

Caracterización por QEMSCAN y FE-SEM de yacimientos de oro tratados artesanalmente con mercurio en Antioquia, Colombia

Characterization by QEMSCAN and FE-SEM of ore bodies gold artisanally treated with mercury in Antioquia, Colombia

Néstor Ricardo Rojas-Reyes¹, Luvér Echeverry-Vargas² & Jesús Cataño-Martínez³

¹Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. nrrojasr@unal.edu.co, ²Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. ljecheverryv@unal.edu.co, ³Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. jacatanom@unal.edu.co
E-mail: nrrojasr@unal.edu.co

Recibido 04/05/2017

Aceptado 31/05/2017

Cite this article as: N. Rojas-Reyes, L. Echeverry-Vargas, J. Cataño-Martínez, "Characterization by qemscan and fe-sem of ore bodies gold artisanally treated with mercury in Antioquia, Colombia", *Prospectiva*, Vol 15, N° 2, 107-116, 2017.

RESUMEN

En este trabajo se presenta la caracterización mineralógica de tres yacimientos auríferos ubicados en el nordeste del departamento de Antioquia, Colombia, que actualmente son beneficiados con mercurio. A tres yacimientos de oro se le realizaron cinco pruebas: determinación de especies minerales y análisis de imágenes en falso color por QEMSCAN®; identificación y cuantificación de oro por FE-SEM; análisis al fuego y pruebas de cianuración. Los resultados por QEMSCAN mostraron que los yacimientos en estudio están formados principalmente por cuarzo, feldespato potásico, moscovita y pirita. Los resultados por FE-SEM arrojaron que el oro se encuentra principalmente como nódulos nanoscópicos esparcidos en la moscovita y el cuarzo. Otra cantidad de oro se encuentra en forma de electrum. El ensayo al fuego entregó que la cantidad de oro estaba entre 1 y 34 g/t y las pruebas de cianuración arrojaron que es posible extraer el oro hasta en un 80% solamente con molienda y cianuración directa sin ningún otro tratamiento. Estos resultados pueden ser la base para una propuesta con métodos metalúrgicos alternativos que permitan la extracción del oro sin la utilización de mercurio.

Palabras clave: Caracterización mineralógica; Yacimientos; Oro; Mercurio; QEMSCAN; FE-SEM.

ABSTRACT

This work presents the mineralogical characterization of three ore bodies gold located in the northeast of the department of Antioquia, Colombia, which are currently benefited with mercury. Five tests were carried out on three gold deposits: determination of mineral species and analysis of false color images by QEMSCAN®; identification and quantification of gold by FE-SEM; fire analysis and cyanidation tests. The results by QEMSCAN showed that the ore bodies are mainly composed of quartz, potassium feldspar, muscovite and pyrite. The results by FE-SEM showed that gold is mainly found as nanoscopic nodules scattered in muscovite and quartz. Another amount of gold is in the form of electrum. The fire assay showed that the amount of gold was between 1 and 34 g/t and the cyanidation tests showed that it is possible to extract the gold up to 80% only with grinding and direct cyanidation without any other treatment. These results can be the basis for a proposal with alternative metallurgical methods that allow the extraction of gold without the use of mercury.

Key words: Mineralogical characterization; Ore bodies; Gold; Mercury; QEMSCAN; FE-SEM.

1. INTRODUCCIÓN

Millones de personas en el mundo trabajan en minería de oro artesanal y en pequeña escala, que hace de esta actividad una fuente importante de ingresos (y algunas veces única) para los habitantes de regiones rurales donde las alternativas económicas son sumamente limitadas. Muchas de las personas dedicadas a la minería viven en condiciones altas de insalubridad debida principalmente al mercurio de la amalgamación y la aplicación de técnicas muy rudimentarias para extraer el metal [1]. A nivel mundial este tipo de minería consume cerca de 1000 Ton/año de mercurio, lo cual es más del 30% del mercurio que se consume en el mundo [2]. Las emisiones de mercurio al medio ambiente debido a la minería artesanal de oro tienen graves implicaciones en la salud de las personas y en el medio ambiente; actualmente existen de 10 a 15 millones de mineros artesanales y pequeños mineros dedicados a la extracción del metal precioso en todo el mundo [3].

En Colombia la mayoría de los yacimientos auríferos son explotados sin tener conocimiento técnico ni preciso de las características de los diferentes tipos de mena en que se presenta el oro, esto conlleva a operaciones de recuperación incorrectas lo que implica bajas recuperaciones de oro, mal aprovechamiento de los re-

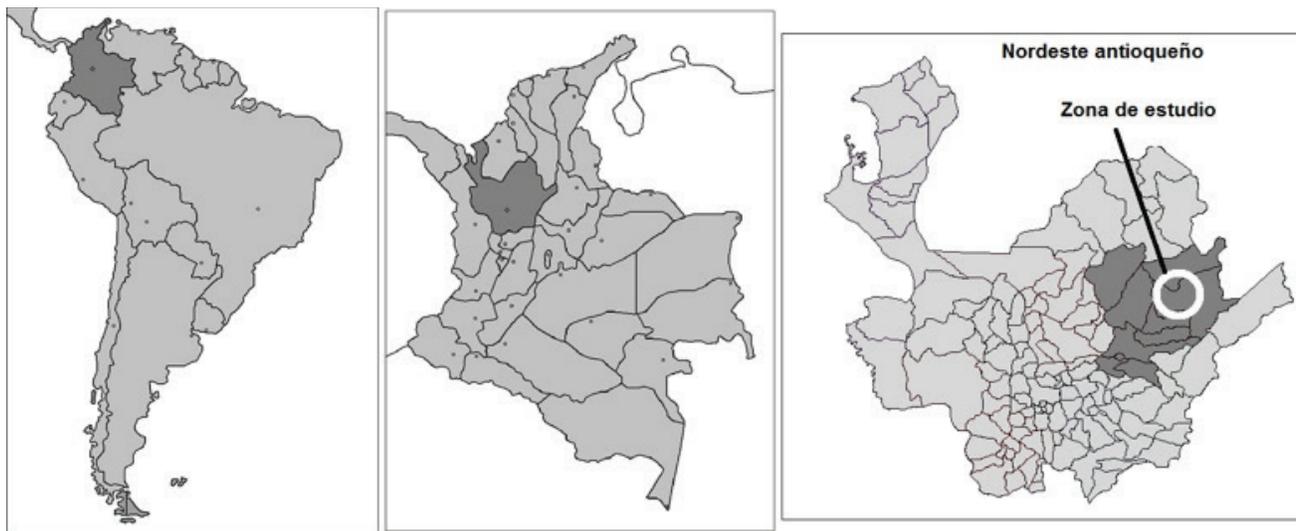
ursos minerales y principalmente grandes impactos ambientales malignos y de salud pública, por los altos niveles de contaminación con mercurio en las zonas donde se llevan a cabo dichas operaciones mineras artesanales.

La región del nordeste antioqueño, en Colombia, ha sido identificada como la región con la mayor contaminación de mercurio del mundo, asociando esta contaminación con las operaciones artesanales aplicadas a la minería de oro [3].

En la figura 1 se muestran las zonas mineras al nordeste de Antioquia – Colombia. La escala de contaminación por mercurio de la zona de estudio es alarmante, pues las actividades mineras se llevan a cabo sin asistencia técnica y de manera rudimentaria. El procesamiento del mineral aurífero de forma artesanal consiste en la adición de mercurio a todo el mineral que contiene el metal precioso y luego la mezcla de mercurio–mineral es reducida de tamaño en pequeños molinos de bolas conocidos como “cocos”, este proceso es denominado amalgamación del mineral, pero es sabido que este proceso propicia pérdidas de mercurio en relaves y efluentes [3, 4]. Se estima que más de 100 toneladas de mercurio al año son emitidas por la minería artesanal de oro en Colombia [4].

Figura 1. Localización de la región en estudio.

Figure 1. Location of the region under study.



Cordy et.al. en 2011 [3] evaluó la contaminación causada por mercurio en el nordeste antioqueño, encontrando que en esta zona se hallan 17 municipios mineros que tienen entre 15.000 y 30.000 mineros artesanales de oro, donde en el procesamiento de oro artesanal, las amalgamas de mercurio–oro son quemadas sin ningún tipo de control; se detectó que el 59% del mercurio agregado en el proceso se pierde en el ambiente,

el 46% en relaves que contaminan las fuentes hídricas y el 4% en forma de vapores cuando la amalgama es quemada.

Es probable que Colombia sea la tercera mayor fuente de emisión de mercurio por minería artesanal de oro a nivel mundial, después de China que emite entre 240 a 650 toneladas de mercurio por año e Indonesia, cuya

emisión de mercurio oscila entre 130 a 160 toneladas por año [4].

La caracterización de yacimientos debe ser una parte fundamental en los estudios mineros modernos, pues en el campo del procesamiento de minerales auríferos constituye una herramienta útil en la definición y evaluación de procesos de beneficio, ya que una correcta caracterización puede evitar la realización de operaciones metalúrgicas inadecuadas, lo cual repercute en la optimización de todo el proceso metalúrgico [5, 6].

Generalmente las estrategias para educar a los mineros artesanales sobre impactos ante la exposición al mercurio y las tecnologías implementadas para prevenir la contaminación han sido limitadamente eficaces [7, 8]; en la presente investigación se propone que para mitigar las emisiones de mercurio causadas por la minería artesanal de oro se requiere tener una comprensión amplia en aspectos técnicos, directamente con una buena caracterización mineralógica del yacimiento de oro en la región del nordeste antioqueño. Para llegar al objetivo propuesto la metodología consistió en realizar una caracterización y determinación de las asociaciones del oro por microscopía electrónica mediante QEMSCAN y FE-SEM, respectivamente, luego una cuantificación del oro presente en las muestras y unas pruebas de lixiviación con cianuro para determinar la cantidad de oro que se puede recuperar mediante este proceso hidrometalúrgico.

2. METODOLOGÍA

Se seleccionaron tres yacimientos auríferos beneficiados artesanalmente con mercurio ubicados alrededor del municipio de Segovia, en el nordeste del departamento de Antioquia – Colombia. Cada yacimiento pertenece respectivamente a cada mina; la Mina 1 en las coordenadas N 07°05'18.7" W 74°42'29.5"; Mina 2 en las coordenadas N 07°05'28.9" W 74°42'06.5"; Mina 3 en las coordenadas N 07°00'18.5" W 74°42'40.4". De cada uno de los yacimientos auríferos se tomaron aproximadamente 5 Kg de mineral mediante muestreo, luego fueron reducidos de tamaño en una pulverizadora de referencia BICO Pulverizer Type UA, a 100 % pasando 1 mm. El material pulverizado fue mezclado y separado en cargas de 1 Kg mediante cuarteo, de este último material se obtuvieron las muestras enviadas a análisis, las cuales fueron montadas en resina epoxi de forma cilíndrica con diámetro de 2,54 cm. El área para análisis fue cortada, pulida y recubierta con carbón para su respectivo análisis por QEMSCAN y FE-SEM.

2.1. Análisis por QEMSCAN Y FE-SEM

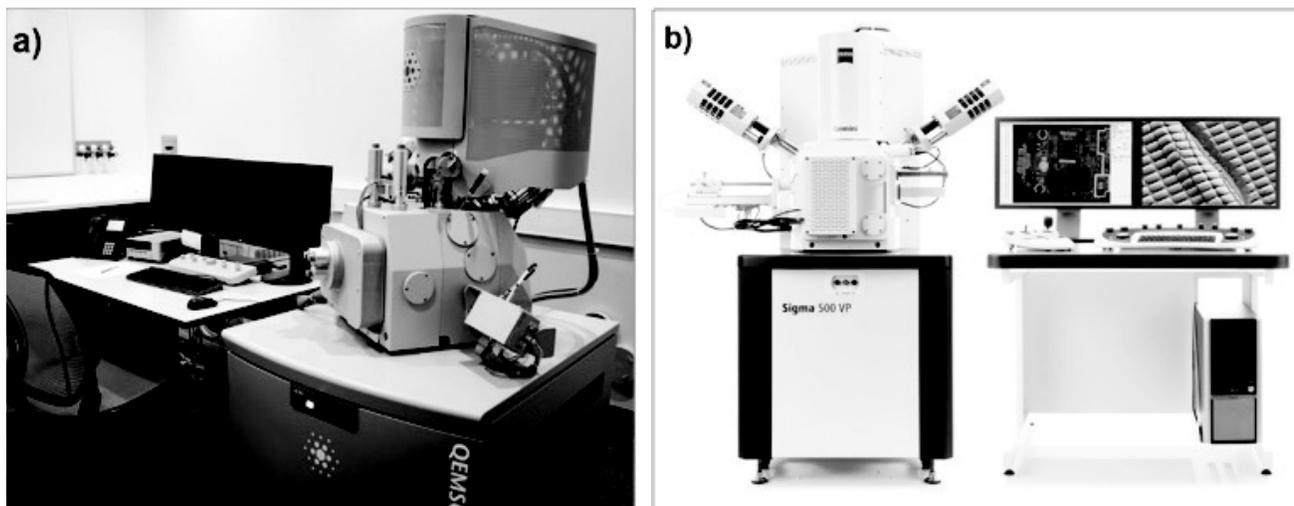
El análisis por QEMSCAN (Quantitative Evaluation of Minerals by SCANNing electron microscopy),

consta de un microscopio electrónico de barrido, equipado con cuatro detectores de rayos X de dispersión de energía con elementos ligeros y una unidad de procesamiento electrónico diseñada por Intellection. En mineralogía automatizada se utiliza un microscopio electrónico de barrido y múltiples espectrómetros de rayos X para determinar la estructura y composición de las rocas a nivel microscópico [8, 9]. En la última década el análisis por QEMSCAN ha sido bastante utilizado para la caracterización de diferentes depósitos minerales, por ejemplo, depósitos no sulfuros de Zn(Pb) [10], bauxitas [11], depósitos de lateritas Ni-Fe [12, 13], depósitos de oro [14, 15] y elementos de tierras raras [16]. Una foto del equipo QEMSCAN se observa en la figura 2a. El análisis por FE-SEM (Field Emission – Scanning Electron Microscopy) consta de un microscopio electrónico de barrido de emisión de campo de referencia Sigma 300 fabricado por la marca ZEISS®. El programa de identificación Mineralogic Mining realiza un análisis del mineral completamente automatizado para identificar y cuantificar minerales (oro en este caso) en tiempo real, mediante la combinación del microscopio electrónico de barrido con uno o más detectores EDS (Energy-Dispersive x-ray Spectroscopy) [17]. La caracterización por FE-SEM es aplicada en la caracterización de diferentes depósitos, como por ejemplo, depósitos de hierro [18, 19], de plomo [20], de ilmenita [21], de manganeso [22] y carbón [23], entre otros. Una foto del equipo FE-SEM de ZEISS se observa en la figura 2b.

2.2. Análisis por ensayo al fuego y pruebas de lixiviación

El ensayo al fuego consiste en producir una fusión de la muestra mineral usando reactivos y fundentes adecuados para obtener una fase metálica de interés (Au y Ag), que posteriormente se somete a análisis químico para determinar el contenido de oro y plata en la muestra mineral [24]. Luego de la determinación del contenido de oro en cada muestra de yacimiento se realizaron pruebas de cianuración convencional con el objetivo de evaluar la recuperación y la cinética de extracción de oro en cada una de las muestras de mineral. Cada prueba se llevó a cabo en un reactor agitado de 2 litros de capacidad. El mineral pulverizado fue adecuado en una pulpa al 30 % de sólidos, el pH de pulpa se mantuvo en 10,5, la concentración de cianuro fue de 1,125 g/l y el tiempo de lixiviación se realizó durante 48 horas. Se tomaron soluciones de cianuración a 2, 4, 8, 24 y 48 horas y se analizaron en un espectrofotómetro de absorción atómica de referencia Thermo Scientific iCE 3300 para determinar la cantidad de oro extraído.

Figura 2. a) Equipo QEMSCAN; b) Equipo FE-SEM de ZEISS.
Figure 2. a) QEMSCAN equipment; b) FE-SEM equipment of ZEISS.



3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El primer análisis por QEMSCAN entregó la composición mineralógica de cada yacimiento, que se observa en la tabla 1. Este primer análisis entrega la abundancia relativa de cada uno de los minerales presentes en la muestra. Se determinó que las muestras se encuentran formadas principalmente por cuarzo, sin embargo el Yacimiento 3 está formado además por feldespato potásico. Las otras fases presentes en todos los yacimientos son feldespato potásico, moscovita y pirita, y las fases menores son biotita, caolinita y calcita, entre otras. Una de las ventajas de los resultados arrojados por el análisis con QEMSCAN es el uso de mapas minerales para identificación de las asociaciones de fases en cada muestra [14]. El segundo tipo de resultado obtenido por el QEMSCAN (figuras 3 a 5) es el análisis de campo por falso color, el cual se reporta por composición mineralógica y tamaño de partícula.

Con respecto a las asociaciones mineralógicas, las partículas minerales reportan asociaciones en cuatro categorías que se muestran visualmente: granos libres, liberados, minerales binarios y minerales ternarios. Los granos “libres” se refieren a partículas con >95% de su superficie identificada de un mineral dado, mientras que grano “liberado” se refiere a partículas con >80% de su superficie identificada con un mineral dado.

Las partículas compuestas por asociaciones minerales binarias y ternarias se refieren a partículas compuestas por dos minerales o tres minerales, respectivamente, en composiciones iguales. Con respecto a la clasificación por tamaño, los granos gruesos se refieren a tamaños +200 μm ; los granos medios a tamaños entre 100 y 200 μm y los granos finos a tamaños menores a 100 μm .

Tabla 1. Mineralogía del yacimiento definida por QEMSCAN.**Table 1.** Ore body mineralogy defined by QEMSCAN.

Mineral	Yacimiento 1 (%)	Yacimiento 2 (%)	Yacimiento 3 (%)
Cuarzo (SiO ₂)	47,91	59,31	32,89
Feldespato – K (KAlSi ₃ O ₈)	8,3	4,97	22,03
Moscovita (KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂)	16,51	15,09	21
Feldespato – Albita (NaAlSi ₃ O ₈)	2,42	0,31	2,27
Biotita (K(Mg, Fe)3AlSi ₃ O ₁₀ (OH, F) ₂)	1,1	0,92	2,43
Feldespato – Plagioclasa (Na,Ca)(Si,Al)3O8	0,89	0,37	0,49
Caolinita (arcilla) (Al ₂ Si ₂ O ₅ (OH) ₄)	0,9	1	0,74
Anfibol			
((AX ₂ Z ₅ (Si,Al,Ti) ₈ O ₂₂)(OH,F,Cl,O) ₂)*	0,72	0,47	0,61
Calcita (CaCO ₃)	1,53	0,89	0,13
Goethita α-FeO(OH)	0,24	0,2	0,31
Clorita			
((Mg,Fe) ₃ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₂ ·(Mg,Fe) ₃ (OH) ₆)	0,4	0,27	1,35
Granate	0,18	0,11	0,28
((Ca,Fe,Mg,Mn) ₃ (Al,Fe,Mn,Cr,Ti,V) ₂ (SiO ₄) ₃)	9,9	4,97	6,15
Pirita (FeS ₂)	0,58	0,27	0,24
Pirrotina (Fe _{0,8-1} S)	0,01	0,25	0,11
Galena (PbS)	0,02	0,61	0,12
Esfalerita (ZnS)	0,37	0,21	0,57
Rutilo / Anatasa (TiO ₂)	8,02	9,78	8,28
Otros			

* A = Na, K, Ca, Pb²⁺; X = Li, Na, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Ca; Z = Li, Na, Mg, Fe²⁺, Mn²⁺, Zn, Co, Ni, Al, Fe³⁺, Cr³⁺, Mn³⁺, V³⁺, Ti, Zr.

Las imágenes en falso color son asociadas a un subgrupo de partículas de cada yacimiento analizado, ordenada cada imagen por tamaño de área analizada. En la figura 3 se observan que las partículas del Yacimiento 1 presentan tamaño fino; con respecto a la mineralogía se presentan mayormente partículas libres y liberadas de cuarzo, también se observan partículas con mezclas de varios minerales y partículas liberadas de moscovita en mayor proporción, pirita, feldespato potásico, y calcita. Además se determinan partículas binarias de feldespato potásico – cuarzo y pirita – biotita y partículas ternarias de cuarzo – esfalerita – biotita y feldespato potásico – biotita – calcita. Las partículas de mezclas minerales se componen de cuarzo, feldespato potásico, moscovita, feldespato-albita, biotita, calcita y pirita.

La figura 4 muestra las partículas del Yacimiento 2, es la muestra que presenta tamaños más finos, pues todas sus partículas son menores a 100 μm. El Yacimiento 2 presenta partículas de cuarzo libres y partículas de moscovita, calcita, pirita y galena liberadas, también presenta mezclas binarias de cuarzo – feldes-

pato potásico, cuarzo – moscovita y biotita – calcita. Además en esta muestra se encuentran partículas de mezclas minerales, pero en menor proporción que las otras muestras.

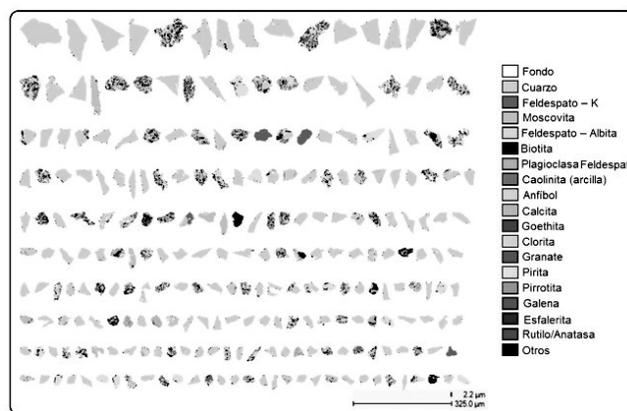
Figura 3. Imágenes en falso color de la muestra del Yacimiento 1 analizado por QEMSCAN.**Figure 3.** False-color fieldscan images of the ore body 1 sample analyzed by QEMSCAN.

Figura 4. Imágenes en falso color de la muestra del Yacimiento 2 analizado por QEMSCAN.
Figure 4. False-color fieldscan images of the ore body 2 sample analyzed by QEMSCAN.

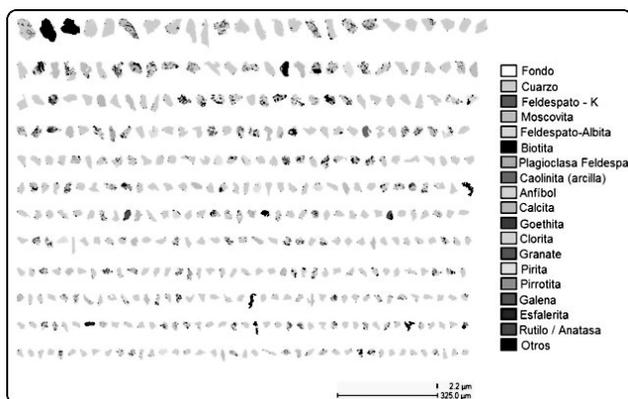
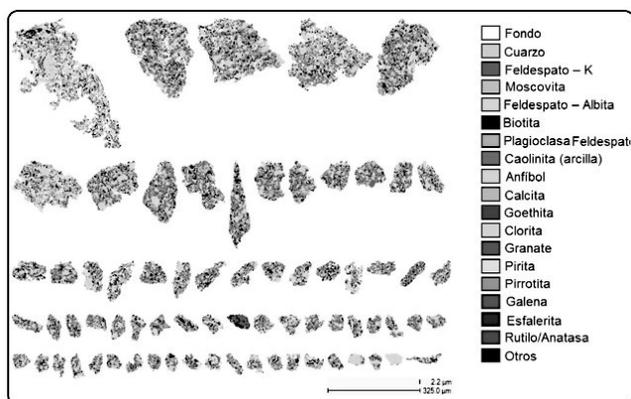


Figura 5. Imágenes en falso color de la muestra del Yacimiento 3 analizado por QEMSCAN.
Figure 5. False-color fieldscan images of the ore body 3 sample analyzed by QEMSCAN.



La figura 5 entrega el análisis del Yacimiento 3, que a diferencia de las otras minas presenta tamaños gruesos y además todas las partículas son una mezcla de minerales, prácticamente no existen partículas libres o liberadas ni tampoco partículas binarias o ternarias, esto concuerda con el análisis mineralógico donde se observa que esta muestra es la que menos presencia de cuarzo tiene (ver tabla 1). Las partículas de este yacimiento son mezclas minerales de cuarzo, feldespato potásico y moscovita en su mayoría, con presencia de feldespato-albita, biotita, clorita y pirita.

El proceso de amalgamación es ideal para partículas de oro libre con tamaños entre 1,5 mm a 75 μm; en los análisis por QEMSCAN realizados no se encontraron partículas de oro libre. Minerales como la pirita y la galena tienen un efecto negativo en el proceso de

amalgamación, en los resultados anteriores se evidencia su presencia en todas las muestras analizadas. Lo anterior demuestra que el uso del mercurio no es el método apropiado para tratar este tipo de yacimientos, se utiliza simplemente porque es un proceso que demanda bajo conocimiento técnico y baja inversión económica.

El tercer análisis realizado a cada una de las muestras se basó en el sistema automatizado de mineralogía con el FE-SEM y el programa ZEISS Mineralogic Mining, con el único objetivo de encontrar la presencia y distribución del oro dentro de los yacimientos minerales. En las tablas 2 a 4 se entregan los resultados de este análisis. El estudio de la distribución del oro en el Yacimiento 1 revela que el 85% del oro se encuentra de forma nodular en la moscovita y el 11% del oro se encuentra en forma de electrum en el cuarzo, como se puede observar en la tabla 2.

Tabla 2. Distribución de oro en las fases minerales del Yacimiento 1 definida por ZEISS.

Table 2. Distribution of gold in the mineral phases of ore body 1 defined by ZEISS.

Mineral	Peso (%)	Ensayo Au (%)	Distribución Au (%)
Moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$)	85,0	0,00119	85,3
Cuarzo (SiO_2)	10,0	0,00119	11,7
Anatasa (Au) (TiO_2)	0,001	0,0000159	1,3
Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$)	0,6	0,0000107	0,9
Apatita $Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$	1,5	0,0000089	0,7
Ankerita ($CaFe^{2+}(CO_3)_2$)	0,03	0,000000326	0,03
Monticellita ($CaMgSiO_4$)	0,01	0,0000000829	0,01

En la tabla 3 se presenta el estudio de la distribución del oro en el Yacimiento 2, donde se observa que el 71% del oro se encuentra en forma de electrum, en partículas de 3 μm de tamaño (en base al programa del ZEISS). El 14% del oro se encuentra en forma nodular como electrum en la pirita y el 12% del oro se encuentra de forma nodular en moscovita y en forma de electrum en el cuarzo. El resto del oro se encuentra como oro metálico electrum nanoscópico asociado con varias fases minerales.

Tabla 3. Distribución de oro en las fases minerales del Yacimiento 2 definida por ZEISS.**Table 3.** Distribution of gold in the mineral phases of ore body 2 defined by ZEISS.

Mineral	Peso (%)	Ensayo Au (%)	Distribución Au (%)
Electrum	0,005	0,002	71,3
Oro submicroscópico	0,007	0,0005	14,5
Moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$)	17,6	0,0002	6,8
Cuarzo (SiO_2)	13,7	0,0002	6,0
Feldespato-K ($KAlSi_3O_8$)	2,9	0,00003	1,1
Dolomita ($CaMg(CO_3)_2$)	0,2	0,000004	0,1
Serpentina ($(Mg,Al,Fe,Mn,Ni,Zn)_{2,3}(Si,Al,Fe)_2O_5(OH)_4$)	0,2	0,000003	0,1
Monacita ((Ce, La, Nd, Sm)PO ₄)	0,3	0,000001	0,04
Apatita ($Ca_5(PO_4)_3(F,Cl,OH)$)	0,2	0,000001	0,04
Siderofilita ($K_2(Fe^{2+},Al)_6(Si,Al)_8O_{20}(OH)_4$)	0,05	0,000001	0,02
Ankerita ($CaFe^{2+}(CO_3)_2$)	0,1	0,000001	0,02
Anatasa (Au) (TiO_2)	0,00002	0,000001	0,02
Clinocloro ($Mg,Fe^{2+}_5Al(OH)_8/AlSi_3O_{10}$)	0,08	0,0000003	0,01
Epidota ($Ca_2(Al, Fe)_3(SiO_4)_3(OH)$)	0,001	0,0000002	0,01
Monticellita ($CaMgSiO_4$)	0,01	0,0000001	0,003

Tabla 4. Distribución de oro en las fases minerales del Yacimiento 3 definida por ZEISS.**Table 4.** Distribution of gold in the mineral phases of ore body 3 defined by ZEISS.

Mineral	Peso (%)	Ensayo Au (%)	Distribución Au (%)
Moscovita ($KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$)	70,6	0,001	68,1
Cuarzo (SiO_2)	26,6	0,0003	29,6
Anatasa (Au) (TiO_2)	0,001	0,00002	2,0
Oro submicroscópico	0,00004	0,000002	0,2

La tabla 4 muestra que el oro presente en el Yacimiento 3 se encuentra de forma nodular en la moscovita en un 68% y el 29% se encuentra en el cuarzo en modo de electrum. Solamente el 0,2% del oro se encuentra de forma nodular en la pirita (oro submicroscópico).

La tabla 5 entrega los resultados del ensayo al fuego para las tres muestras minerales. La muestra con más alto contenido de oro es el Yacimiento 2 con 34 g/t, lo cual es un valor alto pero no excepcional en esta región del país. La segunda muestra con mayor conte-

nido de oro es el Yacimiento 3 con 2 g/t, y la muestra con el menor contenido de oro es el Yacimiento 1 con 1,3 g/t. Estos valores son los que se utilizan para realizar el balance de masa en las pruebas de lixiviación con cianuro.

Tabla 5. Resultados del ensayo al fuego para cada yacimiento.

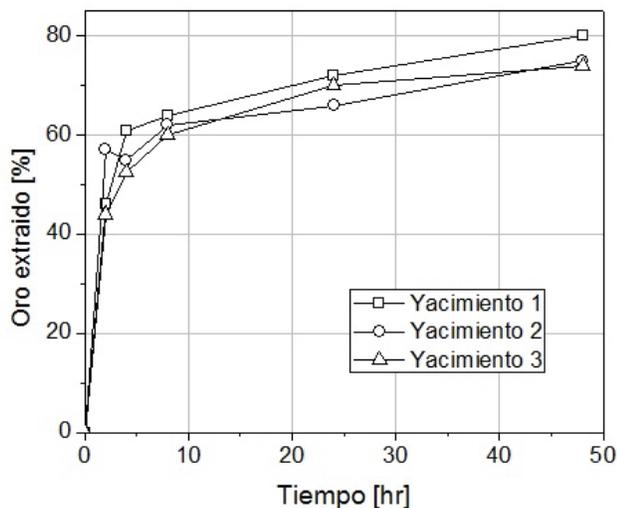
Table 5. Results of the fire assay for each ore body.

Yacimiento	g/t
1	1,3
2	34,0
3	2,0

En la figura 6 se observan las curvas cinéticas de las pruebas de cianuración de oro para cada muestra. Es interesante observar que ya sea un yacimiento rico o pobre, presenta un comportamiento cinético similar durante el proceso de cianuración. El hecho que sea posible una recuperación de oro superior al 75% es una prueba fehaciente de que es posible remplazar la amalgamación por la cianuración, pues con el mercurio se obtienen recuperaciones entre el 40 y el 60% únicamente.

Figura 6. Pruebas de cianuración para los tres yacimientos.

Figure 6. Cyanidation tests for the three ore bodies.



Considerando los bajos porcentajes de minerales cianicidas en los yacimientos reportados por el QEMSCAN, como pirita, pirrotina, galena y esfalerita, se respalda la posibilidad de plantear procesos de lixiviación para la extracción de oro a partir de estos yacimientos. Debido a la alta presencia de cuarzo en todas las muestras minerales, también es posible plantear un proceso antes de someter el mineral a cianuración, por ejemplo, una concentración gravimétrica en donde se pueden concentrar los minerales que acompañan al oro, como sulfuros y cuarzos. Basado en lo anterior también es posible proponer un proceso de flotación antes de una cianuración directa, con el objetivo de concentrar minerales como moscovita y cuarzo.

4. CONCLUSIONES

A partir de todas los análisis realizados se demuestra que es factible recuperar oro a partir de los yacimiento encontrados en el nordeste de Antioquia, únicamente con una reducción de tamaño en un molino convencional seguida de una lixiviación con cianuro; con estos dos pasos es posible recuperar hasta el 80% de oro para las tres muestras estudiadas, como se observa en las curvas cinéticas (figura 6), sin la utilización del mercurio.

Se demostró que los yacimientos se encuentran formados principalmente por cuarzo, moscovita y feldespato potásico, además de otras fases menores como pirita, biotita y clorita, entre otras (ver figuras 3, 4 y 5). En los yacimientos 1 y 3 el oro se presenta principalmente como nódulos nanoscópicos esparcidos en la pirita y la moscovita (ver tablas 2, 3 y 4). En el yacimiento 2 el oro se presenta principalmente como electrum en partículas de varios micrones de tamaño (ver tabla 3). En las tres muestras se encuentra oro unido a la anatasa. Los yacimientos que actualmente están siendo tratados con mercurio exhiben minerales de pirita y galena; y además presencia de oro submicroscópico, con lo cual se demuestra que la amalgamación no es el método ideal para el tratamiento de los yacimientos de oro del nordeste antioqueño.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, a COLCIENCIAS por el financiamiento del proyecto con código 111866044660, al Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad de Concepción - Chile y al Laboratorio de ZEISS en Cambridge - Inglaterra.

REFERENCIAS

[1] A. Saldarriaga-Isaza, C. Villegas-Palacio, S. Arango, "The public good dilemma of a non-renewable common resource: A look at the facts of artisanal gold mining". *Resources Policy*, vol. 38, no. 2, pp. 224-232,

2013. Disponible desde < <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2013.02.001>>.
- [2] E. Swain, P. Jakus, G. Rice, F. Lupi, P. Maxson, J. Pacyna, "Socioeconomic consequences of mercury use and pollution". *Ambio*, 36 (1), pp. 45–61, Feb. 2007. Disponible desde <DOI: 10.1579/0044-7447(2007)36[45:SCOMUA]2.0.CO;2 >.
- [3] P. Cordy, M. Veiga, I. Salih, S. Al-Saadi, S. Console, O. Garcia *et al.* "Mercury contamination from artisanal gold mining in Antioquia, Colombia: The world's highest per capita mercury pollution". *Science of The Total Environment*, vol. 410-411, pp. 154–60, Dec. 2011. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.006>>.
- [4] K. Telmer and M. Veiga. *Mercury Fate and Transport in the Global Atmosphere*. Springer US. New York, pp. 131-172, 2009. Disponible desde <https://doi.org/10.1007/978-0-387-93958-2_6>.
- [5] *Técnicas mineralógicas, químicas y metalúrgicas para la caracterización de menas auríferas*. Colombia. Ministerio de Minas y Energía. Instituto de Investigaciones en Geociencias, Minería y Química (INGEOMINAS). 1st ed. Colombia Masters, T. Neural Network Recipes in C++. New York: Academic Press, 1993.
- [6] W. Goodall, "Characterization of mineralogy and gold deportment for complex tailings deposits using QEMSCAN®". *Minerals Engineering*, vol. 21, no. 6, pp. 518–523, May. 2008. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.02.022>>.
- [7] G. Hilson, "Abatement of mercury pollution in the small-scale gold mining industry: Restructuring the policy and research agendas". *Science of The Total Environment*, vol. 362, no. 1–3, pp. 1–14, Jun. 2006. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.065>>.
- [8] G. Hilson, C. Hilson, S. Pardie, "Improving awareness of mercury pollution in small-scale gold mining communities: Challenges and ways forward in rural Ghana". *Environmental Research*, vol. 103, no. 2, pp. 275-287, Feb. 2007. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.envres.2006.09.010>>.
- [9] P. Gottlieb, G. Wilkie, D. Sutherland, E. Ho-Tun, *et al.*, "Using quantitative electron microscopy for process mineralogy applications". *JOM*, vol. 52, no. 4, pp. 24–27, April 2000. Disponible desde <<https://doi.org/10.1007/s11837-000-0126-9>>.
- [10] L. Santoro, M. Boni, G. Rollinson, N. Mondillo, G. Balassone, A. Clegg. "Mineralogical characterization of the Hakkari nonsulfide Zn (Pb) deposit (Turkey): The benefits of QEMSCAN®". *Minerals Engineering*, vol. 69, pp. 29–39, Dec. 2014. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.002>>.
- [11] M. Boni, G. Rollinson, N. Mondillo, G. Balassone, L. Santoro, "Quantitative mineralogical characterization of karst bauxite deposits in the southern apennines, Italy". *Economic Geology*, vol. 108, no. 4, pp. 813–833, May 2013. Disponible desde <<https://doi.org/10.2113/econgeo.108.4.813>>.
- [12] J. Andersen, G. Rollinson, B. Snook, R. Herrington, R. Fairhurst, "Use of QEMSCAN® for the characterization of Ni-rich and Ni-poor goethite in laterite ores". *Minerals Engineering*, vol. 22, no. 13, pp. 1119–1129, Oct. 2009. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.03.012>>.
- [13] K. Anderson, F. Wall, G. Rollinson, C. Moon, "Quantitative mineralogical and chemical assessment of the Nkout iron ore deposit, Southern Cameroon". *Ore Geology Reviews*, vol. 62, pp. 25–39, Oct. 2014. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.02.015>>.
- [14] W. Goodall, P. Scales, A. Butcher, "The use of QEMSCAN and diagnostic leaching in the characterisation of visible gold in complex ores". *Minerals Engineering*, vol. 18, no. 8, pp. 877–886, July 2005. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2005.01.018>>.
- [15] W. Goodall, and P. Scales, "An overview of the advantages and disadvantages of the determination of gold mineralogy by automated mineralogy". *Minerals Engineering*, vol. 20, no. 5, pp. 506–517, April 2007. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.01.010>>.
- [16] D. Smythe, A. Lombard, L. Coetzee, "Rare earth elements deportment studies utilizing QEMSCAN technology". *Minerals Engineering*, vol. 52, pp. 52–61, Oct. 2013. Disponible desde <<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2013.03.010>>.
- [17] ZEISS (2017) - United Kingdom, optical and optoelectronic technology. Acceso enero 2017. [Online]. Disponible desde <<https://www.zeiss.co.uk/corporate/home.html>>.
- [18] M. AbroA, H. MallahA, G. Pathan, A. Böhm. "Mineralogical Characterization of Dilband Iron Ore Deposits of Balochistan, Pakistan". *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte*, vol. 153, no. 6, pp. 206-210. June 2008. Disponible desde <<https://doi.org/10.1007/s00501-008-0376-3>>.

[19] P. Sengupta, P. Saika and P. Borthakur. "SEM-EDX Characterization of an iron-rich kaolinite clay". *Journal of Scientific & Industrial Research*, vol. 67, pp. 812-818. Oct. 2008.

[20] G. Onyedika, K. Onwukamike, C. Onyenehide, and M. Ogwuegbu. "Qualitative and mineralogical Characterization of lead deposits in Ishiagu, Ebonyi State Nigeria", *Characterization of Minerals, Metals, and Materials 20015*. Edited by John S. carpenter et al., pp. 307-316, TMS, 2015.

[21] A. Mehdilo, M. Irannajad and B. Rezai. "Applied mineralogical characterization of ilmenite from Kahunuj placer deposit, Southern Iran", *Periodico di Mineralogia*, vol. 84, no. 2, pp. 289-302, 2015. Disponible desde <<https://doi.org/10.2451/2015PM0014>>.

[22] S. Ismail, S. Saiyid, H. Hussin, N. Shah. "Chemical and mineralogical characterization of Malaysian low-grade manganese ore", *Periodico di Mineralogia*, vol. 85, pp. 277-288, 2016. Disponible desde <<https://doi.org/10.2451/2016PM612>>.

[23] R. Venkataraman and S. Eser. "Characterization of solid deposits formed from short durations of jet fuel degradation: carbonaceous solids", *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 47, no. 23, pp. 9337-9350, 2008. Disponible desde <<https://doi.org/10.1021/ie8010066>>.

[24] A. Diamantatos. "Fire-assay collection of gold and silver by copper", *Talanta*, vol. 34, no. 8, pp. 736-738, 1987. Disponible desde <[https://doi.org/10.1016/0039-9140\(87\)80231-X](https://doi.org/10.1016/0039-9140(87)80231-X)>.