estudiados, por el método de ensayo al fuego.....	30
Tabla 5. Clasificación de los minerales de oro según S.R La Brooy .....	35
Tabla 6. Resultados de pH, conductividad y concentración de sales disueltas en las pulpas. minerales. ....	36
Tabla 7. Medidas de concentración de los principales aniones y cationes provenientes de las sales disueltas de los minerales. ....	37
Tabla 8. Imágenes aglomerados luego de su contacto con el mineral. ....	38

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Proceso CGA (Aglomeración oro con carbón-aceite/coal-gold agglomeration).....	18
Figura 2. Lixiviación diagnóstica. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en los minerales. ....	31
Figura 3. Curvas cinéticas del ensayo de cianuración en botella para los cuatro minerales. ....	33
Figura 4. Índices metalúrgicos para el proceso CGA exploratorio. ....	40

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Granulometría de los minerales .....	52
Anexo B. Análisis próximo del carbón el Cerrito Santander.....	54
Anexo C. Condiciones operativas de los análisis DRX y FRX .....	55
Anexo D. Resultados obtenidos mediante al análisis de DRX.....	57
Anexo E. Resultados SEM-EDS aglomerados contactados .....	61

## RESUMEN

**TÍTULO:** APLICACIÓN DEL PROCESO CGA A MINERALES AURÍFEROS OXIDADOS: ESTABLECIMIENTO DE LOS PARÁMETROS METALÚRGICOS DE INTERÉS\*

**AUTORES:** Hinojosa Ferreira, Carlos Andrés, Montoya Yusti, Daniel Felipe y Pinzón Castañeda, David Leandro\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Proceso CGA, minerales auríferos oxidados, recuperación de oro, aglomerados carbón aceite.

**DESCRIPCIÓN:** El fin del presente trabajo fue la caracterización de cuatro minerales auríferos oxidados, provenientes de diferentes regiones del país (Antioquia, Bolívar y Santander), para evaluarlos de cara al proceso de aglomeración de oro con carbón-aceite (CGA) y con ello tener información relacionada del rendimiento del proceso y de cómo se relaciona con la mineralogía. Para ello se desarrollaron dos fases procedimentales, la primera consistió en la caracterización de los minerales, la cual involucró tres actividades: caracterización química mineralógica, en la cual se aplicaron las técnicas de espectroscopia de absorción atómica (AA), difracción de rayos X (DRX), fluorescencia de rayos X (FRX) y microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS); caracterización metalúrgica, en la que se analizó el grado de lixiviabilidad de los minerales por medio del ensayo de cianuración en botella y lixiviación diagnóstica; caracterización físico-química, en esta actividad se hizo análisis de sales disueltas, medición de pH y conductividad eléctrica de las pulpas minerales. La segunda fase procedimental fue la evaluación del proceso CGA, donde se realizaron pruebas exploratorias con cada uno de los minerales; la recuperación y eficiencia del proceso se determinaron mediante los resultados de análisis de oro, por ensayo al fuego, realizados a los aglomerados cargados y a las colas minerales. Se determinó que la presencia de alto contenido de sales solubles en el mineral promueve la aglomeración indiscriminada de las partículas minerales, minimizando así la eficiencia del proceso CGA. Igualmente, se concluye que los bajos tenores de oro y la asociación del metal precioso a sulfuros limita su recuperación.

---

\* Proyecto de grado (modalidad, proyecto de investigación)

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

## ABSTRACT

**TITLE:** APPLICATION OF THE CGA PROCESS TO OXIDATED AURIFEROUS MINERALS: ESTABLISHMENT OF METALLURGICAL PARAMETERS OF INTEREST.

**AUTHORS:** Hinojosa Ferreira, Carlos Andrés, Montoya Yusti, Daniel Felipe y Pinzón Castañeda, David Leandro\*\*

**KEY WORDS:** CGA process, oxidized auriferous minerals, gold recovery, charcoal oil agglomerates.

**DESCRIPTION:** The purpose of this work was to characterize four oxidized auriferous minerals from different regions of Colombia (Antioquia, Bolívar and Santander) to evaluate them for the gold agglomeration process with coal-oil (CGA) and get pertinent information on the process performance and how it relates to mineralogy. For this, two procedural phases were developed, the first one consisted in the minerals characterization, which involved three activities: chemical mineralogical characterization, where the techniques were applied of atomic absorption spectroscopy (AA), X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence (FRX) and scanning electron microscopy (SEM-EDS); Metallurgical characterization, that the minerals leachability degree was analyzed through the bottle cyanuration test and diagnostic leaching; physical chemistry characterization, in this activity was analyzed dissolved salts, pH measurement and electrical conductivity of the mineral pulps. The second procedural phase was the CGA process evaluation, where exploratory tests were carried out with each of the minerals; the recovery and the efficiency of the process were determined by the gold analysis results, thorough fire test, carried out on loaded agglomerates and mineral tails. It was determined that the presence of high content of soluble salts in the mineral promotes the indiscriminate agglomeration of the mineral particles, thus minimizing the efficiency of the CGA process. Likewise, it is concluded that the low gold tenors and the association of the precious metal to sulphides limits its recovery.

---

\* Bachelor Thesis

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

## INTRODUCCIÓN

Dentro de los procesos de minería en la extracción de minerales auríferos, el uso de químicos altamente contaminantes; se ha dado como parte importante en el desarrollo de dichos procesos, como mercurio y cianuro; no obstante, los graves problemas medioambientales que han generado, especialmente el mercurio, han llevado a legislar su uso en los procesos mineros. En Colombia, por ejemplo se trata de la ley 1658, de 2013 [1].

La problemática ambiental anteriormente mencionada es consecuencia del uso indiscriminado del mercurio y de la falta de tratamiento de los residuos producidos, los cuales a menudo presentan cargas contaminantes por encima de lo permitido por las leyes ambientales [2]. El mercurio al ser vertido en fuentes hídricas se concentra y se bioacumula en toda la cadena alimentaria a medida que los animales grandes consumen a los más pequeños, los cuales pueden ser peces o mariscos [3], y estos al ser ingeridos por un ser humano ocasiona grandes daños en la corteza cerebral. El cianuro afecta de igual manera a las personas, con solo su vapor se pueden ocasionar fallos renales.

Ante dicha problemática ambiental se vio la necesidad de encontrar procesos de extracción de oro ambientalmente sostenibles, siendo una de las alternativas desarrolladas es el proceso de aglomeración de oro con carbón-aceite o proceso CGA [2].

El proceso CGA es un método de recuperación de oro, que consiste en aprovechar las propiedades hidrofóbicas de los minerales de oro, siempre y cuando estén libres o puedan ser liberados, y generar una aglomeración entre el mineral de oro, el carbón y el aceite, con una recirculación de dichos aglomerados dentro del sistema con el objetivo de aumentar la carga de oro. Luego se separan

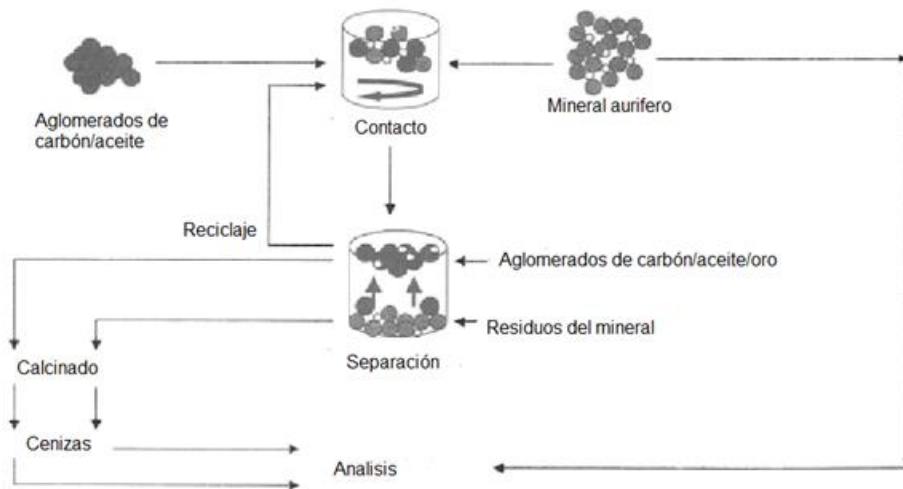
de la pulpa, se queman y las cenizas resultantes se funden con el objetivo de obtener el bullón de oro. El proceso CGA ofrece la alternativa de tener un sistema donde no se necesita emplear mercurio o cianuro para la extracción del oro, sin embargo, no todos los depósitos de dicho metal pueden ser tratados eficientemente por tal proceso, dado que asociaciones significativas de pirita, arsenopirita y otros minerales de sulfuros presentan un comportamiento lipofílico, lo que da como posibilidad de análisis el que la naturaleza de los minerales influye directamente sobre la eficiencia del proceso CGA [4].

Teniendo en cuenta lo anterior, la presente investigación se enfocó en evaluar el comportamiento de diversos minerales auríferos con bajo contenido de especies sulfuradas en el proceso CGA, con el fin de reconocer cómo las características químico mineralógicas, metalúrgicas y físico-químicas afectan el rendimiento y eficiencia del proceso.

## 1. ANTECEDENTES

En los últimos años se han venido implementado diversas políticas medio ambientales en Colombia, como la “ley 1658 de 2013”, con el fin de evitar la contaminación ambiental por la extracción de minerales y con mayor énfasis en la extracción de metales preciosos. Por tal razón se ha encontrado la necesidad de remplazar los procesos convencionales en la recuperación de estos metales, usando métodos alternativos y más amigables con el medio ambiente y el ser humano. Uno de estos métodos es el proceso CGA, implicado en la recuperación de oro principalmente. La Fig. 1 muestra el diagrama de flujo general del proceso CGA.

**Figura 1.** Proceso CGA (Aglomeración oro con carbón-aceite/coal-gold agglomeration) [2].



Fuente: Moses, L.B. y Petersen, F.W., 2000. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. Minerals Engineering. Vol. 13. No. 3, pp 255264

House y otros, en 1988, [5] reportaron el CGA como un proceso que permite la obtención de partículas de oro para minerales que contengan una baja ley,

evitando la cianuración. Los estudios realizados por la BritishOil enunciaron un proceso que hoy se conoce como CGA (coal-gold agglomeration); Dicho proceso recupera de la pulpa de mineral las partículas de oro hidrofóbicas dentro de 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 [5,6].

Markuszewski y Wheelock, en 1992, [7] estudiaron el efecto de los cationes multivalentes en los aglomerados de carbón aceite, concluyendo que la recuperación en la aglomeración depende de dos factores. La naturaleza de la superficie tanto del carbón como del mineral, las propiedades de la solución. Mostrando que se podía potenciar cuando se suspendía el carbón en una solución salina, Este trabajo también mostro que diferentes sales podían mejorar la recuperación mientras el grado de solución salina se mantuviera constante.

Marciano y Costa (1994) [8]. estudiaron las variables que se debe tener en cuenta durante la primera etapa del proceso CGA. Estas son la naturaleza y la proporción tanto de aceite como de carbón en la formación de los aglomerados; esta investigación se basó en el estudio de los tipos de agentes aglomerantes como aceite diésel, queroseno, aceites vegetales de soya y maíz, además del grado y el tiempo de agitación; para estas variables se han definido rangos de aplicación en los que se obtienen respuestas favorables. Otros autores concluyeron que, de acuerdo a sus propiedades, los carbones con alto contenido de carbono fijo tendrán mejores propiedades aglomerante. Este porcentaje de carbono está en el rango de 90% o más.

Posteriormente, en la etapa de contactación (aglomerados/mineral) se debe considerar que la recuperación de oro está influenciada por factores como la resistencia y la estabilidad de aglomerados los cuales se obtienen de acuerdo a lo

mencionado anteriormente; además de las características del oro, el tipo y la cantidad de colector, la relación de aglomerados/mineral y el tiempo de contactación [6, 9].

Igualmente, existen otros factores que afectan la elaboración satisfactoria de los aglomerados de carbón aceite así como el rendimiento del proceso de CGA, entre los que se destacan el tiempo de contacto, los investigadores Calvez, Kim, Tran, en 1998, [9] proponen un tiempo de reciclaje de los aglomerados y otros factores, estos realizaron un estudio para evaluar los principios del proceso de recuperación de oro por aglomerados de carbón-aceite.

Gochin y 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 micrografías obtenidas por la aplicación de microscopía electrónica de barrido (SEM) para tiempos de contacto de 5min, 1 h y 5 h. Los análisis indicaron que tanto la composición como la estructura o morfología superficial de los aglomerados, cambian durante el proceso de carga 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.

Akcil, Wu y Aksay en 2009, [11] reportaron la importancia que tiene el tenor de oro en el mineral, ya que cuando se aumentaba la ley de 0,5 g/ton a 30g/ton la eficiencia pasa de 60 a 98,8%. También se menciona que una presencia menor que 5% en sulfuros, no afecta el grado de recuperación de oro, pero asociaciones como la limonita o hematita sí presentan efectos adversos ocasionando que la recuperación de oro se vea disminuida.

Mlaki, Katima y Kimweri en 2013, [12] examinaron los efectos de la ganga de sílice y la ganga de sulfuro sobre la fijación de oro, incluyendo el efecto de la superficie como la eficiencia de activadores (amil xantato de potasio) y la posibilidad de deprimir los efectos de la ganga utilizando reactivos apropiados. Se encontró que cuando se incrementó la cantidad de óxido ganga (cuarzo) en el mineral, lo que indica ausencia de competencia entre el oro y ganga de cuarzo. El alto contenido de sulfuros en el mineral por encima del 6% reduce considerablemente la recuperación de oro.

Se logra evidenciar que, para que se logre tener un proceso CGA óptimo, este depende de muchos factores, lo que resulta en muchas variables a estudiar experimentalmente, estas variables son más críticas unas que otras. Una de las variables más críticas y de la que existen pocos estudios es la mineralogía óptima para aplicar el proceso, el presente trabajo de grado busca caracterizar los minerales auríferos de diferentes regiones de Colombia de cara al proceso CGA.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Establecer los parámetros metalúrgicos de interés para la aplicación del proceso CGA a minerales auríferos filonianos con bajo contenido de especies sulfuradas.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar las principales características químicas, mineralógicas y físico-químicas de cuatro minerales auríferos oxidados y procedentes de diferentes regiones de Colombia.
- Caracterizar metalúrgicamente los minerales mediante los ensayos de cianuración en botella y lixiviación diagnóstico.
- Llevar a cabo pruebas exploratorias de la implementación del proceso CGA a los cuatro minerales auríferos de bajo contenido de especies sulfuradas con el fin de determinar si las diferencias en sus características geo-metalúrgicas influyen en la eficiencia del proceso.

### 3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

#### 3.1 OBTENCIÓN DE MATERIAS PRIMAS

En la tabla 1 se describen los minerales obtenidos de diferentes regiones del país entre las que se encuentran Santander, Sur de Bolívar y Antioquia.

**Tabla 1.** Procedencia y estado de los minerales.

<i>Mina</i>	<i>Departamento</i>	<i>Región</i>	<i>Estado</i>
<i>Reina de Oro</i>	Santander	Vetas	Concentrado
<i>Walter</i>	Sur de Bolívar	Santa de Rosa	Cabeza
<i>Elsy</i>	Santander	Vetas	Cabeza
<i>Bagre</i>	Antioquia	El Bagre	Cabeza

Los cuatro minerales auríferos filonianos de bajo contenido en especies sulfuradas, se sometieron a conminución utilizando un triturador de mandíbulas y un molino de bolas para obtener una granulometría correspondiente a 100% pasante malla 200 Tyler.

Se hizo análisis granulométrico con base en la norma ASTM-C136, por lo cual se tamizaron 100 g de cada mineral, utilizando un Ro-Tap y una serie de mallas Tyler con números 60, 80, 100, 120, 160, 200, 270 y 325, por un tiempo de 16 minutos (Ver anexo A). También se obtuvo un material carbonoso procedente de el Cerrito Santander que se clasifico basado en la norma ASTM D388-05 (ver anexo B).

#### 3.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA-MINERALÓGICA DE LOS MINERALES AURÍFEROS

Se aplicaron las técnicas de difracción (DRX), fluorescencia (FRX) de rayos X y microscopia electrónica de barrido (SEM-EDS), para su posterior determinación de

tenores de metales preciosos por medio de la técnica de ensayo al fuego, con base en la norma ASTM E400, estos ensayos fueron realizados por triplicado, los resultados que se reportan son el promedio junto con el valor de desviación estándar. Las condiciones de cada análisis, junto con la referencia de los equipos usados, se detalla en el anexo C.

### **3.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA DE LOS MINERALES**

Las actividades realizadas en esta etapa del proyecto se describen a continuación. Cianuración en botella: Esta prueba permitió determinar el grado de lixiviabilidad de los cuatro minerales. El ensayo de cianuración en botella se llevó a cabo por agitación en rodillos durante 96 horas, se tomaron 500 g de cada mineral, 100% pasante malla 200 Tyler, se adicionaron 1000 mL de agua destilada, la pulpa se preparó en un recipiente 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, 12, 24, 48, 72 y 96 horas se tomaron alícuotas, donde en cada muestreo se dejó reposar la mezcla, se filtraron la alícuotas extraídas y se titularon con nitrato de plata, para calcular la cantidad de cianuro consumido, lo cual se repuso. Además, tales alícuotas se analizaron por espectroscopia de absorción atómica (AA), mientras que a las colas se les realizó ensayo al fuego según norma ASTM-E400.

Lixiviación diagnóstica: la prueba de lixiviación diagnóstico permitió establecer las asociaciones minerales auríferas para cada mineral [15]. De forma resumida, esta prueba consistió en la destrucción secuencial de las especies minerales que encapsulan a los metales preciosos, mediante lixivaciones con reactivos específicos, haciendo una cianuración inicial por un tiempo de 24 horas, para atacar luego con ácido sulfúrico, que es el encargado de disolver óxidos, se

cianura de nuevo por 3 horas y por último se ataca con ácido nítrico que disuelve sulfuros y vuelve a cianurarse por 3 horas. En cada una de las cianuraciones realizadas, tres en total, se realizaron lavados y se tomaron muestras para análisis por espectroscopia de absorción atómica AA y a las colas se les realizó ensayo al fuego según norma ASTM-E400.

### **3.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA DE LOS MINERALES**

A los cuatro minerales auríferos filonianos de bajo contenido en especies sulfuradas 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 Tyler 80, llevando dicha mezcla a agitación magnética a una velocidad de 300 rpm por un tiempo de 30 minutos, se dejó reposar la mezcla un lapso de 15 minutos, se filtró la mezcla reposada tomando muestras para medición de pH y conductividad eléctrica, y posteriormente se midió por espectroscopia de absorción atómica las sales disueltas de K, Mn, Mg y Ca, el P se midió por la técnica de colorimetría aplicando del método de vanadato molibdato [16].

Se aplicó un procedimiento paralelo al anterior con el fin de analizar sales disueltas por diferencia de peso, realizando una evaporación de la fase líquida filtrada tomando muestras con un volumen conocido. Para estos ensayos se tomó un vaso de precipitado limpio y seco, se pesó y se agregó un volumen conocido de la muestra filtrada (25 mL), la cual se evaporó a una temperatura de 80 °C, luego del enfriamiento se midió el nuevo peso y se calculó por diferencia de pesos la cantidad de sales disueltas. Todos los procedimientos de este apartado se realizaron por triplicado, los resultados que se reportan son el promedio junto con el valor de desviación estándar.

### 3.5 ENSAYO DEL PROCESO CGA EXPLORATORIO

Luego de la caracterización de los minerales, se procedió a evaluar el comportamiento de estos en el proceso de recuperación de oro con aglomerados carbón-aceite (Proceso CGA); nuevamente, los ensayos se realizaron por triplicado. El procedimiento se dividió en tres etapas, en la primera se obtuvieron los aglomerados de carbón y aceite, para lo cual se preparó una emulsión con 500 mL de agua y 17 mL de aceite, mediante la agitación mecánica de la mezcla a una velocidad de 2000 rpm por un tiempo de 5 minutos; luego, se agregó 50 g de carbón a la emulsión de agua aceite agitando mecánicamente a 2000 rpm durante 10 minutos, tiempo durante el cual se formaron los aglomerados. La segunda etapa consistió en la puesta en contacto de los aglomerados con el mineral, para lo cual se preparó una pulpa mineral con 250 mL de agua, 50 g de mineral y 200  $\mu$ L del colector (Aerofloat 208 promoter), la cual se mezcló por agitación mecánica a una velocidad de 600 rpm por un tiempo de 5 minutos; luego de este tiempo de acondicionamiento, se procedió agregar 50 g de aglomerados, manteniendo la agitación por un tiempo de 45 minutos. La etapa final consistió de la separación física de los aglomerados cargados de las colas minerales, lo cual se realizó con ayuda de un tamiz y lavado suave de los aglomerados.

La recuperación de oro en los aglomerados se determinó mediante el análisis por ensayo al fuego (Norma ASTM E400), tanto de las colas como de los aglomerados, previo a su secado y calcinación.

A partir de los resultados de estos ensayos, se determinaron los índices metalúrgicos recuperación, rendimiento de separación y eficiencia del proceso CGA para cada uno de los minerales, tales parámetros se calcularon con ayuda de las siguientes ecuaciones [17]:

Recuperación: 
$$R = \frac{C \cdot t_c}{A \cdot t_a} \quad (1)$$

Rendimiento de separación: 
$$V = \frac{C}{A} \quad (2)$$

Eficiencia: 
$$E = \frac{(R-V)}{(1-V_{ideal})} \quad (3)$$

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.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.2 CARACTERIZACIÓN QUÍMICA-MINERALÓGICA

**4.2.1 Composición elemental.** En la tabla 2 se reportan los resultados obtenidos por FRX para el grupo de cuatro minerales.

**Tabla 2.** Resultados obtenidos por FRX

<i>Elemento</i>	<i>Mineral [%]</i>			
	<b>Reina de Oro</b>	<b>Walter</b>	<b>Elsy</b>	<b>Bagre</b>
<i>Fe</i>	20,63	4,82	3,55	5,67
<i>S</i>	18,99	0,07	0,12	4,14
<i>Si</i>	7,24	34,77	31,68	36,09
<i>Al</i>	2,33	4,99	7,84	1,68
<i>K</i>	0,86	2,06	4,26	0,52
<i>As</i>	0,25	-	0,01	52 *
<i>Mg</i>	0,20	0,20	0,74	0,05
<i>Ti</i>	0,20	0,21	0,43	0,03
<i>P</i>	0,19	0,28	0,26	99 *
<i>Zn</i>	0,11	0,18	0,02	59 *
<i>Ca</i>	0,11	0,11	0,72	0,05
<i>Pb</i>	0,08	0,99	47 *	0,05
<i>Mn</i>	0,04	0,02	-	0,01
<i>Cu</i>	0,04	0,12	85 *	0,02
<i>Ce</i>	0,04	-	-	-
<i>Zr</i>	0,03	0,01	0,03	6 *
<i>Cr</i>	0,02	0,01	0,01	0,02
<i>La</i>	0,02	-	-	-
<i>Ni</i>	0,02	41 *	45 *	37 *
<i>Sb</i>	0,02	-	-	-
<i>Mo</i>	0,01	33 *	-	13 *
<i>Au</i>	81 *	-	-	70 *
<i>Y</i>	78 *	-	-	-
<i>Ag</i>	76 *	-	-	0,06
<i>Co</i>	59 *	-	-	-
<i>Sr</i>	40 *	87 *	0,01	8 *
<i>Rb</i>	11 *	80 *	0,02	13 *
<i>V</i>	-	84 *	0,01	-

Na	-	-	0,35	0,05
Ba	-	-	0,06	-
Ga	-	-	15 *	-
Nb	-	-	10 *	-
Cl	-	-	-	0,02
Te	-	-	-	0,02

\* Indican elementos minoritarios en mg/Kg

De la tabla 2 se destaca la presencia de elementos como el Fe, S, As, Si, P, Cu y Zn que por las asociaciones que pueden formar interfieren con la extracción del Au, por el método tradicional de cianuración [18].

Se resalta la presencia de Au y Ag en los minerales de Reina de oro y Bagre, ya que estos elementos por lo general se encuentran en tan poca proporción que se dificulta detectarlo en los análisis por FRX. Por otro lado, es evidente que en los minerales Walter, Elsy y Bagre prevalece la sílice como constituyente principal dados los altos contenidos de Si, mientras que en el mineral Reina de oro el sulfuro de hierro es el constituyente mayoritario dado su alto contenido de Fe y S.

**4.2.2 Composición mineralógica.** Los análisis cualitativos de los minerales por DRX se resumen en la tabla 3. Los difractogramas y su estequiometría correspondientes se presentan en el anexo D.

**Tabla 3.** Resultados de las fases cristalinas presentes en los minerales las cuales se obtuvieron por DRX.

<b>Fase Cristalina</b>	<b>Mina</b>			
	Reina de Oro	Walter	Elsy	Bagre
<i>Pirita</i>	X	X	X	X
<i>Cuarzo</i>	X	X	X	X
<i>Marcasita</i>	X	-	-	-
<i>Moscovita-2M</i>	X	X	X	X
<i>Caolinita</i>	X	-	-	-
<i>Lazulita</i>	X	-	-	-
<i>Flogopita</i>	X	-	-	-

<i>Birnessita</i>	-	X	-	-
<i>Jarosita</i>	-	X	-	-
<i>Silicato de hierro y magnesio</i>	-	X	-	-
<i>Biotita</i>	-	X	-	-
<i>Actinolita</i>	-	X	-	-
<i>Microclina Intermedia</i>	-	-	X	-
<i>Dickita</i>	-	-	X	-
<i>Anortita</i>	-	-	X	-
<i>MagnesiohornBlenda</i>	-	-	X	-
<i>Fosfato de Aluminio</i>	-	-	X	-
<i>Calcita</i>	-	-	-	X
<i>Argentita Alfa</i>	-	-	-	X

Tal como se dedujo con los análisis por FRX, los principales constituyentes de los minerales son sílice, sulfuro de hierro (pirita y marcasita) y diversos aluminios silicatos, tales como caolinita y moscovita. En el mineral Bagre se evidencia la argentita alfa, la cual se asocia a la alta presencia de Ag en la FRX.

**4.2.3 Tenores de los minerales.** En la tabla 4 se muestran los resultados obtenidos al realizar el ensayo al fuego a los cuatro minerales para obtener su ley de oro y plata correspondiente.

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

<i>Mineral</i>	<i>Au[g/ton]</i>	<i>Ag[g/ton]</i>
<i>Reina de Oro</i>	278,7± 0,3	32,6 ± 1,9
<i>Walter</i>	7,0 ± 0,7	41,4± 2,1
<i>Elsy</i>	33,7 ± 0,5	276,4 ± 1,6
<i>Bagre</i>	114,1 ± 1,6	790,0± 17,8

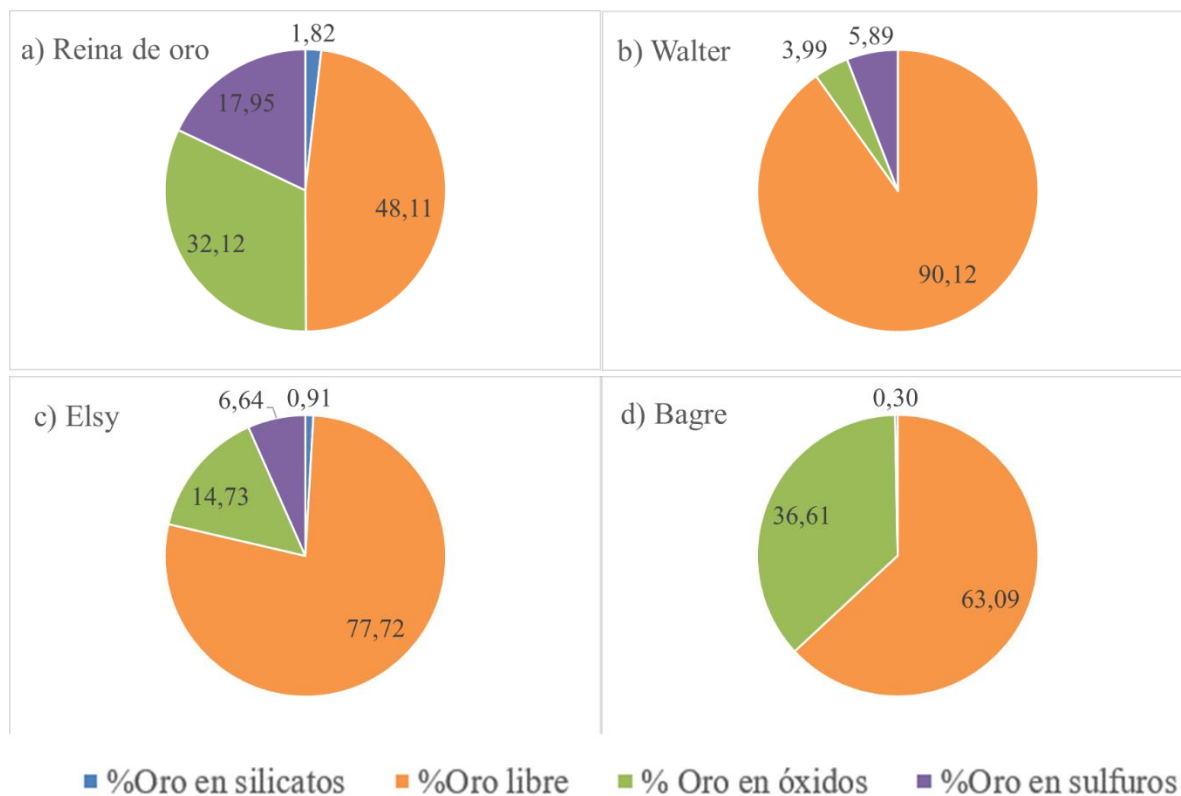
Todos los minerales se clasifican como auroargentíferos, analizando para el caso del Au el mineral que presento mayor ley (278,7 g/Ton) fue el de la mina Reina de Oro, lo cual está relacionado con el hecho de que se trata de un concentrado; por su parte, el mineral que presento menor cantidad de Au fue el de la mina Walter (7

g/Ton). Para el caso de la Ag el mineral con la mayor cantidad es el de la mina Bagre (790 g/Ton) lo que concuerda con el análisis de FRX y DRX, a través del cual se identificó la presencia de argentita; igual que con el oro, el mineral con menor contenido de Ag es el de la mina Reina de Oro (32,6 g/Ton).

### 4.3 CARACTERIZACIÓN METALÚRGICA

**4.3.1 Lixiviación diagnóstica.** En la figura 2 se reportan los resultados obtenidos por la prueba de lixiviación diagnóstica realizado al grupo de cuatro minerales. Las gráficas indican cómo se distribuye el oro en los diferentes tipos de asociaciones minerales, es decir, oro en forma libre, en silicatos, en óxidos y en sulfuros.

**Figura 2.** Lixiviación diagnóstica. Asociación del oro con los diversos compuestos presentes en los minerales.



Para el mineral Reina de Oro (Fig. 2a) se encontró que el 32,12% del oro está asociado a la matriz de óxidos, el 48,11% está libre, mientras que el 1,82% del oro se encuentra en la matriz silícea. Finalmente, aproximadamente el 18% del oro está asociado a la matriz sulfurada; esto último permite predecir un cierto grado de dificultad para lixiviar el oro del mineral.

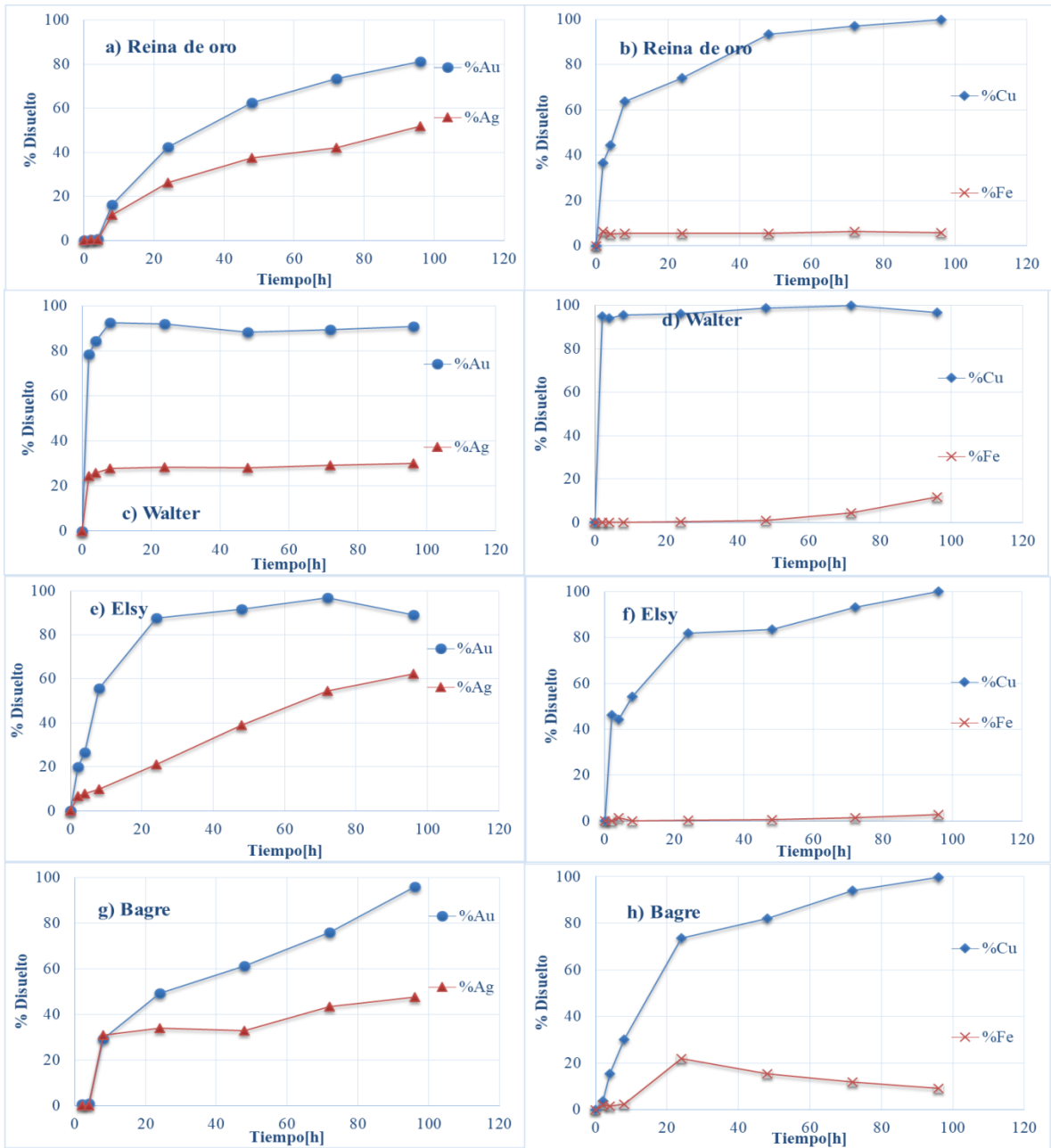
Por otro lado, para el mineral Walter (Fig. 2b), la mayor parte del oro (90,12%) está libre y aproximadamente un 4% está en una matriz de óxido, así como una mínima cantidad asociada a la matriz silícea (0,01%), además sólo un 6% del oro está vinculado a especies sulfuradas. Estos resultados permiten inferir que este mineral es de fácil lixiviación, dado el bajo porcentaje de oro asociado a especies refractarias (sulfuros y silicatos) [19,20].

En cuanto al mineral Elsy (Fig. 2c), los resultados indican que una importante parte del oro (77,72%) está libre, el 14,73% asociado a la matriz de óxidos y 0,90% a silicatos, mientras que menos del 7% se encuentra dentro de la matriz sulfurada. Al igual que para el mineral Walter, el bajo contenido de oro asociado a sulfuros y silicatos permite predecir una fácil lixiviación de este mineral [19,20].

Finalmente, los resultados para el mineral Bagre (Fig. 2d) señalan que el oro está principalmente en forma libre (63,1%), mientras que el 36,6% está asociado a especies oxidadas; por lo que sólo una mínima proporción de oro (0,30%) está vinculada a sulfuros y silicatos. Estos resultados también indicarían que el mineral es de fácil lixiviación.

**4.3.2 Grado de lixiviabilidad de los minerales.** En la Figura 3 se comparan los resultados de los ensayos de cianuración en botella para los cuatro minerales. Específicamente se presenta las curvas cinéticas de lixiviación de Au, Ag, Cu y Fe.

**Figura 3.** Curvas cinéticas del ensayo de cianuración en botella para los cuatro minerales.



La figura 3 indica que las mayores cinéticas de disolución de oro corresponden a los minerales Walter (Fig.3c) y Elsy (Fig.3e), puesto que al cabo de solo 8 horas de iniciada la prueba se había disuelto, respectivamente, el 92% y 56% de oro;

esta fácil disolución del oro en estos dos minerales se relaciona con el hecho de que el oro se encuentra principalmente en forma libre. Por el contrario, para los minerales de las minas Reina de Oro (Fig.3a) y Bagre (Fig.3g) se tiene una disolución de oro representativa (>40%) a las 24 horas de empezado el ensayo. En el caso del primer mineral, la causa de la menor cinética se relaciona en parte con su alto tenor de oro (278 g/Ton), así como con la importante proporción de oro asociado a la matriz sulfurada (18%). Por su parte en el mineral Bagre la limitante la constituye el muy alto contenido de plata (790 g/Ton), el cual compite con el oro por el cianuro; evidencia de esta afirmación lo constituye el aumento progresivo de la disolución de oro.

Tomando como referencia la clasificación de minerales auríferos propuesta por Brooy [14], la cual se plasma en la tabla 5, los minerales Elsy (97% Au disuelto), Bagre (96%Au disuelto) y Walter (92% Au disuelto) se clasifican como altamente lixiviables. Por su parte, el mineral Reina de Oro (81% Au disuelto) es medianamente lixiviable.

En cuanto a la plata, ninguno de los minerales disuelve más de un 70% de Ag, y los picos más altos de Ag se alcanzan en las últimas horas de ensayo; la mayor disolución de Ag una vez finalizado el ensayo, para todos los minerales, fue: mineral de la mina Reina de Oro 51,86% (ver Fig. 3a), mineral la mina Walter 30,11%( ver Fig. 3c) mineral de la mina Elsy 62,22%( ver Fig.3e), para este mineral se puede ver cómo la cinética de la plata no alcanza su equilibrio, por lo que si se continua la cianuración lo más probable es que el contenido total de plata en el mineral pueda ser disuelto. Para el caso del mineral de la mina Bagre, la lixiviación de plata se estabiliza en 47,95%( ver Fig. 3g), lo cual se puede relacionar con el hecho de que la plata se encuentra en parte asociada a sulfuros, formando  $Ag_2S$ , lo cual impide su cianuración.

En cuanto a la disolución de los otros dos elementos Cu y Fe (ver figuras 3b, d, f y h) cabe resaltar que todos los minerales tienen una muy baja lixiviación de Fe, esto se debe a que este elemento posiblemente se encuentra presente, en gran parte, en forma de pirita ( $\text{FeS}_2$ ) en todos los minerales, lo cual es una asociación mineral bastante difícil de lixiviar con cianuro.

En cuanto al cobre, para todos los minerales alcanzaron un 100% de disolución a las 96 horas. También se puede resaltar que para el mineral Walter, en tan solo 2 horas de cianuración se logra un 90% de disolución de Cu (ver Fig. 3d), el resto de los minerales tienen una cinética creciente en cuanto la disolución del metal hasta que este se agota totalmente.

**Tabla 5.** Clasificación de los minerales de oro según S.R La Brooy [20].

<i>Oro disuelto (%)</i>	<i>Grado de lixivabilidad</i>
<b>&lt;65</b>	<b>Difícilmente lixiviable</b>
<b>65-85</b>	<b>Medianamente Lixiviable</b>
<b>&gt;85</b>	<b>Altamente lixiviable</b>

#### **4.4 CARACTERIZACIÓN FÍSICO-QUÍMICA**

##### **4.4.1 pH, conductividad eléctrica y sales solubles en las pulpas minerales.**

En esta actividad se prepararon pulpas minerales con cada uno de los minerales (ver apartado 3.4) y se midió el pH, conductividad eléctrica y concentración de sales disueltas. Tales resultados se presentan en la tabla 6.

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

<i>Mineral</i>	<i>pH</i>	<i>Cond. [<math>\mu\text{S/cm}</math>]</i>	<i>Sales disueltas g/L</i>
<b>Reina de Oro</b>	4,22 $\pm$ 0,04	4 794,30 $\pm$ 190,23	8,66 $\pm$ 0,12
<b>Walter</b>	5,01 $\pm$ 0,08	248,57 $\pm$ 3,51	0,21 $\pm$ 0,14
<b>Elsy</b>	6,85 $\pm$ 0,08	338,30 $\pm$ 13,12	0,34 $\pm$ 0,03
<b>Bagre</b>	5,35 $\pm$ 0,04	863,67 $\pm$ 3,61	0,95 $\pm$ 0,11

De acuerdo con estos resultados, los valores de pH de las cuatro pulpas minerales, están en un rango de valor ácido, la pulpa mineral con el valor más alto de pH es el de la mina Elsy, con un valor cercano al neutro; por otra parte, la pulpa mineral de la mina Reina de Oro es el que presenta el valor más bajo. La prevalencia de sales ácidas en los minerales y en especial en Reina de Oro, podría afectar su absorción de tensoactivos iónicos dado que la superficie mineral se hace más positiva por la adsorción de protones, lo que facilita la adsorción de tensoactivos aniónicos, como es el caso de xantatos y ditiofosfatos [22]. Por otro lado, los resultados de la tabla 6 muestran claramente la relación directa entre conductividad eléctrica y concentración de sales disueltas, dicha situación es coherente con que en solución acuosa las sales disocian en iones que presentan mayor movilidad para conducir la corriente eléctrica [21]. En tal sentido, el mineral Walter generó la menor concentración de sales disueltas 0,21g/L y el menor valor de conductividad eléctrica (248,57  $\mu\text{S/cm}$ ), mientras que la pulpa del mineral Reina de Oro presento un alto valor de conductividad (4794,30  $\mu\text{S/cm}$ ) y alta concentración de sales disueltas (8,66 g/L). La alta fuerza iónica en la solución de esta pulpa podría con llevar a una compresión de la doble capa eléctrica (neutralización de carga) y, por tanto, a promover la aglomeración de las partículas, además de impedir la adsorción de los colectores iónicos [22].

A continuación, en la tabla 7, se reportan los resultados del análisis de sales para cada mineral, los cuales incluyen las concentraciones de Mg, Mn, K, Ca, fosfatos y sulfatos.

**Tabla 7.** Medidas de concentración de los principales aniones y cationes provenientes de las sales disueltas de los minerales.

<b>Minerales</b>	<b>Aniones[mg/L]</b>		<b>Cationes[mg/L]</b>			
	Fosfatos	Sulfatos	Mg	Mn	K	Ca
<i>Reina de oro</i>	51,04	31119,67	49,38	84,08	30,45	43,05
<i>Walter</i>	25,96	135,33	3,27	2,93	14,53	16,62
<i>Elsy</i>	53,31	3318,17	3,18	0,001	36,70	17,13
<i>Bagre</i>	52,54	442,83	7,36	5,27	10,23	65,27

Como se observa en la tabla 7, para el caso de los fosfatos el mineral que tiene mayor cantidad es el de la mina Elsy y el de menor cantidad el de la mina Walter; para los sulfatos el mineral que más presentó fue el de la mina Reina de Oro y el que menos presentó fue el de la mina Walter. De forma general, la cantidad de sulfatos es mayor para todos los minerales comparado con los fosfatos; analizando cationes el que disolvió más Mg fue el mineral de la mina Reina de Oro y el que menos el mineral de la mina Elsy; para el Mn el que más disolvió fue el mineral de la mina Reina de Oro y el que menos el mineral de la mina Elsy; para el caso del K el que más disolvió fue el mineral de la mina Reina de oro y el que menos el mineral de la mina Walter; y por ultimo para el Ca el que más disolvió fue el mineral de la mina Bagre y el que menos el mineral de la mina Walter.

Para el caso del mineral de la mina Reina de Oro disolvió la mayor cantidad de cationes excepto para el Ca, siendo el segundo mineral en disolver la mayor cantidad del mismo, lo que, en conjunto con los datos de la cantidad de sales disueltas, sulfatos y fosfatos explica por qué es el mineral con la mayor conductividad eléctrica. El segundo mineral en disolver la mayor cantidad de cationes fue el de la mina Bagre y que a su vez también presentó el segundo valor

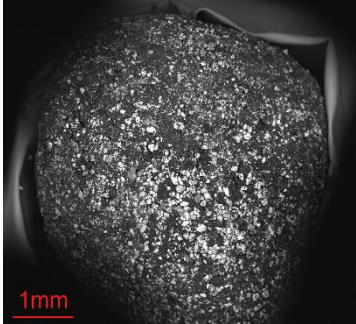
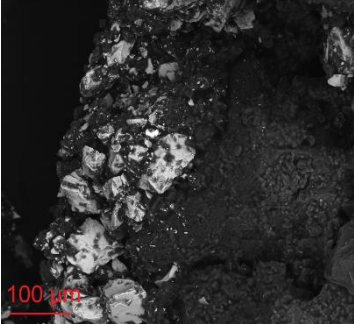
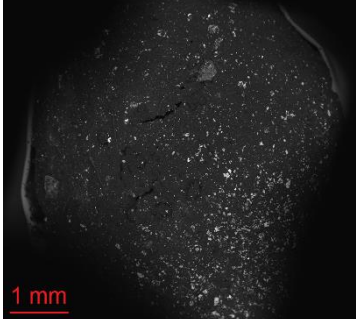
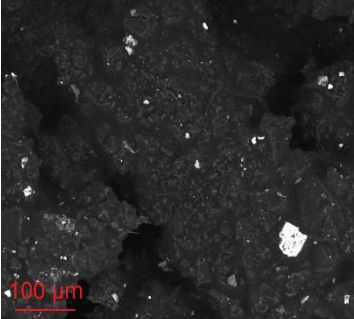
más alto en solubilidad de sales y segundo valor más alto de conductividad eléctrica.

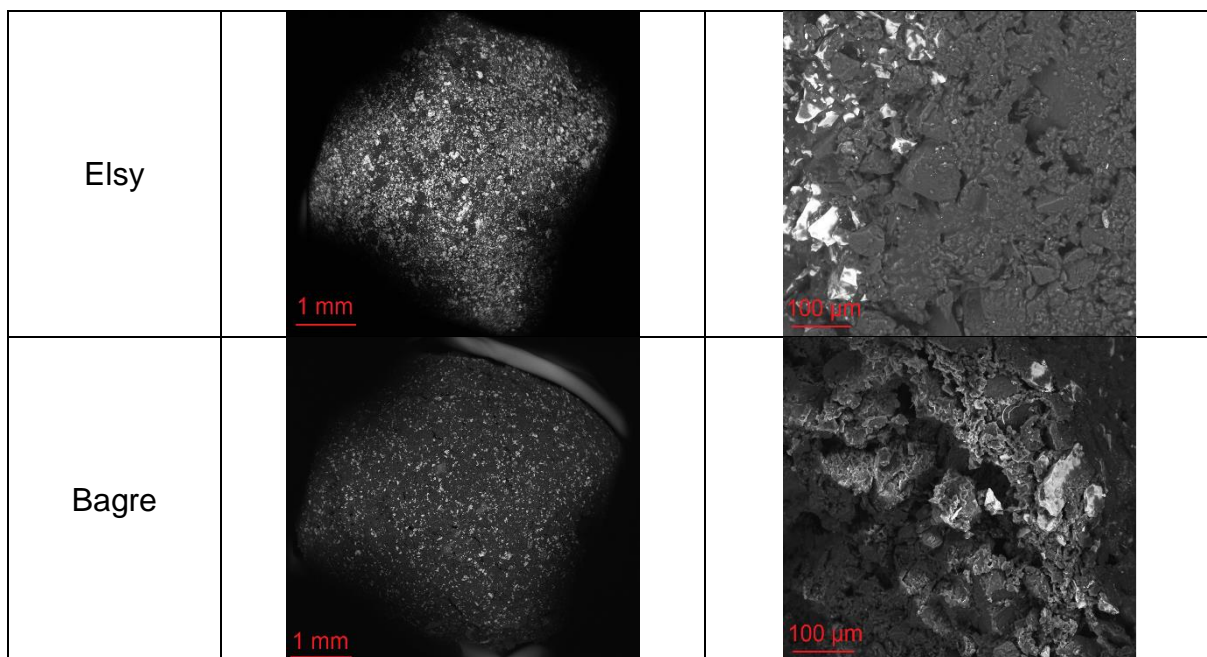
Para el caso del mineral de la mina Walter la cantidad de cationes y de aniones que presentó es la menor, lo que hace que sus valores de solubilidad de sales y de conductividad eléctrica sean también los menores entre el grupo de cuatro minerales.

#### 4.5 PROCESO CGA EXPLORATORIO

En la tabla 8 se presentan imágenes obtenidas por microscopía electrónica de barrido, con electrones foto dispersados, del exterior (50x) e interior (500x) de los aglomerados, luego de su contacto con el mineral.

**Tabla 8.** Imágenes aglomerados luego de su contacto con el mineral.

Mineral	Exterior de los aglomerados	Interior de los aglomerados
Reina de oro		
Walter		



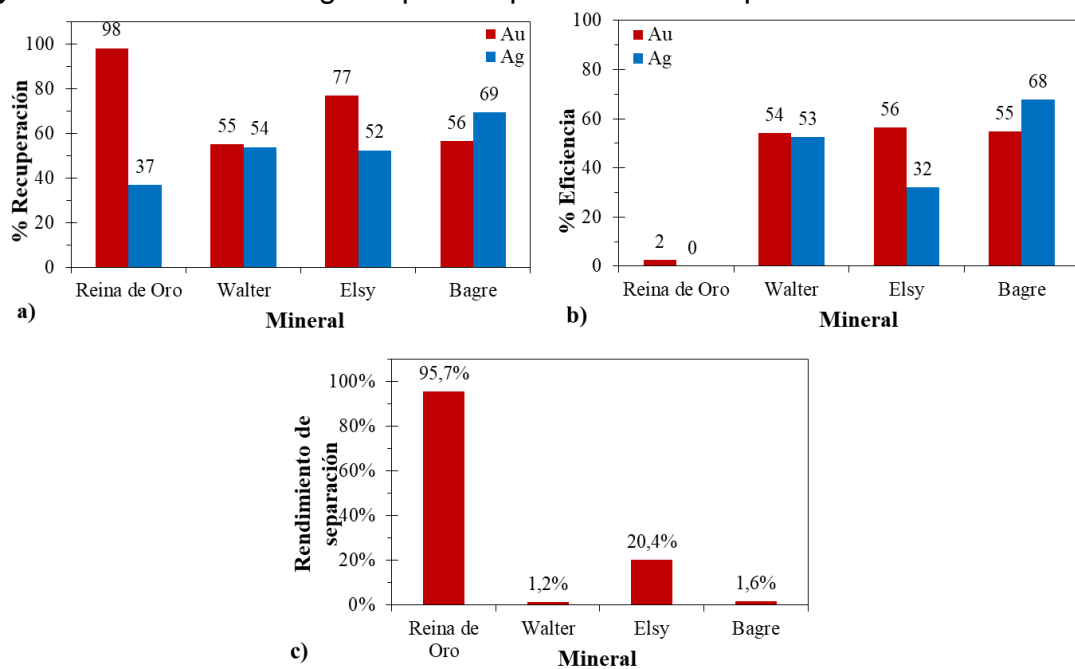
En la tabla 8 se destaca que los aglomerados puestos en contacto con el mineral Reina de Oro y Elsy presentan una superficie recargada de mineral, pero no se vio presencia de migración del mineral hacia el interior del aglomerado; por su parte, los minerales Walter y Bagre no tienen el grado de ocupación superficial de los aglomerados antes mencionados, en estos dos se detalla una pequeña migración hacia el interior del aglomerado, tal como ha sido reportado en otros trabajos [23]. De aquí se podría inferir que la capa de mineral que recubre los aglomerados, puestos en contacto con los minerales Reina de Oro y Elsy, le da resistencia a los aglomerados y evita la difusión de las partículas minerales a través de las grietas y poros hacia el interior.

Los microanálisis EDS realizados a las partículas adheridas a los aglomerados (ver anexo V), evidenciaron que además del oro libre, a los aglomerados se adherieron otras especies tales como pirita que estaba presente en la mayoría de los minerales (Reina de Oro, Bagre y Elsy), otros metales recuperados en el mineral de la Reina de oro fueron Pb y Sn, para el caso del mineral Walter se

presentó Pb, en el mineral de la mina Elsy se adhirieron a los aglomerados Cu y por último para el mineral del Bagre también se presenta  $Ag_2S$  y Ca.

En la figura 4 se comparan los índices metalúrgicos obtenidos en los ensayos de aplicación del proceso CGA a cada uno de los minerales. En cuanto a la recuperación (Fig. 4a), se observa que sólo alcanza una recuperación de oro cercana al 100% para el mineral de la Reina de Oro, seguido del mineral de la Elsy (77%), mientras que para los minerales Walter y Bagre las recuperaciones de oro solo son un poco superiores al 50%. En cuanto a la plata, para todos los casos, excepto para el mineral Bagre, las recuperaciones son menores a las del oro.

**Figura 4.** Índices metalúrgicos para el proceso CGA exploratorio.



Por otro lado, los resultados de la figura 4b indican que la eficiencia de la recuperación de oro por el proceso CGA es de aproximadamente un 55% para todos los minerales, exceptuando Reina de Oro, en cuyo caso es prácticamente nula, a pesar de haberse recuperado el 98% del oro. Además, de manera similar a

lo observado en la recuperación, la eficiencia de separación de la plata es menor que la del oro, excepto para el mineral Bagre.

La nula eficiencia del proceso para el mineral Reina de Oro se relaciona con el hecho de que no hubo separación de los metales preciosos del resto del mineral, y esto a pesar de que el 48% del oro se encontraba en forma libre. La insignificante separación de los metales preciosos se resalta en la figura 4c, de acuerdo con la cual el rendimiento de separación es muy alto (96%), lo que quiere decir, que el 96% del mineral alimentado se adhirió a los aglomerados. Tal comportamiento corrobora la hipótesis planteada previamente en la caracterización físico-química del mineral (apartado 4.3.1), según la cual la alta concentración de sales disueltas o alta fuerza iónica de la solución en la pulpa mineral genera la compresión de la doble capa eléctrica alrededor de las partículas minerales, es decir provoca la neutralización de su carga y se promueve la nucleación alrededor de los aglomerados de carbón-aceite.

La mayor eficiencia de recuperación de oro se obtuvo con el mineral Elsy, para el cual se recuperó el 77% del oro en los aglomerados. El porcentaje de oro no recuperado (23%) corresponde a la cantidad de metal asociado a óxidos, sulfuros y silicatos, por lo que se podría inferir que el proceso sólo es efectivo para recuperar el oro libre, tal como lo han señalado diversos investigadores [24]. Por otro lado, dado que sólo el 20% del mineral alimentado (principalmente sulfuros) se adhirió sobre los aglomerados, se puede concluir que la cantidad de sales disueltas a partir de este mineral, no es suficiente para ocasionar la neutralización de la carga superficial de las partículas, permitiéndose así la separación de las partículas hidrófobas (en los aglomerados) de las hidrofílicas.

Para los minerales Walter y Bagre se obtuvieron recuperaciones de oro y eficiencias del proceso similares, sin embargo, existen diferencias en los fenómenos involucrados en la aplicación del proceso CGA con estos minerales.

En primer lugar se debe mencionar que para ambos casos, la cantidad de mineral adherido a los aglomerados fue baja, menos del 2% (ver Fig. 4c), lo que permite afirmar que la cantidad de sales disueltas desde estos minerales no afectó de manera significativa la carga de las partículas, permitiendo que el colector actuara selectivamente sobre las partículas de oro libre y de pirita. No obstante, llama la atención que para el mineral Walter sólo se recuperó el 55% del oro a pesar de que el 90% de este estaba en forma libre, además que el contenido de sulfuros es bajo, tal como indica los análisis de FRX. Este resultado parece corroborar la hipótesis de (Akcil y otros) [11], según la cual la recuperación de oro a través del proceso CGA es afectada por los bajos tenores de oro en el mineral, dado que el mineral Walter sólo contenía 7 gAu/Ton.

Finalmente, para el mineral Bagre la recuperación de oro fue del 56%, valor cercano al porcentaje de oro libre en el mineral (63%), lo que permite inferir que la limitante en este caso fue el importante porcentaje (36,61%) de oro asociado a minerales oxidados, que no se adhiere a los aglomerados [11]. Por otro lado, a pesar que el mineral tenía un alto contenido en plata (790g/Ton) y de que se recuperó el 70% de este, no se podría afirmar que la competencia entre las partículas de plata y de oro afectara la recuperación de estas últimas, dado que la superficie de los aglomerados no se saturó completamente en partículas minerales y metálicos, tal como lo evidencian las micrográficas SEM (ver Tabla 8).

## 5. CONCLUSIONES

La caracterización química-mineralógica y físico-química de los cuatro minerales estudiados, procedentes de Santander (Reina de Oro y Elsy), Sur de Bolívar (Walter) y Antioquia (Bagre), permitió establecer diferencias importantes entre ellos, las cuales afectan la eficiencia del proceso CGA, tales como: contenido de minerales sulfurados y oxidados, presencia de sales solubles y tenor de oro.

A través de la caracterización metalúrgica se determinó que en los minerales altamente lixiviables (Walter, Elsy y Bagre) la mayor parte del oro se encuentra en forma libre, mientras que en el de mediana lixivabilidad (Reina de Oro), un importante porcentaje del oro está asociado a especies sulfuradas.

De acuerdo con los resultados obtenidos en el proceso CGA exploratorio, se puede concluir que la presencia de alto contenido de sales solubles en el mineral promueve la aglomeración indiscriminada de las partículas minerales, minimizando así la eficiencia del proceso. Igualmente, se concluye que los bajos tenores de oro y la asociación del metal precioso a sulfuros limita su recuperación.

## 6. RECOMENDACIONES

Con el fin de alcanzar mayor entendimiento de los fenómenos involucrados en la recuperación de oro a través del proceso CGA, se recomienda lo siguiente para futuras investigaciones sobre el tema:

- Evaluar la eficiencia del proceso con minerales de aluvión con el objetivo de comprobar que los minerales con oro libre son los más aptos para tratar con este proceso.
- Estudiar el efecto del tipo de colector en la recuperación de oro libre, por el proceso CGA, desde minerales con presencia también de diversas asociaciones minerales. Esto con el fin de encontrar el colector que favorezca la selectividad del oro libre.
- Llevar a cabo un estudio sobre el posible efecto del prelavado de los minerales en la eficiencia del proceso CGA, con el fin de determinar si al eliminar las sales solubles se mejora la selectividad del proceso para las partículas de oro libre.
- Realizar mediciones de potencial zeta en pulpas de los minerales estudiados, con el fin de corroborar que las sales disueltas modifican la carga de las partículas hasta el punto de anularla y promover su aglomeración indiscriminada.
- Complementar la presente investigación, realizando caracterización quimico-mineralógica, físico-química y metalúrgica tanto a las especies recuperadas en los aglomerados, como a las colas minerales.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ley N° 1658 de la República de Colombia, Bogotá 30 de junio de 2013.
- [2] Moses, L.B. y Petersen, F.W., 2000. Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. *Minerals Engineering*. Vol. 13. No. 3, pp 255-264.
- [3] Mancera-Rodríguez, N. J., & Álvarez-León, R. (2006). Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. *Acta Biológica Colombiana*, 11(1), 3-23
- [4] Cilingir, Y., & Sen, S. (2000). An investigation on the effects of ore grade and particle-liberation size in gold recovery by coal-oil-gold agglomerate flotation. *Developments in Mineral Processing*, 13, C8a-6
- [5] House, C I Townsend, I G, Veal, C J, The coal gold agglomeration (GCA) process, *International Mining*, 1988.
- [6] Córdoba Tuta, E.M. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón - aceite - una tecnología limpia en la extracción del oro. Bucaramanga, 1998 50-120 p. Trabajo de grado (Magister en ingeniería de materiales). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico-químicas. Programa ingeniería de materiales.
- [7] Fan, C. W., Markuszewski, R., & Wheelock, T. D. (1992). Effect of multivalent cations on oil agglomeration of coal and pyrite. *Coal Preparation*, 11(3-4), 167-175.
- [8] Marciano, A., Costa, L.S.N., Lins, F.F., 1994. Utilization of coal-oil agglomerates to recover gold particles. *Minerals Engineering* 7, 1401–1409.

[9] Calvez, JPS, Kim, M J, Wong, PLM and Tran, T, Use of coal-oilagglomerates for particulate gold recovery, Minerals Engineering, 11, (9). 1998, pp. 803 – 812.

[10] R.J Gochin, A.J, Monhemius. The adhesion of gold to oil–carbon agglomerates. En: International Journal of Mineral Processing. Volume 74, Issues 1–4, 19 November 2004, Pages 327–336.

[11] Wu, X.Q., Gochin, R.J., Monhemius, A.J., 2004a. The adhesion of gold to oil–carbon agglomerates. Minerals Engineering 17, 176–197.

[12] Anderson E. L. Mlaki, Jamidu H. Y. Katima, Henry T. Kimweri. (February 18, 2013). Effect of Gangue Minerals on Hydrophobic Recovery of Gold . scientific Research, 5, 316-321.

[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. pp 1-5.

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

[16] 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.

[17] Bustamante, M. O., Gaviria, A. C., & Restrepo, O. J. (2007). Notas de clase asignatura concentración de minerales. Editorial Universidad Nacional de Colombia., Medellín.

[18] Ballester, A., & Llorente, E. (1991). Minería Química. Instituto Tecnológico Geominero de España, 652.

[19] 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.

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

[21] Fan, C. W., Markuszewski, R., & Wheelock, T. D. (1988). Oil agglomeration of coal in salt solutions: Effects of hydrophobicity and other parameters on coal recovery. Prepr. Pap., Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.:(United States), 33(CONF-8809271-).

[22] Wuz; Wang X; Liu H; Zhang H; Miller J.D. Some physico chemical aspects of water-soluble mineral flotation. Advances in colloid and interface. Science 235 (2016) 190-200.

[23] Mlaki, A., Katima, J., & Kimweri, H. (2011). Gold Recovery from Gold Bearing Materials Using Bio-Diesel, Vegetable Oils and Coal. Engineering, 3(05), 555.

[24] Kotze, F. W. (2000). Free gold recovery by coal-oil agglomeration. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 100(1), 57-62.

[25] AMERICAN SOCIETY FOT TESTING AND MATERIALS. Standard classification of coal by Rank 2005. ASTM D388-05. Philadelphia, PA, United STATES 1939. PP 1-6

## BIBLIOGRAFÍA

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

AMERICAN SOCIETY FOT TESTING AND MATERIALS. Standard classification of coal by Rank 2005. ASTM D388-05. Philadelphia, PA, United STATES 1939. PP 1-6

ANDERSON E. L. MLAKI, JAMIDU H. Y. KATIMA, HENRY T. KIMWERI. Effect of Gangue Minerals on Hydrophobic Recovery of Gold . scientific Research, 5, (February 18, 2013). 316-321.

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

BALLESTER, A., & LLORENTE, E. Minería Química. Instituto Tecnológico Geominero de España, 652. 1991

BUSTAMANTE, M. O., GAVIRIA, A. C., & RESTREPO, O. J. Notas de clase asignatura concentración de minerales. Editorial Universidad Nacional de Colombia., Medellín. 2007

CALVEZ, JPS, KIM, M J, WONG, PLM AND TRAN, T, Use of coal-oilagglomerates for particulate gold recovery, Minerals Engineering, 11, (9). 1998, pp. 803 – 812.

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. *Developments in Mineral Processing*, 2.000. 13, C8a-6.

COLOMBIA. Congreso de la República. Ley 1658, Bogotá 30 de Junio de 2013. "Por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones".

CÓRDOBA TUTA. E.M. Recuperación de oro particulado con aglomerados carbón - aceite - una tecnología limpia en la extracción del oro. Bucaramanga, Trabajo de grado (Magister en ingeniería de materiales). Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingeniería físico-químicas. Programa ingeniería de materiales. 1998 50-120 p.

FAN, C. W., MARKUSZEWSKI, R., & WHEELLOCK, T. D. Effect of multivalent cations on oil agglomeration of coal and pyrite. *Coal Preparation*, 1992. 11(3-4), 167-175.

FAN, C. W., MARKUSZEWSKI, R., & WHEELLOCK, T. D. Oil agglomeration of coal in salt solutions: Effects of hydrophobicity and other parameters on coal recovery. *Prepr. Pap., Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem.:(United States)*, 33(CONF-8809271-). 1988

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

GOCHIN, R.J, MONHEMIUS A.J.,. The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. En: International Journal of Mineral Processing. Volume 74, Issues 1-4, 19 November 2004, Pages 327-336.

HOUSE, CI TOWNSEND, IG, VEAL, C J, The coal gold agglomeration (GCA) process, International Mining, 1988.

KOTZE, F. W. Free gold recovery by coal-oil agglomeration. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 100(1), 2.000. 57-62.

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.

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

MANCERA-RODRÍGUEZ, N. J., & ÁLVAREZ-LEÓN, R. Estado del conocimiento de las concentraciones de mercurio y otros metales pesados en peces dulceacuícolas de Colombia. Acta Biológica Colombiana, 2006. 11(1), 3-23

MARCIANO, A., COSTA, L.S.N., LINS, F.F., Utilization of coal-oil agglomerates to recover gold particles. Minerals Engineering 7, 1994. 1401-1409.

MLAKI, A., KATIMA, J., & KIMWERI, H. Gold Recovery from Gold Bearing Materials Using Bio-Diesel, Vegetable Oils and Coal. Engineering, 3(05), 555. 2011

MOSES, L.B. Y PETERSEN, F.W., Flotation as a separation technique in the coal gold agglomeration process. Minerals Engineering. 2.000. Vol. 13. No. 3, pp 255-264.

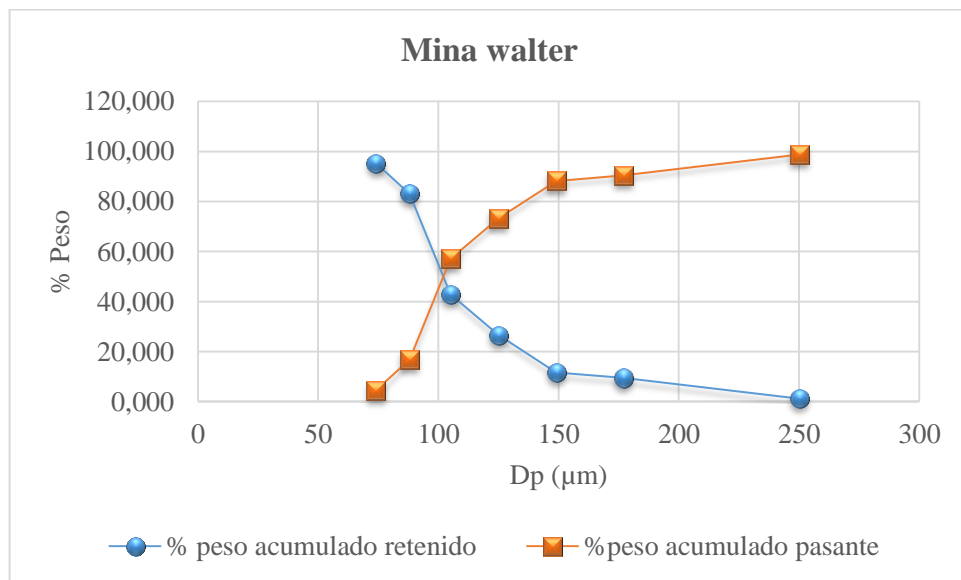
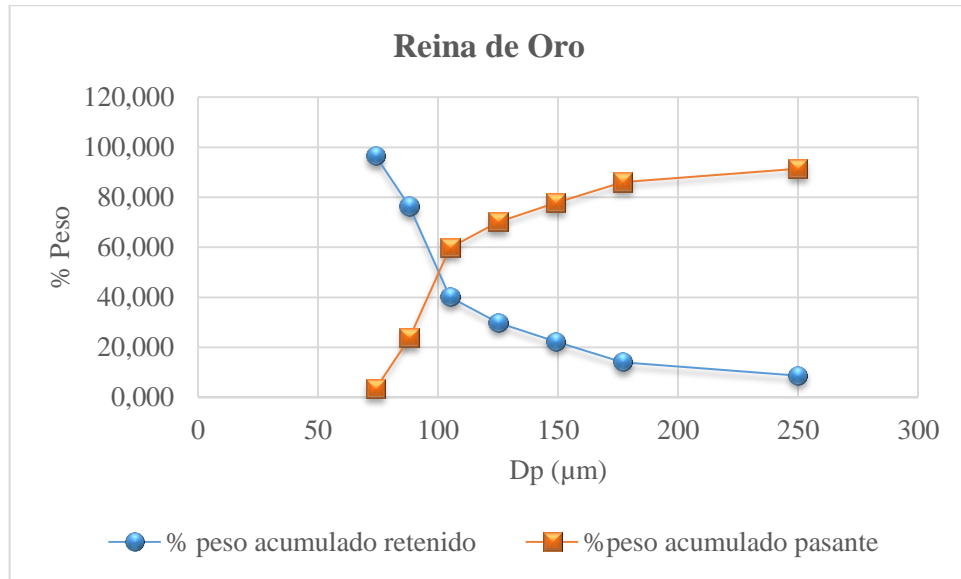
TRASLAVIÑA, J., PEDRAZA, J.E., Caracterización de los minerales auríferos de la zona minera de San Pedro Frío (Bolívar-Colombia), para la selección de los procesos de extracción.

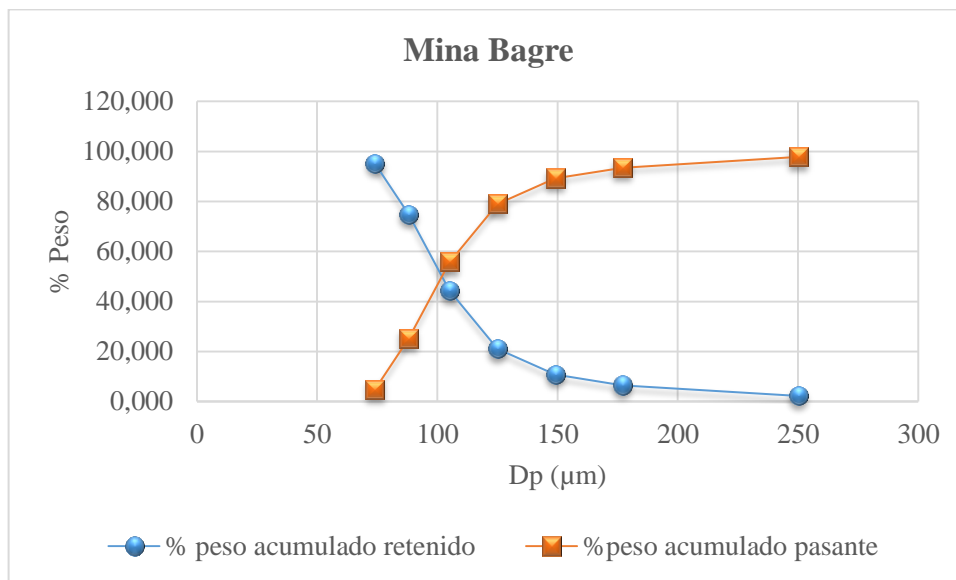
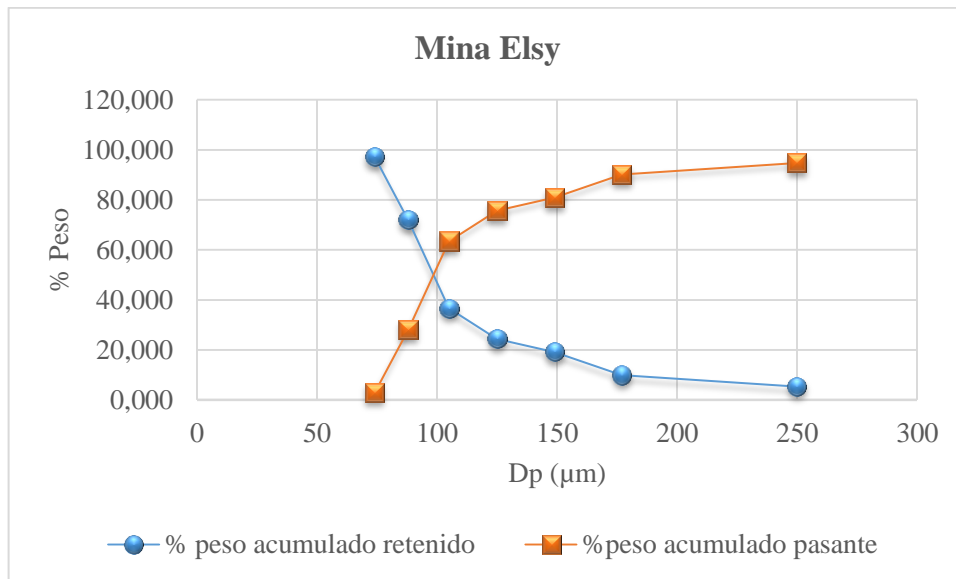
WU, X.Q., GOCHIN, R.J., MONHEMIUS, A.J., The adhesion of gold to oil-carbon agglomerates. *Minerals Engineering* 17, 2004. p 176–197.

WUZ; WANG X; LIU H; ZHANG H; MILLER J.D. Some physico chemical aspects of water-soluble mineral flotation. *Advances in colloid and interface. Science* 235 (2016) 190-200.

Anexo A. Granulometría de los minerales

**GRANULOMETRIA DE LOS MINERALES**





Anexo B. Análisis próximo del carbón el Cerrito Santander

PROPIEDADES	
Humedad (%)	3,22 ± 0,07
Cenizas (%)	10,55 ± 0,20
Material volátil (%)	14,91 ± 1,81
Carbono fijo (%)	71,32 ± 1,68
Índice de hinchamiento	0
Poder calorífico (BTU)	11676,97 ± 249,92
Azufre total (%)	0,58 ± 0,003
Clasificación del carbón por rango	Carbón bituminoso

## Anexo C. Condiciones operativas de los análisis DRX y FRX

### Prueba DRX:

Preparación de las muestras	Los especímenes seleccionados de las muestras fueron molturados y homogenizados en un mortero de ágata. Posteriormente, los especímenes seleccionados fueron montados en porta muestras de polimetilmetacrilato (PMMA) mediante la técnica de llenado frontal.																						
Condiciones de medición	<p>Se realizó en un difractómetro de polvo marca BRUKER modelo D8 ADVANCE con Geometría DaVinci bajo las siguientes condiciones:</p> <table data-bbox="602 877 1458 1541"> <tr> <td>Voltaje</td> <td>40 (kV)</td> </tr> <tr> <td>Corriente</td> <td>40 (mA)</td> </tr> <tr> <td>Rendija de Divergencia</td> <td>0,6 mm</td> </tr> <tr> <td>Rendijas Soller Primario</td> <td>2,5°</td> </tr> <tr> <td>Muestreo</td> <td>0,02035° 2theta</td> </tr> <tr> <td>Rango de Medición</td> <td>3,5-70,0° 2Theta Radiación CuK<math>\alpha</math>1</td> </tr> <tr> <td>Filtro</td> <td>Níquel</td> </tr> <tr> <td>Uso de Anti-dispersor de Aire</td> <td>Si</td> </tr> <tr> <td>Detector</td> <td>Lineal LynxEye</td> </tr> <tr> <td>Tipo de barrido</td> <td>A pasos</td> </tr> <tr> <td>Tiempo de muestreo</td> <td>0,6 segundos</td> </tr> </table>	Voltaje	40 (kV)	Corriente	40 (mA)	Rendija de Divergencia	0,6 mm	Rendijas Soller Primario	2,5°	Muestreo	0,02035° 2theta	Rango de Medición	3,5-70,0° 2Theta Radiación CuK $\alpha$ 1	Filtro	Níquel	Uso de Anti-dispersor de Aire	Si	Detector	Lineal LynxEye	Tipo de barrido	A pasos	Tiempo de muestreo	0,6 segundos
Voltaje	40 (kV)																						
Corriente	40 (mA)																						
Rendija de Divergencia	0,6 mm																						
Rendijas Soller Primario	2,5°																						
Muestreo	0,02035° 2theta																						
Rango de Medición	3,5-70,0° 2Theta Radiación CuK $\alpha$ 1																						
Filtro	Níquel																						
Uso de Anti-dispersor de Aire	Si																						
Detector	Lineal LynxEye																						
Tipo de barrido	A pasos																						
Tiempo de muestreo	0,6 segundos																						
Ensayo	<p>•Análisis Cualitativo</p> <p>Los análisis cualitativos de las fases presentes en los especímenes seleccionados de las muestras se realizaron mediante la comparación de los perfiles observados con los perfiles de difracción reportados en la</p>																						

	base de datos PDF-2 del International Centre for Diffraction Data (ICDD).
--	---

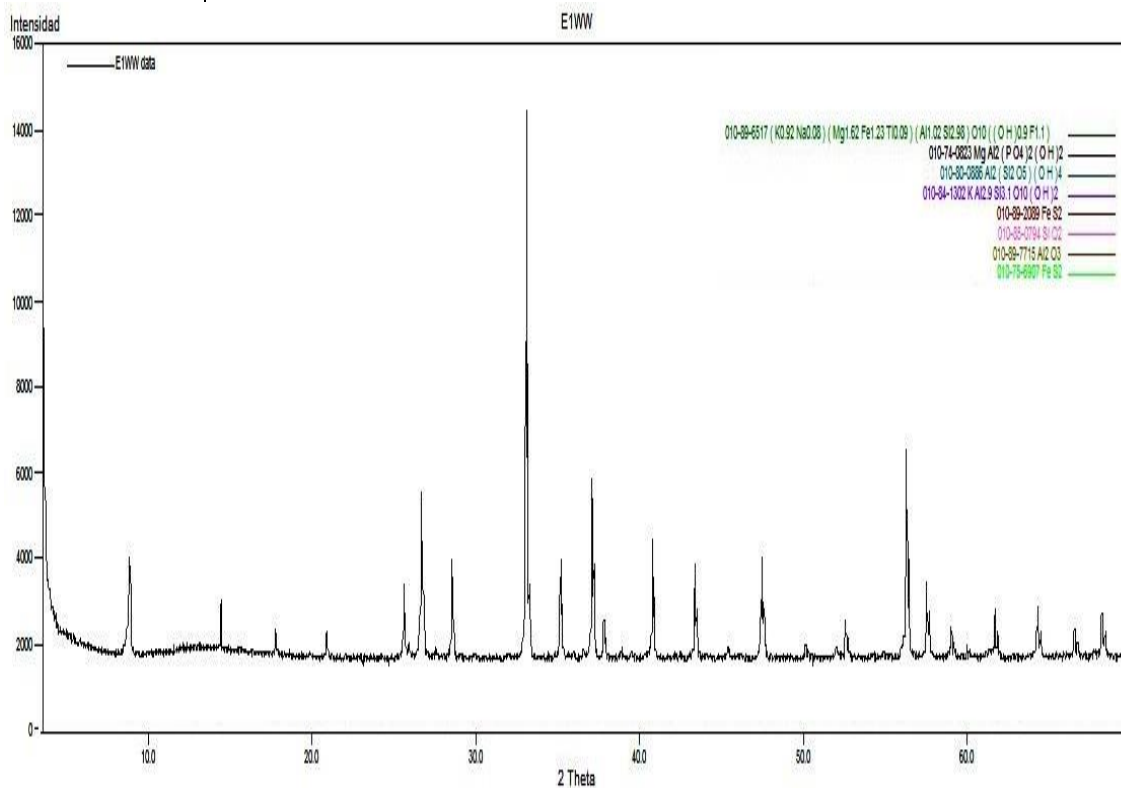
Prueba FRX:

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los análisis cuantitativos se realizaron mediante el método QUANT-EXPRESS (Parámetros Fundamentales) en el rango de sodio (Na) a Uranio (U), en un espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos.</li> <li>• X de Longitud de Onda Dispersiva de 4KW marca BRUKER modelo S8 TIGER.</li> <li>• Tipo de detector: Centelleo (elementos pesados) y Flujo (elementos livianos).</li> <li>• Fuente de rayos-X: Tubo de Rodio (Rh).</li> <li>• Goniómetro: De alta precisión para ángulos theta y 2 theta.</li> </ul>	
Tratamiento de la(s) muestra(s)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Térmico.</li> <li>• Nota: Los especímenes seleccionados de las muestras identificadas con códigos internos A2FX y A2FZ fueron analizados sobre las muestras sin calcinar debido a la alta concentración de azufre presente en las mismas y la ganancia ígnea (G.O.I = 66,19%) obtenida en el espécimen A2FZ luego del proceso de calcinación.</li> </ul>

## Anexo D. Resultados obtenidos mediante al análisis de DRX

Resultados obtenidos por DRX en el mineral del Mina Reina de Oro

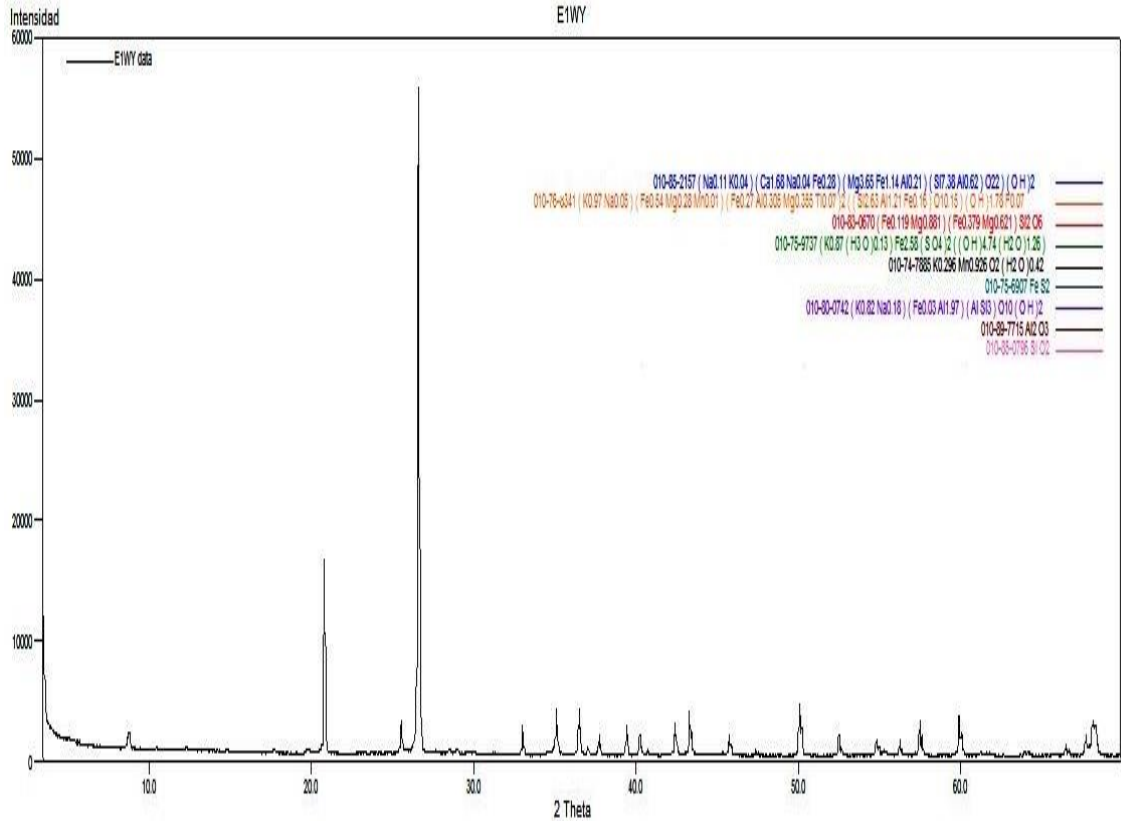
<b>Mineral Reina de Oro</b>	
<b>Fase</b>	<b>Nombre</b>
$FeS_2$	Pirita
$SiO_2$	Cuarzo
$FeS_2$	Marcasita
$KAl_{2,9}Si_{3,1}O_{10}(OH)_2$	Moscovita-2M
$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$	Caolinita
$MgAl_2(PO_4)_2(OH)_2$	Lazulita
$(K_{0,92}Na_{0,08})(Mg_{1,62}Fe_{1,23}Ti_{0,09})(Al_{1,02}Si_{2,98})O_{10}((OH)_{0,9}F_{1,1})$	Flogopita



Resultados obtenidos por DRX en el mineral de la Mina Walter

**Mineral Walter**

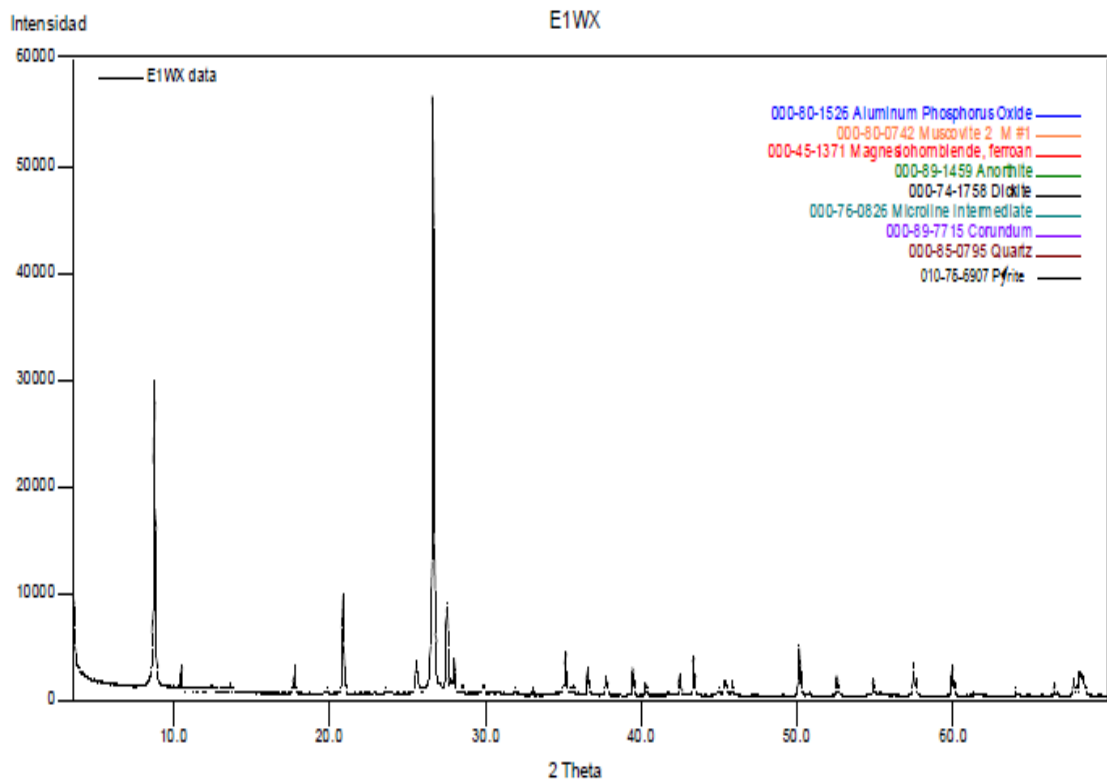
	<b>Fase</b>	<b>Nombre</b>
<b>Cristalino</b>	$SiO_2$	Cuarzo
	$(K_{0,82}Na_{0,18})(Fe_{0,03}Al_{1,97})(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$	Moscovita-2M
	$FeS_2$	Pirita
	$K_{0,296}Mn_{0,926}O_2(H_2O)_{0,42}$	Birnessita
	$(K_{0,87}(H_3O)_{0,13})Fe_{2,58}(SO_4)_2((OH)_{4,74}(H_2O)_{1,26})$	Jarosita
	$(Fe_{0,119}Mg_{0,881})(Fe_{0,379}Mg_{0,621})Si_2O_6$	Silicato de hierro y magnesio
	$(K_{0,97}Na_{0,05})(Fe_{0,54}Mg_{0,28}Mn_{0,01})(Fe_{0,27}Al_{0,305}Mg_{0,3}(Si_{2,63}Al_{1,21}Fe_{0,16})O_{10,15}(OH)_{1,78})$	Biotita
	$(Na_{0,11}K_{0,04})(Ca_{1,68}Na_{0,04}Fe_{0,28})(Mg_{3,65}Fe_{1,14}Al_{0,21}(Si_{7,38}Al_{0,62})O_{22})(OH)_2$	Actinolita



Resultados obtenidos de la Difracción de Rayos- X en el mineral de la Mina Elsy.

**Mineral Elsy**

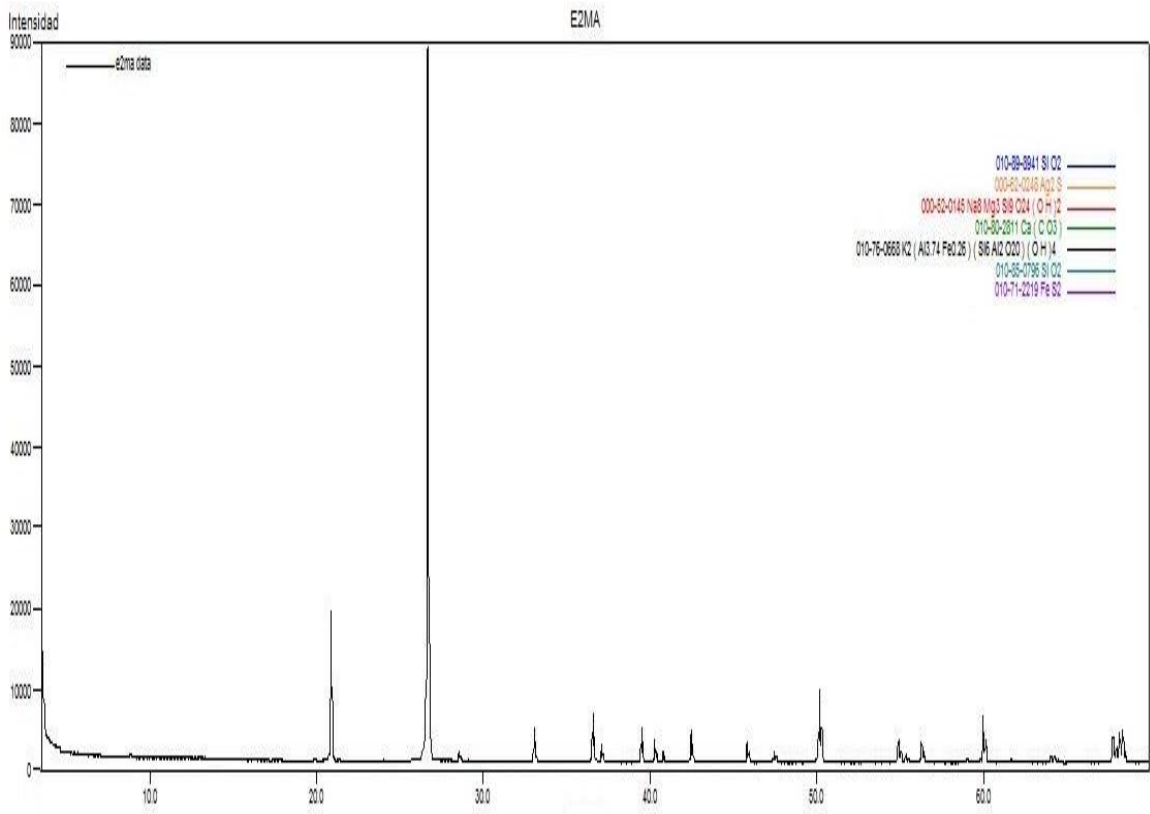
	<b>Fase</b>	<b>Nombre</b>
<b>Cristalino</b>	$SiO_2$	Cuarzo
	$FeS_2$	Pirita
	$K_{0,871}Na_{0,120}Rb_{0,08}Al_{0,94}Si_{3,06}O_8$	Microclina Intermedia
	$Al_2Si_2O_5(OH)_4(HCONH_2)$	Dickita
	$Ca(Al_2Si_2O_8)$	Anortita
	$Ca_2(Mg, Fe^{+2})_4Al(Si_7Al)O_{22}(OH, F)_2$	MagnesiohornBlenda
	$(K_{0,82}Na_{0,18})(Fe_{0,03}Al_{1,97})(AlSi_3)O_{10}(OH)_2$	Moscovita -2M
	$Al(PO_4)$	Fosfato de Aluminio



Resultados obtenidos de la Difracción de Rayos- X en el mineral de la Mina Bagre.

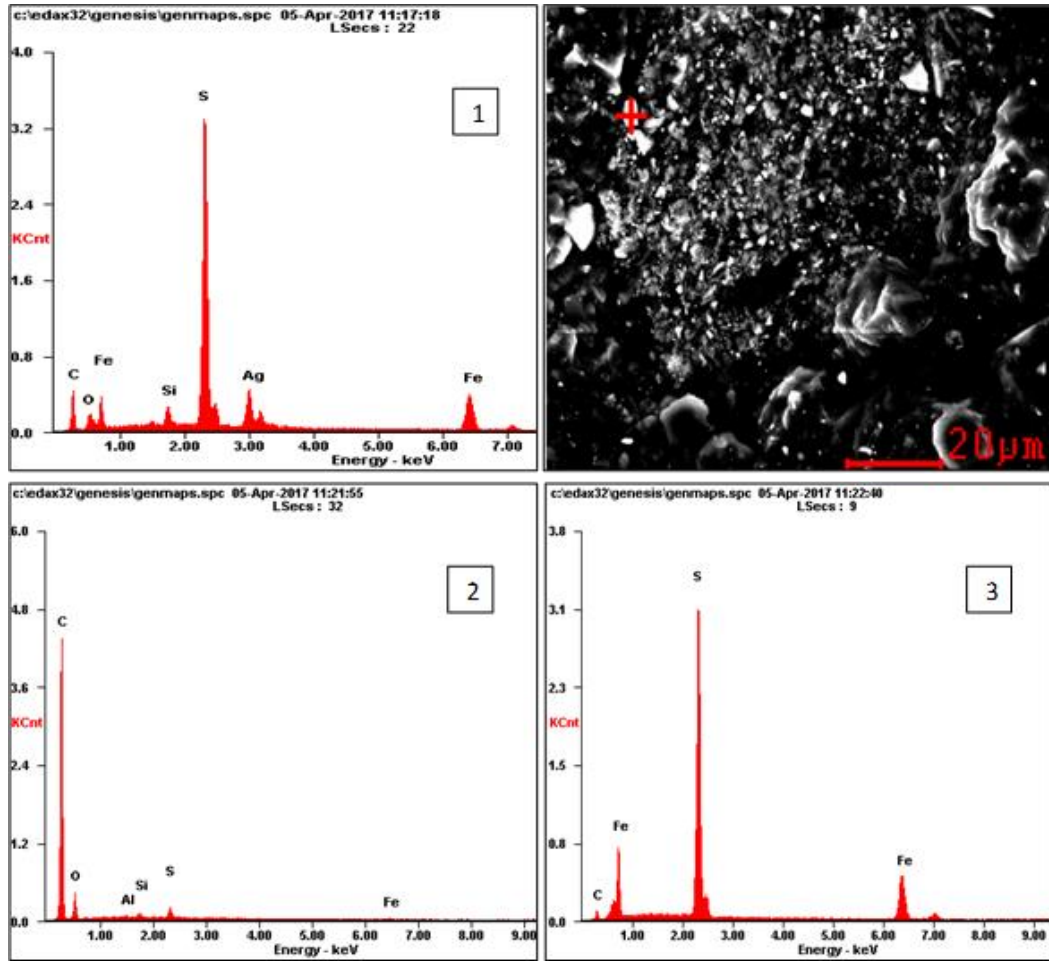
**Mineral Bagre**

		<b>Fase</b>	<b>Nombre</b>
<b>Cristalino</b>		$FeS_2$	Pirita
		$SiO_2$	Cuarzo
		$(Al_{3,74}Fe_{0,26})(Si_6Al_2O_{20})(OH)_4$	Moscovita-2M1
		$Ca(CO_3)$	Calcita
		$Na_8Mg_3Si_9O_{24}(OH)_2$	Sodalita
		$SiO_2$	Cuarzo
		$Ag_2S$	Argentita Alfa

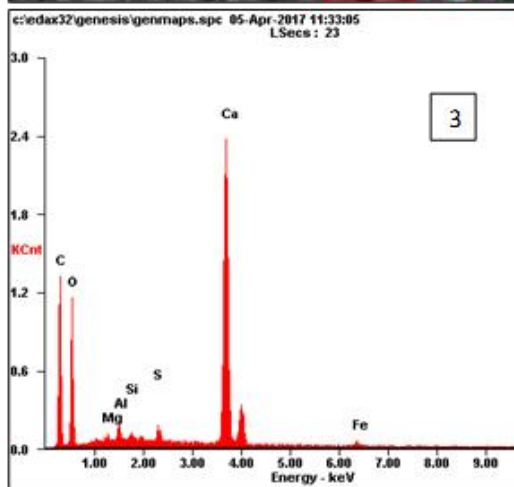
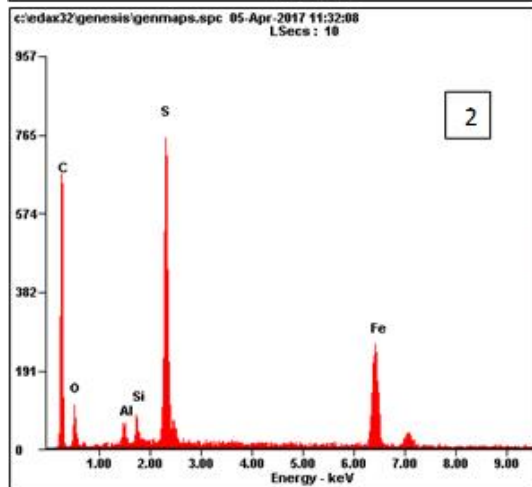
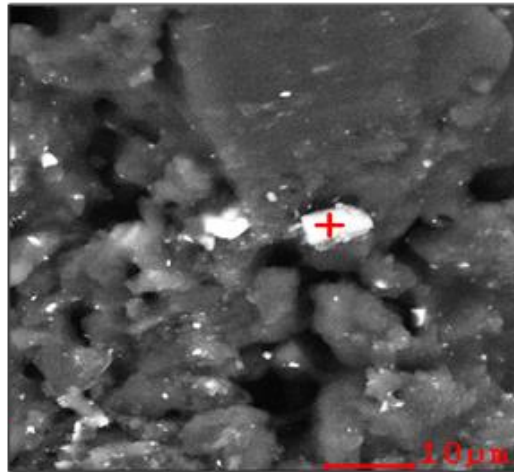
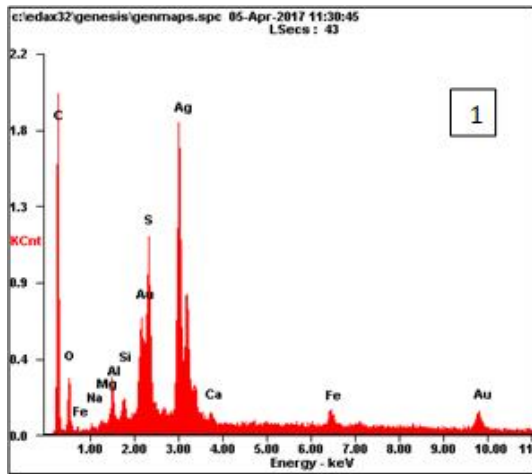


Anexo E. Resultados SEM-EDS aglomerados contactados

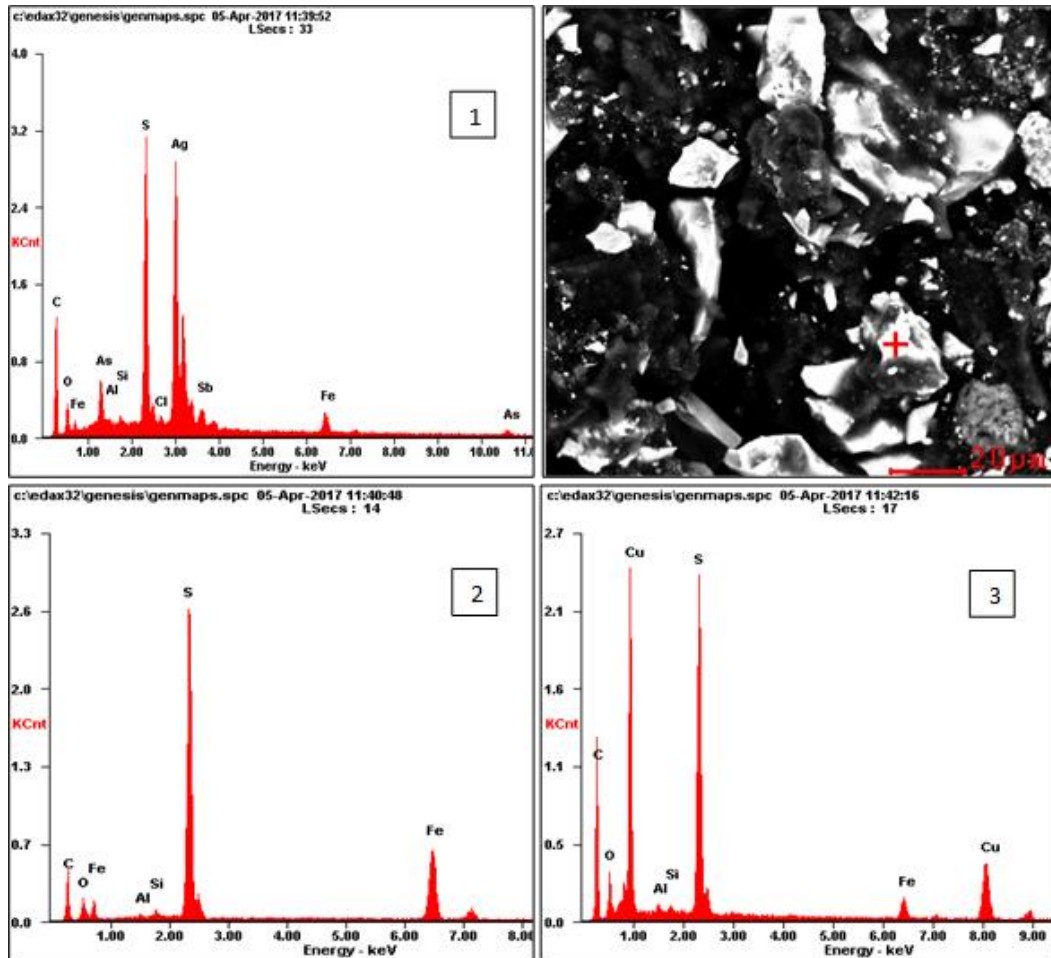
Resultados SEM EDS mineral de la mina Bagre, análisis parte externa aglomerados cargados.



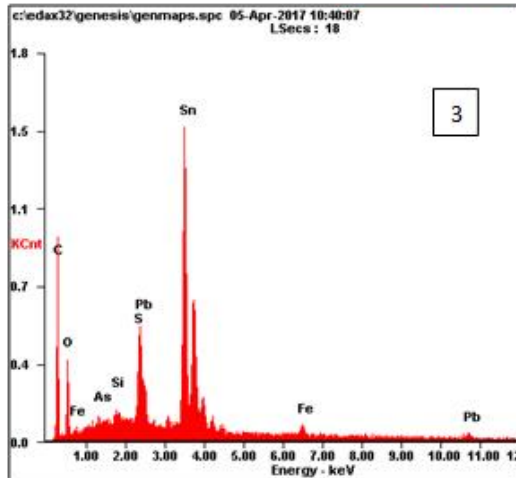
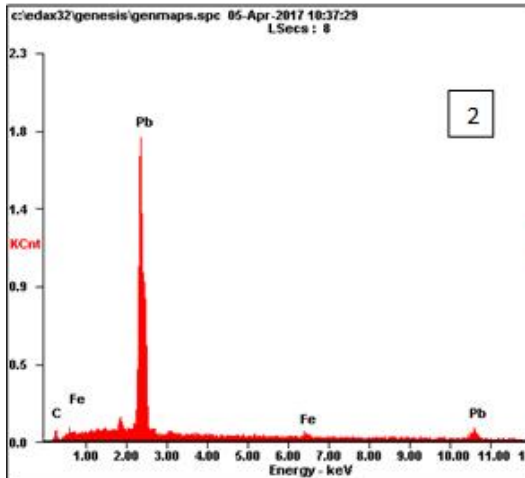
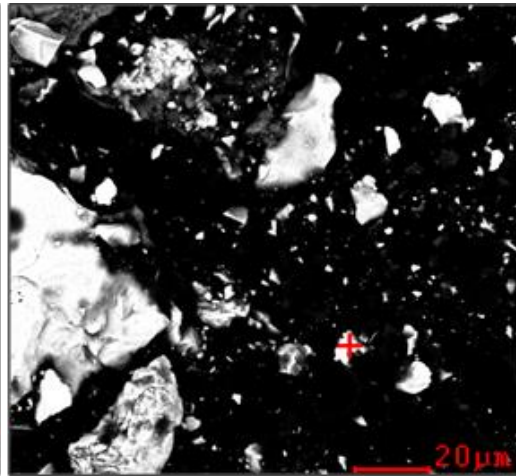
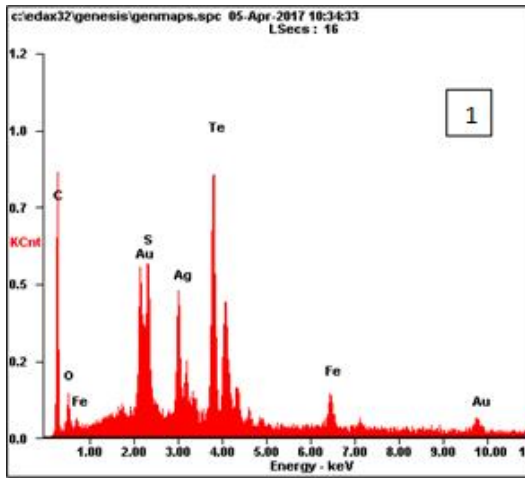
Resultados SEM EDS mineral de la mina Bagre, corte longitudinal, análisis parte interna aglomerados cargados.



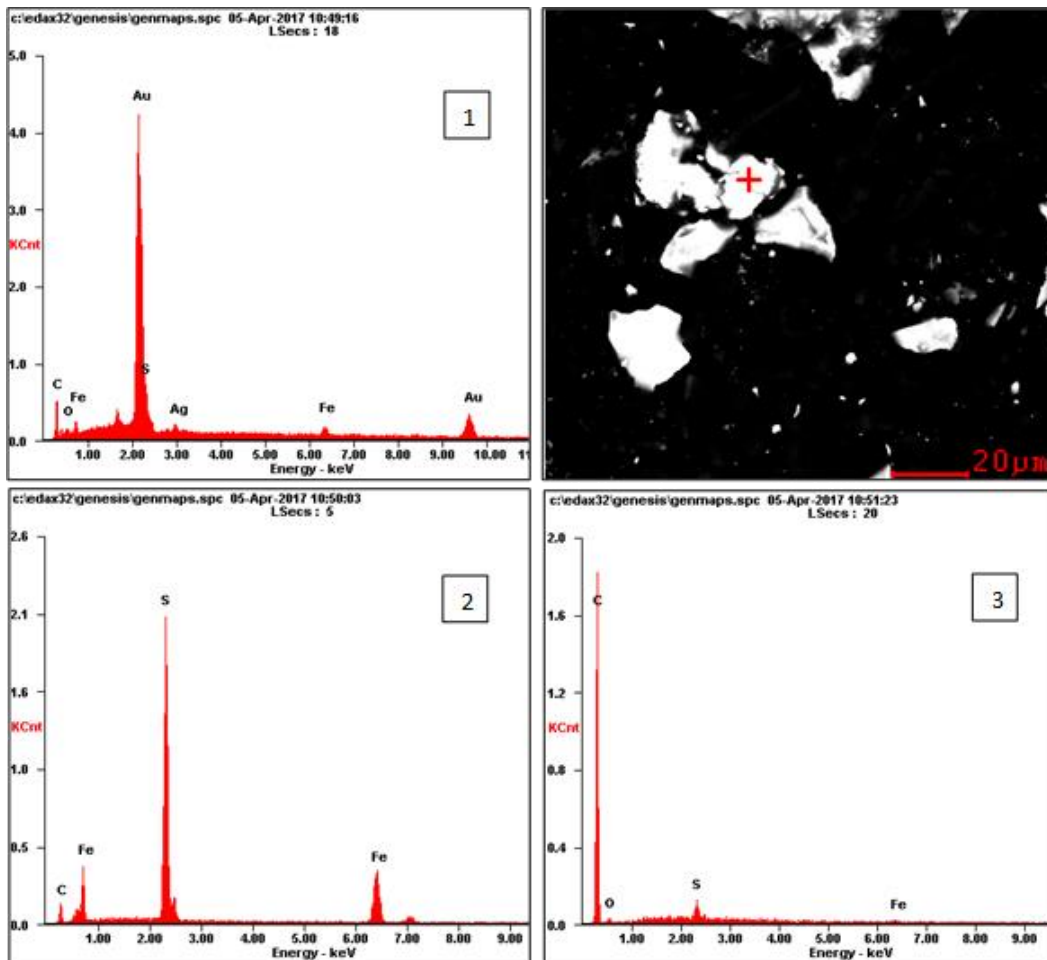
Resultados SEM EDS mineral de la mina Elsy, análisis parte externa aglomerados cargados.



Resultados SEM EDS mineral de la mina Reina de Oro, análisis parte externa aglomerados cargados.



Resultados SEM EDS mineral de la mina Reina de Oro, corte longitudinal, análisis parte interna aglomerados cargados.



Resultados SEM EDS mineral de la mina Walter, análisis parte externa aglomerados cargados.

