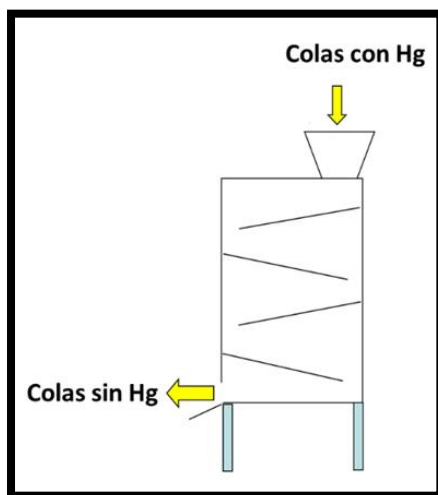


Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia

*Reporte Resultados Pruebas de Laboratorio de Recuperación de Mercurio por las Placas de Cobre
Febrero 2020*



Financiado por:



En asociación con:



Implementado por:



Con el apoyo técnico de:



Esta publicación fue financiada por una subvención del Departamento de Estado de los Estados Unidos. Las opiniones, los resultados y las conclusiones que se expresan en este documento son de los autores y no reflejan necesariamente las del Departamento de Estado de los Estados Unidos.



Equipo técnico

Alfonso Rodríguez Pinilla

Director Pure Earth Colombia

Angie Tatiana Ortega-Ramirez

Coordinadora de Proyectos Pure Earth Colombia

Lina Hernández

Coordinadora Regional para América Latina y el Caribe Pure Earth

Natalia Echavarría Gómez

Profesional de Apoyo Centro Nacional de Producción más Limpia

Elena Gravilova

Gerente Innova Ambiental

Miguel Osejo Knudson

Director de investigación y desarrollo Innova Ambiental

Agradecimientos a

Shun-Ping Chau

Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA)

Marcello Veiga

Profesor Emérito, Universidad de Columbia Británica



Tabla de Contenido

1.	Introducción	1
2.	Caracterización de Relaves.....	3
2.1	Ubicación y tipo de relave	3
2.2	Pretratamiento de relave	6
2.3	Caracterización mineralógica	7
2.4	Caracterización química de los relaves	11
3.	Placas de Cobre	13
3.1	Preparación de las placas de cobre	13
3.2	Ensayo de relaves en placas de cobre	15
3.3	Determinación de Hg y Au posterior al procesamiento de relaves	16
3.4	Hallazgos del proceso	17
4.	Análisis de resultados.....	18
4.1	Lecturas Fluorescencia Rayos X (XRF)	18
4.2	Datos de Absorción Atómica (AA)	20
4.3	Vapores de Mercurio	21
4.4	Contenido de Oro	22
4.5	Presencia de Cianuro	24
4.6	Prueba de toxicidad por lixiviación (TCLP)	25
5.	Conclusiones	29
6.	Referencias	30



1. Introducción

Este documento presenta los resultados de las pruebas realizadas a escala de laboratorio de una de las tecnologías seleccionada para la recuperación de mercurio presente en los relaves generados por minería de oro artesanal y de pequeña escala (ASGM, por sus siglas en Inglés). Estas pruebas corresponden a actividades del proyecto titulado: “*Promoviendo la recuperación y manejo responsable del mercurio en los relaves contaminados de minería de oro artesanal en Colombia*”, el cual es ejecutado por Pure Earth y financiado por el Departamento de Estado de los Estados Unidos. Como socios estratégicos del proyecto para el apoyo técnico se suman, el Centro Nacional de Producción más Limpia y Tecnologías Ambientales (CNPMLTA), y para la parte inicial de la construcción de las placas la empresa privada Innovación Ambiental -INNOVA S.A.S E.S.P.

Las pruebas tuvieron lugar en las instalaciones del Instituto de Minerales - CIMEX de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín y son consideradas como la etapa previa para el escalamiento a pruebas piloto en planta; la tecnología probada corresponde a las Placas de Cobre.

2. Caracterización de Relaves

2.1. Ubicación y tipo de relave

Desde el mes de junio de 2019 se realizaron una serie de visitas a diferentes departamentos del país en áreas que reportan actividad minera artesanal de oro, con la sospecha de uso de mercurio y la presencia de relaves contaminados. Finalmente se recolectaron relaves de cuatro áreas, las cuales por sus diferentes características permite hacer una comparación de la efectividad de las pruebas para cada tipo de relave seleccionado. Los relaves seleccionados son:

Tabla 1. Relaves seleccionados para pruebas de laboratorio

Relave	Ubicación	Kg
San Roque	Antioquia	20
Soto Mayor	Nariño	15
Rio Quito	Chocó	20
Rio Neguá	Chocó	20

La Figura 1 muestra la ubicación de estos relaves en el territorio nacional.

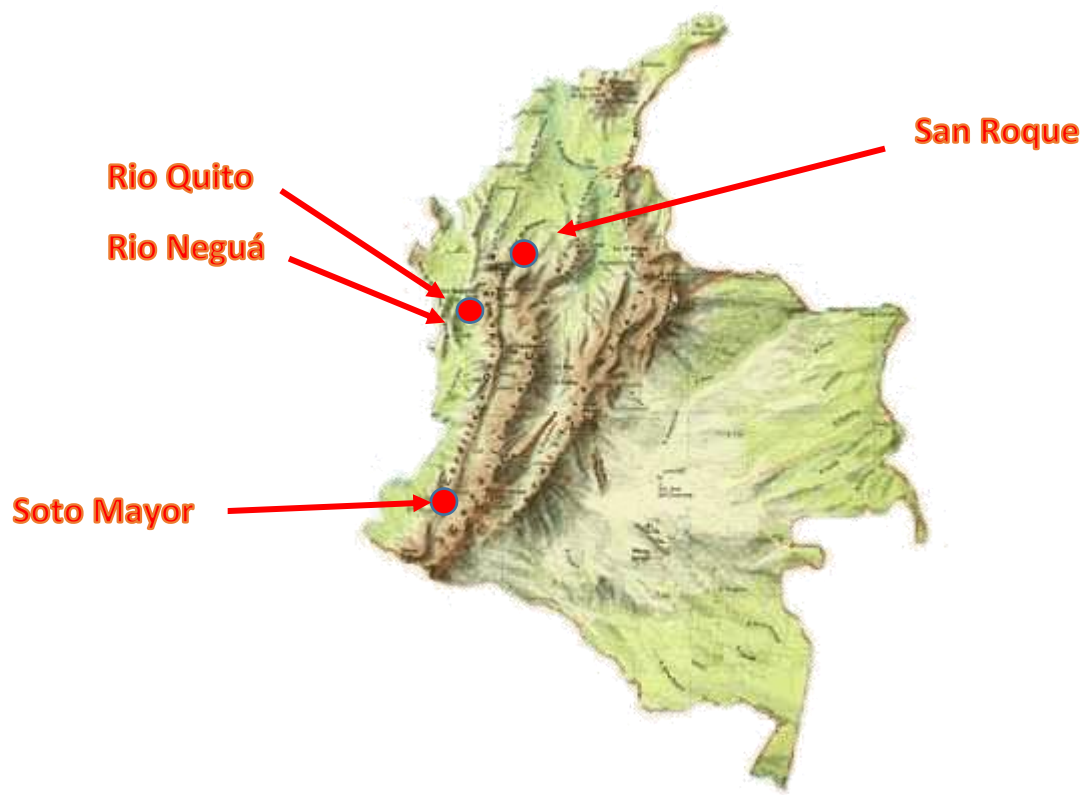


Figura 1. Ubicación de relaves contaminados

Es necesario resaltar que la selección de los sitios para la evaluación de los relaves tiene una revisión de la explotación minera del país que debe respaldar la representatividad de los sitios seleccionados. De acuerdo con lo anterior, se reporta que los departamentos que concentran la mayor actividad extractiva son Boyacá (18%), Antioquía (14%), Bolívar (10%) y Cundinamarca (10%), esta información es reportada por el catastro minero nacional, el cual expone que el departamento de Antioquía es quien tiene el mayor porcentaje de extracción de minerales metálicos con un 34%, seguido por Bolívar (28%), Chocó (12%) y Santander (6%). El nordeste de Antioquia se caracteriza por tener los 3 de los centros de explotación de minería aurífera más antiguos del país en Cáceres, Remedios y Segovia. (Jiménez, 2019). San Roque también es un municipio del nordeste antioqueño con fuerte presencia de minería



artesanal y uso de mercurio, pero también importantes avances en el proceso de formalización (Zapata, 2019). Es por esto que se espera que particularmente los relaves localizados en San Roque comprendan una composición de mercurio (Hg) y Oro (Au) representativo que permita una evaluación detallada de recuperación de Hg por la tecnología de los Platos de Cobre planteados en el presente informe.

En la Tabla 2 se hace la descripción de la ubicación de los relaves y su estado en el momento de la recolección, al igual que el tipo de minería que generó el relave.

Tabla 2. Descripción ubicación de los relaves.

Relave	Descripción del área	Actividad minera identificada
San Roque – Antioquia	Las Unidades Mineras (UM) están ubicadas en 3 veredas del Municipio de San Roque, las cuales son Vda. El Despertar, Vda. La Carrilera y Vda El Basal. El área donde están ubicadas las UM corresponde a zona rural con cercanía a viviendas habitadas suelos con vegetación y fuentes de agua.	Estas son plantas de procesamiento artesanal activas ("entable"), donde el oro se obtiene a través de la amalgamación de mercurio. Los trabajadores y las personas que habitan en estas veredas y transitan por las cercanías de las UM están expuestos al mercurio por inhalación / ingestión. La roca procesada proviene de minería de veta.
Andes – Nariño	La mina Gualconda está ubicada en el municipio de Los Andes, en el departamento de Nariño, en una zona montañosa y empinada. Se han depositado toneladas de relaves con mercurio en el sitio durante más de cuatro décadas. Si bien algunos de los relaves han sido contenidos en sacos, fracciones significativas se dispersan en pilas en un área sensible, muy cerca del arroyo Honda.	La mina Gualconda ha estado en uso desde 1975 y corresponde a minería de tipo veta.
Rio Quito – Choco	Área de la selva con evidencia de daño ambiental a lo largo de la orilla del río,	Las zonas se ven afectadas por mineros aluviales ilegales activos.



	causada por dragas ilegales que permanecen activas.	
Rio Neguá – Choco	Área de selva con evidencia de daños ambientales a lo largo de la orilla del río. Los mineros a pequeña escala frecuentan el área utilizando la técnica barequeo, que utiliza el barrido para obtener oro residual.	Las zonas se ven afectadas por la extracción ilegal de oro aluvial, pero estas operaciones están actualmente abandonadas.

2.2. Pretratamiento de relave

Teniendo en cuenta las capacidades y limitantes de los equipos utilizados en el montaje de pruebas y con el fin de poder realizar unos ensayos estandarizados para todos los relaves, estos fueron tratados previamente en un tamizado en malla 30 y 70. Esto permite eliminar las partículas de gran tamaño que pueden intervenir en la eficiencia de las pruebas debido a que las partículas que se retienen en cada una de las mallas son descartadas y nada más se trabaja con el material pasante. Es importante mencionar que en esta etapa del proceso se realizó un riguroso lavado a los materiales que se iban a descartar para asegurarse de que no se generaran pérdidas de mercurio. Así mismo los relaves fueron concentrados por una mesa vibratoria, para lo cual se pudo obtener dos tipos de relaves para San Roque en los que se determinaron como concentrado y otros como medios, cada uno de ellos tuvo el mismo protocolo de procesamiento de pruebas. La mesa vibratoria clasifica los minerales según su peso específico, de esta manera en los concentrados quedan los materiales más pesados como lo son los sulfuros, oro y mercurio. En los medios quedan los materiales cuyo peso específico es menor que aquellos de los concentrados. La mesa no separa por tamaño, sin embargo, es importante que el alimento de la mesa tenga un tamaño uniforme ya que, si un mineral tiene poco peso específico, pero es de gran tamaño puede, puede ir a la corriente de concentrados y contaminarlos. Es por esto que una etapa previa a la concentración es la clasificación como se explicó anteriormente.

Cabe anotar que pudo presentarse pérdidas de mercurio en este proceso de tamizaje, por tal motivo se evaluará esta limitante en el momento de desarrollar las pruebas en campo y con mayor material.



Figura 2. Mesa Vibratoria para concentración de relaves.
Fuente: <https://www.911metallurgist.com/metalurgia/mesa-concentradora-para-oro/>

El análisis diferenciado de concentrados y finos es una fase importante para el pretratamiento de los relaves. La razón es que el procesamiento diferenciado será dado por el tipo de relave y como sea obtenido de las relaveras y directamente del sitio donde se encuentran presentes, por ello mismo, se llegará a establecer si el relave concentrado o fino, tiene la misma capacidad de liberar el mercurio (Hg), en las placas de cobre probadas. Es importante tener este paso en cuenta en el momento de realizar las pruebas piloto en campo.

2.3. Caracterización mineralógica.

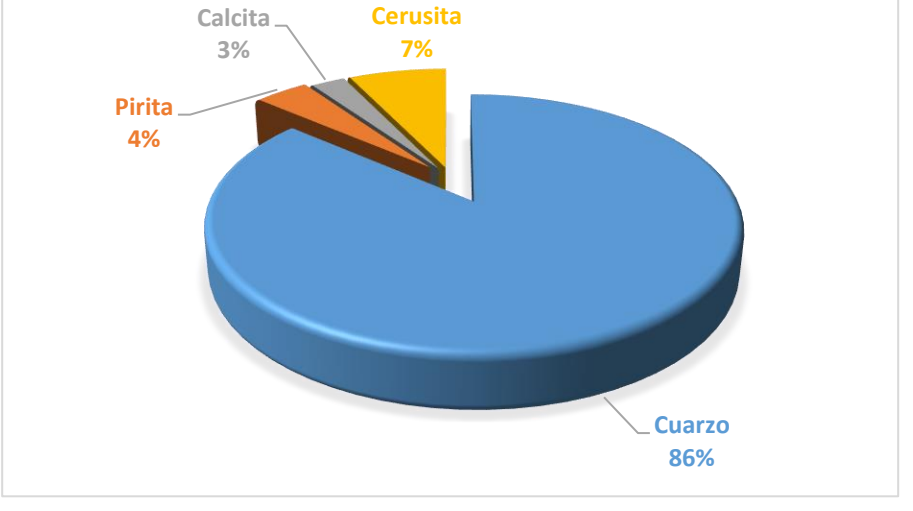
La mineralogía de los relaves se realizó por medio de dos pruebas, el primer ensayo consiste en una Fluorescencia de Rayos X (FRX) con el equipo Epsilon 1 – Panalytical, el cual reporta las concentraciones de los elementos en porcentaje. El segundo ensayo consiste en una Difracción de Rayos X (DRX) con el equipo de referencia Aeris y cuyo fin es detectar estructuras cristalinas en la muestra y permite conocer los minerales presentes en esta. Estas dos pruebas fueron desarrolladas por el laboratorio Cecoltec.



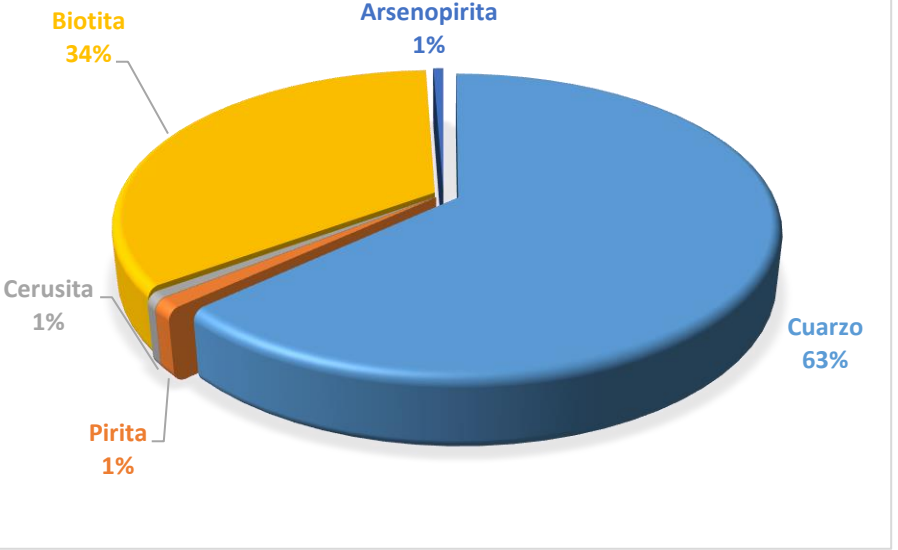
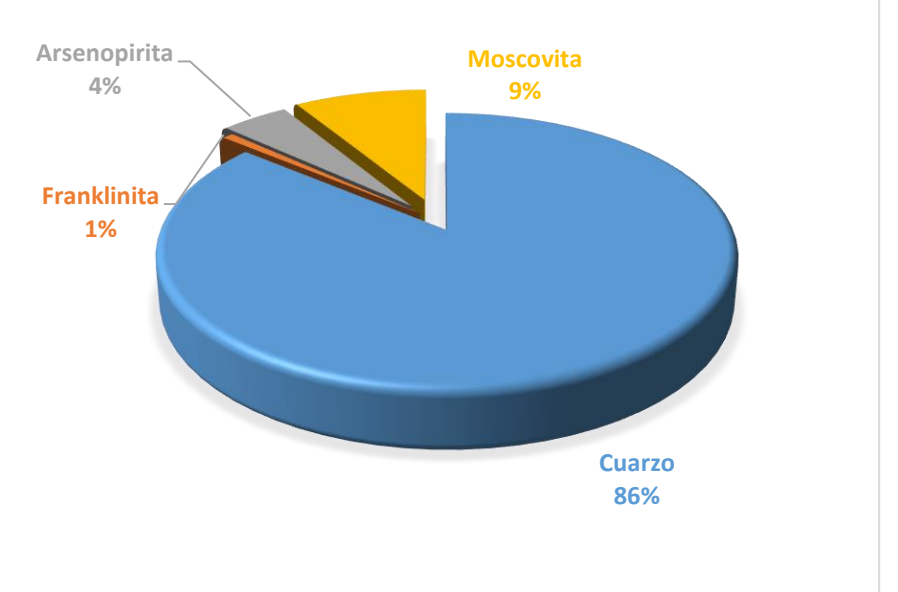
Los resultados obtenidos son porcentajes de determinado mineral en la muestra. Con los resultados de los análisis, se puede formar una idea acerca de la composición de los materiales con los que se están trabajando y se pueden explicar muchos de los comportamientos que presentan en determinadas situaciones. Los reportes detallados se pueden encontrar en el Anexo A y B.

La composición de mineralógica de cada uno de los relaves se muestra en la Tabla 3 continuación.

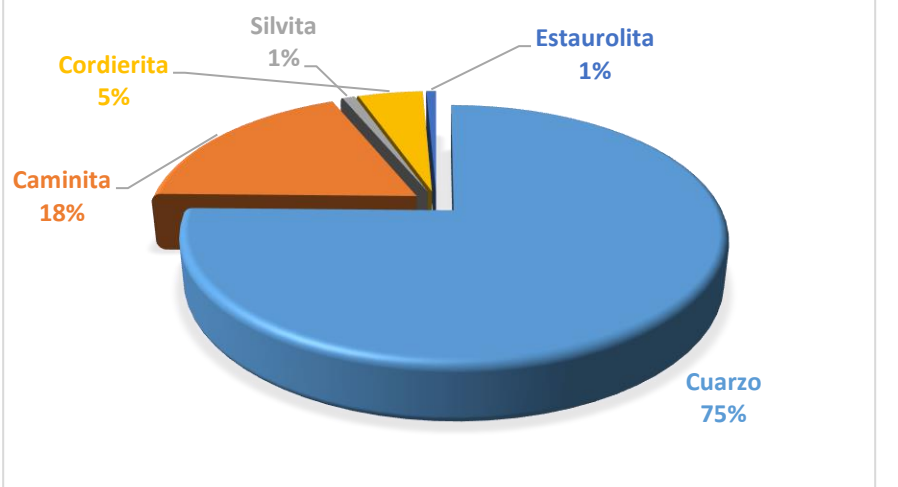
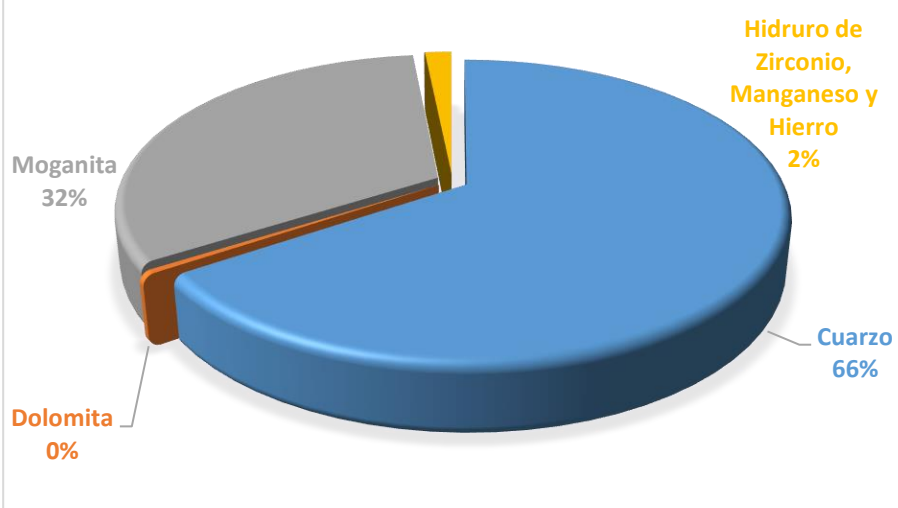
Tabla 3. Composición mineralógica de los relaves

Relave	Composición Mineralógica										
San Roque - Concentrados	 <table border="1"><caption>Composición Mineralógica de San Roque - Concentrados</caption><thead><tr><th>Mineral</th><th>Porcentaje</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cuarzo</td><td>86%</td></tr><tr><td>Cerusita</td><td>7%</td></tr><tr><td>Pirita</td><td>4%</td></tr><tr><td>Calcita</td><td>3%</td></tr></tbody></table>	Mineral	Porcentaje	Cuarzo	86%	Cerusita	7%	Pirita	4%	Calcita	3%
Mineral	Porcentaje										
Cuarzo	86%										
Cerusita	7%										
Pirita	4%										
Calcita	3%										



<p>San Roque – Finos</p>	 <table border="1"><thead><tr><th>Mineral</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cuarzo</td><td>63%</td></tr><tr><td>Biotita</td><td>34%</td></tr><tr><td>Arsenopirita</td><td>1%</td></tr><tr><td>Cerusita</td><td>1%</td></tr><tr><td>Pirita</td><td>1%</td></tr></tbody></table>	Mineral	Percentage	Cuarzo	63%	Biotita	34%	Arsenopirita	1%	Cerusita	1%	Pirita	1%
Mineral	Percentage												
Cuarzo	63%												
Biotita	34%												
Arsenopirita	1%												
Cerusita	1%												
Pirita	1%												
<p>Soto Mayor</p>	 <table border="1"><thead><tr><th>Mineral</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cuarzo</td><td>86%</td></tr><tr><td>Moscovita</td><td>9%</td></tr><tr><td>Arsenopirita</td><td>4%</td></tr><tr><td>Franklinita</td><td>1%</td></tr></tbody></table>	Mineral	Percentage	Cuarzo	86%	Moscovita	9%	Arsenopirita	4%	Franklinita	1%		
Mineral	Percentage												
Cuarzo	86%												
Moscovita	9%												
Arsenopirita	4%												
Franklinita	1%												



<p>Rio Quito</p>	 <table border="1"><thead><tr><th>Mineral</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cuarzo</td><td>75%</td></tr><tr><td>Caminita</td><td>18%</td></tr><tr><td>Cordierita</td><td>5%</td></tr><tr><td>Silvita</td><td>1%</td></tr><tr><td>Estauroлита</td><td>1%</td></tr></tbody></table>	Mineral	Percentage	Cuarzo	75%	Caminita	18%	Cordierita	5%	Silvita	1%	Estauroлита	1%
Mineral	Percentage												
Cuarzo	75%												
Caminita	18%												
Cordierita	5%												
Silvita	1%												
Estauroлита	1%												
<p>Rio Neguá</p>	 <table border="1"><thead><tr><th>Mineral</th><th>Percentage</th></tr></thead><tbody><tr><td>Cuarzo</td><td>66%</td></tr><tr><td>Moganita</td><td>32%</td></tr><tr><td>Hidruro de Zirconio, Manganeso y Hierro</td><td>2%</td></tr><tr><td>Dolomita</td><td>0%</td></tr></tbody></table>	Mineral	Percentage	Cuarzo	66%	Moganita	32%	Hidruro de Zirconio, Manganeso y Hierro	2%	Dolomita	0%		
Mineral	Percentage												
Cuarzo	66%												
Moganita	32%												
Hidruro de Zirconio, Manganeso y Hierro	2%												
Dolomita	0%												



La Tabla 4 describe cada uno de los tipos de minerales encontrados en los relaves procesados.

Tabla 4. Descripción mineralógica de relaves. (Cornelius, H, 1981) (Rosenqvist, T.1987) (Vásquez, M. H. 2005). (Vladimir Arias Arce, R. C.2005).

Mineral	Consideraciones Importantes
Cuarzo	Alta dureza (7 en la escala de Mohs) y alta abrasividad. Tipo de material con alto contenido de este mineral puede llegar a deteriorar las planchas amalgamadoras con mayor velocidad, al igual que los equipos de trituración y tanques.
Arsenopirita	Material con este tipo de mineral tiene la probabilidad de almacenar oro asociado, es altamente cianicida y fuente de arsénico.
Pirita	Material con este tipo de mineral tiene la probabilidad de almacenar oro asociado y aporta azufre en los procesos mineros.
Dolomita	Este mineral es fuente de magnesio y aporta carbono que puede llegar a reaccionar con el Mercurio
Calcita	Este mineral es fuente de calcio y aporta carbono que puede llegar a reaccionar con el Mercurio
Cerusita	Este mineral es fuente de plomo y aporta carbono que puede llegar a reaccionar con el Mercurio

2.4. Caracterización química de los relaves

La caracterización química de los relaves se realizó por dos métodos analíticos, uno corresponde a la determinación de metales pesados por Analizador Portátil de Fluorescencia de Rayos X (XRF) marca Olympus y el otro por las pruebas realizadas a las muestras por el laboratorio Canadiense Act Labs.



Se debe tener en cuenta que se tomaron un promedio de 12 lecturas con el XRF para cada una de las muestras de los relaves, los resultados obtenidos se promediaron con el mismo número de lecturas. Frente a los análisis desarrollados por Act Labs se desarrolló la Prueba al fuego para la determinación de oro y análisis de Absorción Atómica (A.A) con Vapor a frio para Mercurio. El detalle de los resultados de resultados se puede encontrar en el Anexo C y D.

En forma complementaria, para cada uno de los relaves se hizo una medición de los vapores de mercurio, aprovechando la volatilidad del mercurio por su alta presión de vapor (0.16 Pa) para metales, en donde se tomaron alrededor de 300 gramos de relaves en una bolsa sellada, se mantiene cerrada por espacio de casi 20 min y posteriormente se leen los vapores de mercurio con el equipo HERMES, el cual es usado para la determinación de vapores de mercurio a nivel ocupacional, sin embargo, esta prueba da un indicio de la presencia de mercurio en esa muestra.

La Tabla 5 muestra los resultados de concentraciones de mercurio y oro de los relaves procesados por los diferentes métodos.

Tabla 5. Concentraciones de Au y Hg en los relaves procesados.

Relave	XFR Hg (ppm)	AA Hg (ppm)	P. Fuego Au (g/ Ton)	HERMES Hg (ug/m³)
San Roque - Concentrados	58,3	100	53,8	8,6
San Roque – Finos	78,0	92,8	5,6	2,3
Soto Mayor	39,5	59,4	15,6	4,0
Rio Quito	0,0	0,8	0,29	7,0
Rio Neguá	0,0	0,7	1,93	0,5

Aunque no existe una correlación en los resultados obtenidos por cada uno de los métodos aplicados, si se puede evidenciar una tendencia en la presencia de los metales de acuerdo con el tipo de relave procesado. Es así como en los relaves de San Roque y Soto mayor se encuentran las concentraciones más altas de estos dos metales, de igual forma los relaves con menor valor reporte corresponde a los relaves de Rio Quito y Rio Neguá en el Choco. Aunque es muy temprano para dar una conclusión de esta caracterización si existe una relación directa por el tipo de minería artesanal, mientras San Roque y Soto Mayor corresponden a minería de veta (relaves provenientes de



entables), los otros dos relaves corresponden a minería de aluvial, consideración importante en la toma de decisiones al final de las pruebas realizadas.

Un aspecto importante, es la precisión ofrecida por el laboratorio de acuerdo con el método de análisis usado, el laboratorio Actlabs utiliza el método de Absorción Atómica (A.A) con Vapor a frio y se vale de muestras compuestas, lo cual es posible que ofrezca un resultado más confiable que el método de lectura promedio por punto del XRF.

3. Placas de cobre

3.1. Preparación de las placas de cobre

Uno de los procesos críticos en las pruebas piloto es la preparación de las placas de cobre, las cuales son las encargadas de retener el mercurio que pasa a través de ellas, para cual se requiere que dichas placas estén recubiertas con plata (Ag) con el fin que dicho metal pueda capturar el mercurio elemental presente en los relaves.

La literatura disponible sobre el proceso de fabricación de las placas para extracción de mercurio en minería artesanal es muy limitada, por lo que los ensayos realizados se basan en procesos de electro plateado generales, la experiencia inicial de proyectos similares y conocimiento de los miembros del equipo.

Se realizaron un total de 15 ensayos diferentes para la preparación de las placas de cobre en donde se consideró el ajuste de las principales variables que intervienen en el proceso como lo son la concentración de Nitrato de Plata, concentración de Cianuro de sodio, Voltaje, corriente y tiempo de residencia de electrolisis, entre otras. De todos los ensayos se seleccionaron los 2 más efectivos y que mostraron mejores resultados en prueba previas en el laboratorio. Los ensayos en forma detallada se pueden ver en el Anexo E.

Finalmente se seleccionaron dos sets de placas de cobre, unas plateadas con potencial de corriente eléctrica (Figura 3) y otras sin potencial de corriente eléctrica, sin embargo, el protocolo de preparación de los dos sets fue el mismo y que corresponde a:

- Placa de Cobre 20 x 20 cm
- Limpieza con un ácido nítrico al 30%.
- Lijado con esmeril industrial para generar superficie irregular.

- Preparación de solución de Nitrato de Plata en exceso en agua destilada a partir de Cianuro de Sodio y precipitación de Cloruro de Plata en agua destilada para placas plateadas sin potencial de corriente eléctrica.

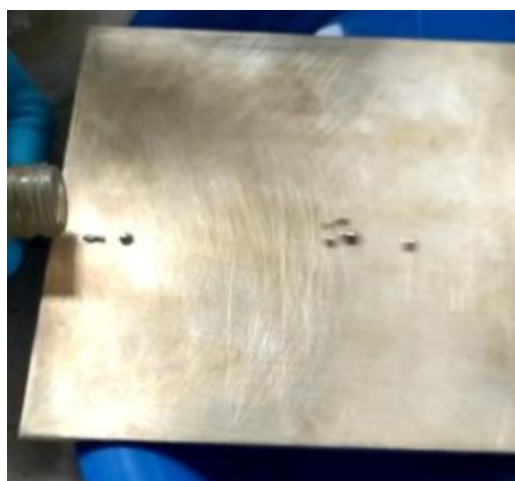


Figura 3. Plateado de placas de cobre con potencial de corriente eléctrica.

Dentro de los ensayos realizados en la preparación de las placas de cobre, se pudo evidenciar su efectividad con una prueba de retención de mercurio elemental en el laboratorio y donde las gotas de mercurio se pegan perfectamente a la placa procesada (Figura 4).



(a)



(b)

Figura 4. (a) Placa plateada y con superficie irregular. (b) Retención de gotas de mercurio en placa procesada.



La presencia de corriente eléctrica para el procesamiento de las placas es una variable importante, debido a que esta diferencia de potencial genera una afinidad (Generación de una celda electrolítica) entre la plata y el cobre que permite que la Ag quede adherida a la superficie del cobre y que permitirá de tal manera generar la afinidad de plata y mercurio bajo un escenario electroquímico del procesamiento en las placas de cobre (Gómez-Biedma, S., Soria, E., & Vivó, M., 2002). La fuente de corriente eléctrica utilizada corresponde a una batería de moto, la cual tiene un voltaje de 12 Voltios y una corriente superior a 11 Amperios. No se tiene exactitud en la corriente ya que el amperímetro utilizado solo podía medir hasta 11 amperios y se superaba esta corriente durante el proceso.

3.2. Ensayo de relaves en placas de cobre

Los ensayos realizados con los relaves en las placas de cobre se pueden ver en detalle en el Anexo E, los cuales se llevaron a cabo acorde al siguiente protocolo para cada uno de los relaves:

- Posicionamiento de 4 placas de cobre en forma de cascada, con una pendiente aproximada de 20°.
- Preparación solución de 45 galones al 10% en peso de sólidos de relave. (Pulpa de Relave)
- Paso de la solución de relaves (Pulpa) a través de las placas de cobre a razón de 1.5 l/min.
- Recirculación de la solución de relaves (Pulpa) por dos veces, en total tres pasos por la cascada de placas.
- Decantación de los relaves por un tiempo promedio de 5 horas.
- Extracción y filtración de los relaves y secado por un tiempo promedio de 6 horas en desecador.
- Toma de muestras para lectura de XRF, AA y determinación de vapores de mercurio.

Para cada uno de los ensayos se utilizó un set de placas preparadas de la misma forma, es decir un set con potencial de corriente eléctrico y otro set sin potencial de corriente eléctrico lo cual permite comparar la efectividad por cada tipo de placa.

Por la cantidad de relave disponible fue posible realizar la prueba de comparación con los dos tipos de placas (con potencial y sin potencial de corriente eléctrica) únicamente para el relave de Soto Mayor, los demás solo se trabajó con placas potenciadas. La Figura 5 muestra el montaje realizado y algunas ilustraciones del proceso realizado.

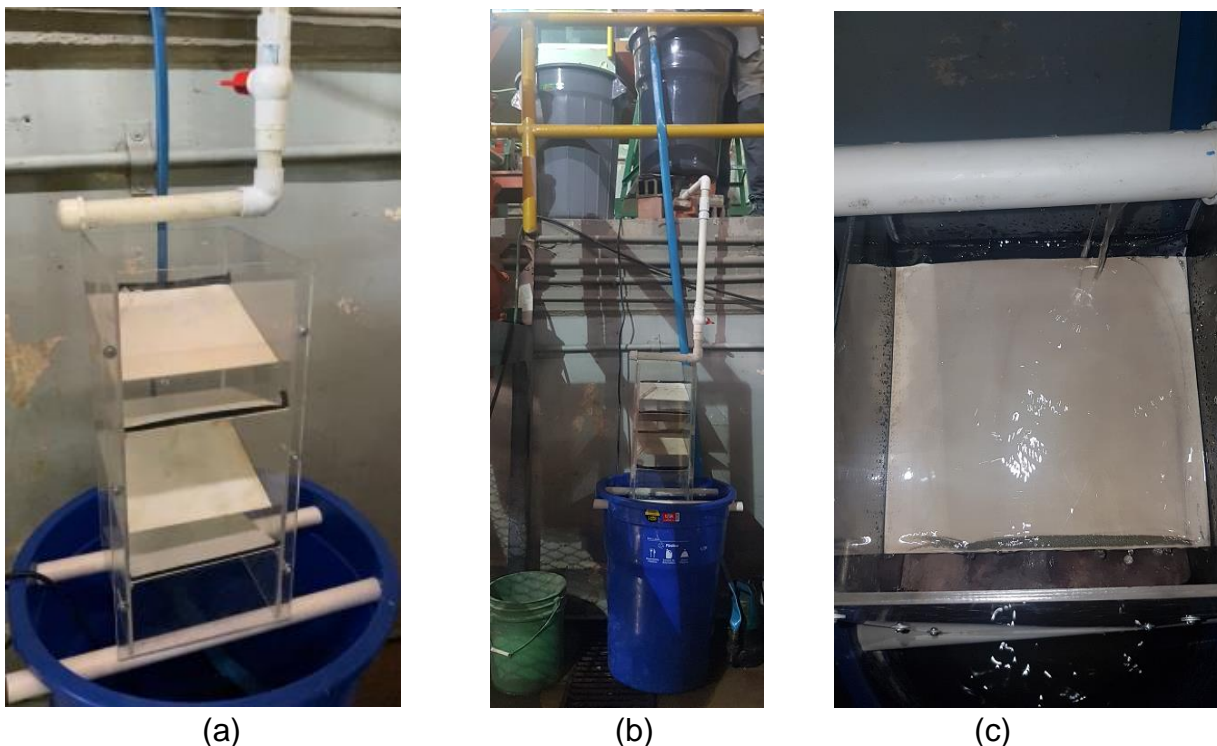


Figura 5. (a) Posicionamiento de placas de cobre en cascada. (b) Montaje de operación de Pruebas. (c) Paso de la solución de relaves a través de las placas.

3.3. Determinación de Hg y Au posterior al procesamiento de relaves.

Después de hacer el procesamiento de cada uno de los relaves seleccionados con el procedimiento anteriormente descrito, se realizó la misma metodología para determinar la presencia de mercurio y oro que a las muestras iniciales antes de ser procesadas. Esta involucra las mediciones de mercurio y otros metales pesados con el XRF, determinación mercurio elemental por Absorción Atómica, vapores de mercurio y la prueba al fuego para oro.



Como análisis adicional a los anteriormente descritos, se realizó la prueba de Caracterización de Toxicidad por Lixiviación (TCLP) a cada uno de los relaves con el fin de determinar si puede ser o no considerado como residuo peligroso en caso de clasificarse dentro de esta categoría.

Los resultados obtenidos y su correspondiente discusión son presentados en la sección de análisis de resultados de este documento.

3.4. Hallazgos del proceso

Durante el desarrollo de las pruebas se pudieron encontrar los siguientes hallazgos, los cuales deben ser tenidos en cuenta en procesos futuros y a escalas mayores. Entre los más importantes están:

- En ciertas ocasiones se presentaron taponamientos de las flautas de dispersión de la solución de relaves, lo cual fue controlado con una disolución del 10 % en peso del relave. Esta concentración puede ser mucho más grande en las pruebas de campo, ya que no es un parámetro de restricción en la captura del mercurio por las placas.
- Existe más retención de material sólido en las placas cuando están tienen superficie irregular, lo cual se recomienda que se haga un pulido de surcos sobre la superficie de la placa antes de platearla.
- La retención mecánica de material se presenta en la primera placa, al borde de caída del material a la siguiente placa, de lo cual se puede inferir que por tal motivo las primeras placas deberían retener mayor mercurio a las otras placas.
- Al terminar cada uno de los ensayos, se realizó una lectura del XRF sobre la placa de cobre con el fin de evidenciar si existía presencia de mercurio sobre la superficie. Efectivamente, se pudo evidenciar grandes concentraciones sobre puntos específicos sobre la placa y de color gris brillante (Figura 6).

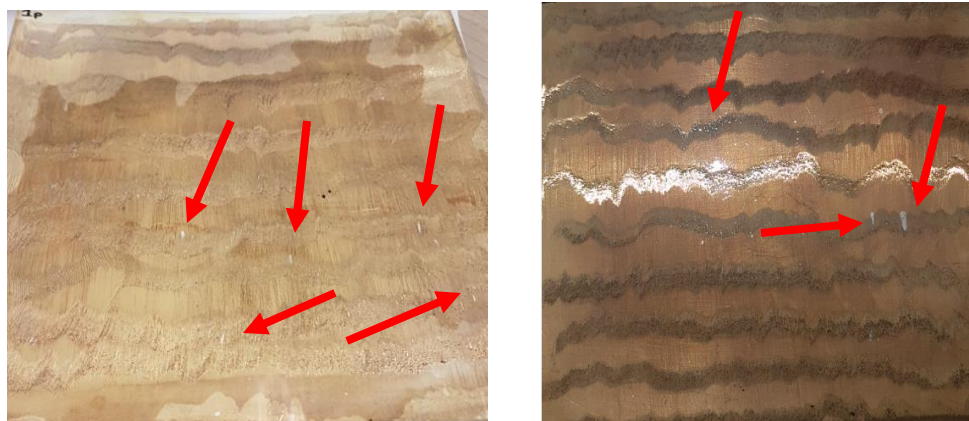


Figura 6. Puntos de mercurio identificados sobre las placas de cobre.

- Posterior al procesamiento de los relaves se evidencio un cambio de color de la placa. Esto puede ser por oxidación de otro elemento o compuesto dentro de los relaves, por lo cual es importante tener en cuenta este parámetro en el momento de aplicar las pruebas en campo, ya que esto determina si se debe realizar un proceso de limpieza de la placa (posiblemente con ácido acético) o repetir el proceso de plateado de las placas durante las pruebas.
- No fue posible hacer retiro del mercurio capturado por las placas, debido a que por las concentraciones tan bajas se amalgamo a la plata y no como mercurio extraíble.

4. Análisis de resultados

A continuación, se presenta un análisis por cada uno de los parámetros medidos durante el procesamiento de los relaves.

4.1. Lecturas Fluorescencia Rayos X (XRF)

Los datos obtenidos por el XRF antes y después del procesamiento son presentados en la Tabla 6.



Tabla 6. Resultados mediciones de Hg por XRF - Olympus

Relave	Tipo de Placa	Hg (ppm) - XRF		
		Antes	Después	% Reducción
San Roque - Concentrado	Potencial	58,1	39,3	32,6
San Roque -Finos	Potencial	78,0	27,3	65,1
Soto Mayor	Potencial	39,5	8,3	78,9
Soto Mayor	Sin Potencial	39,5	34,6	12,4
Rio Quito	Potencial	0,0	0,0	-
Rio Neguá	Potencial	0,0	0,0	-

La Figura 7 muestra que el mayor porcentaje de retención de mercurio se reporta para los relaves de Soto Mayor con 78,9 % y donde se procesó con placas con potencial eléctrico. Es posible que el potencial eléctrico haya favorecido la afinidad entre el sistema cobre (Cu) - plata (Ag) de la placa y el mercurio (Hg) de los relaves, generando una eficiencia alta en la recuperación de mercurio de los relaves de Soto Mayor.

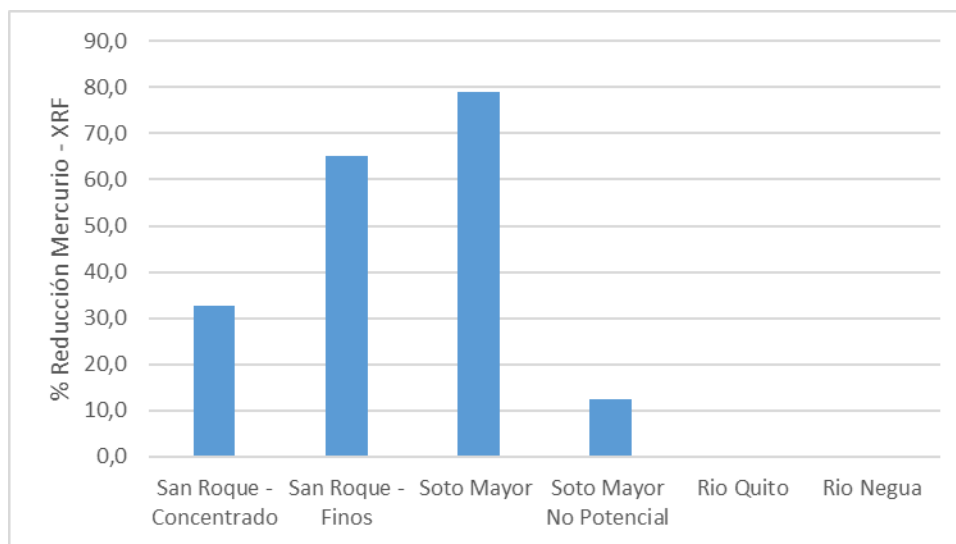


Figura 7. Porcentaje de Reducción de Hg determinado por XRF.



4.2. Datos por Absorción Atómica (AA).

Los datos obtenidos por Absorción Atómica por laboratorio Act Labs antes y después del procesamiento son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados mediciones de Hg por Absorción Atómica.

Relave	Tipo de Placa	Hg (ppm) - A.A.		
		Antes	Después	% Reducción
San Roque - Concentrado	Potencial	>100,0	86,6	13,4
San Roque -Finos	Potencial	92,8	70,0	24,6
Soto Mayor	Potencial	59,4	56,2	5,4
Soto Mayor	Sin Potencial	59,4	62,6	-5,4
Rio Quito	Potencial	0,87	1,2	-37,9
Rio Neguá	Potencial	0,78	1,4	-79,5

La Figura 8 muestra que el mayor porcentaje de retención de mercurio se reporta para los relaves de San Roque – Finos, según análisis realizado por Absorción Atómica. Sin embargo, para algunos relaves, como los de Rio Quito y Rio Neguá se puede evidenciar que no hay reducción de mercurio en el procesamiento, esto posiblemente se da por interferencia en el método de análisis de las muestras o por la recirculación los relaves con presencia de bajas concentraciones de mercurio iniciales.

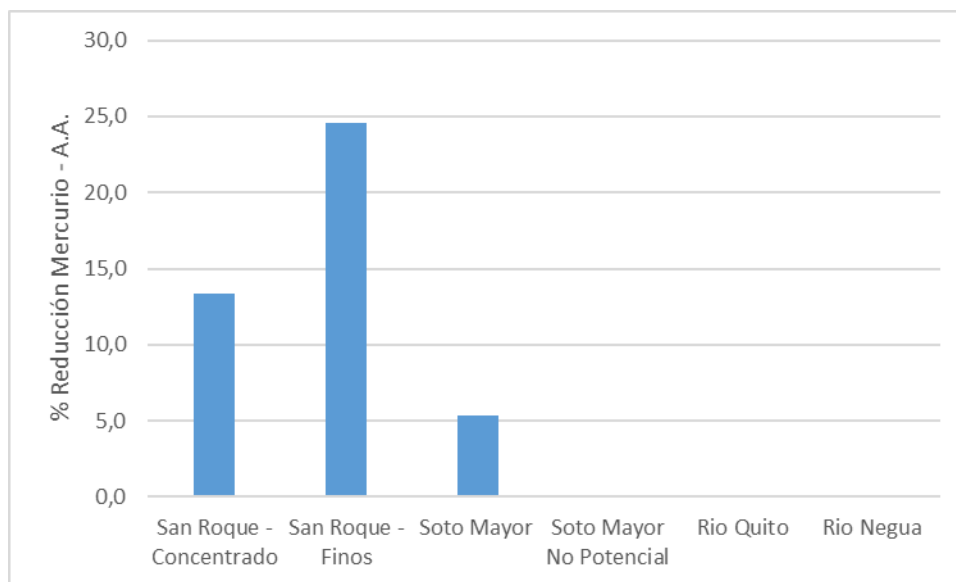


Figura 8. Porcentaje de Reducción de Hg determinado por Absorción Atómica.

4.3. Vapores de mercurio

Los datos obtenidos por el HERMES de vapores de mercurio antes y después del procesamiento son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8. Comparación de vapores de mercurio en relaves.

Relave	Tipo de Placa	Hg Vapores (ug/m3) – HERMES		
		Antes	Después	% Reducción
San Roque - Concentrado	Potencial	8,6	1,9	77,9
San Roque -Finos	Potencial	2,3	1,5	34,8
Soto Mayor	Potencial	4,0	1,0	75,0
Soto Mayor	Sin Potencial	4,0	2,7	32,5
Rio Quito	Potencial	7,0	3,3	52,9
Rio Neguá	Potencial	0,5	0,0	100,0

La Figura 9 muestra que el mayor porcentaje de retención de mercurio se reporta para los relaves de Rio Neguá con el 100% de retención. Sin embargo, cabe anotar que el valor inicial es muy bajo (0.5 ug/m^3) y que realmente donde se evidencia una reducción



representativa corresponde a los relaves de San Roque – concentrados y Soto Mayor con 77.9 % y 75 % de reducción respectivamente y juntos relaves procesados con placas con potencial.

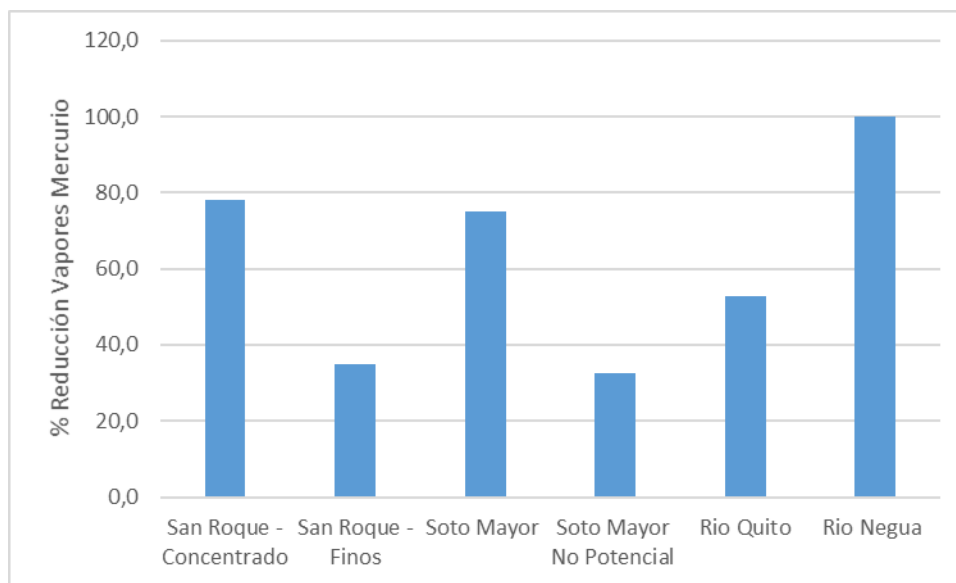


Figura 9. Porcentaje de Reducción de vapores de Hg

Estos porcentajes de reducción de vapores de mercurio (Hg) pueden estar influenciados también por la volatilidad característica del Hg, por ende, puede evidenciarse la reducción pero la proporción real puede disminuir un poco de la reportada en los análisis.

4.4. Contenido de Oro

Para cada uno de los relaves se determinó la cantidad de oro presente tanto en forma previa como posterior al procesamiento por las placas de cobre. La Tabla 9 presenta estos resultados.



Tabla 9. Presencia de oro en relaves durante su procesamiento.

Relave	Tipo de Placa	Au (g/ton) - P. Fuego	
		Antes	Después
San Roque - Concentrado	Potencial	53,8	42,7
San Roque –Finos	Potencial	5,6	14,6
Soto Mayor	Potencial	15,6	16,9
Soto Mayor	Sin Potencial	15,6	19,1
Rio Quito	Potencial	0,29	0,57
Rio Neguá	Potencial	1,93	0,74

La Figura 10 muestra la presencia de oro en cada uno de los relaves antes y después de su procesamiento. Se puede evidenciar que no existe una variación significativa y que los reducciones e incrementos reportados se deben a características mismas del relave.

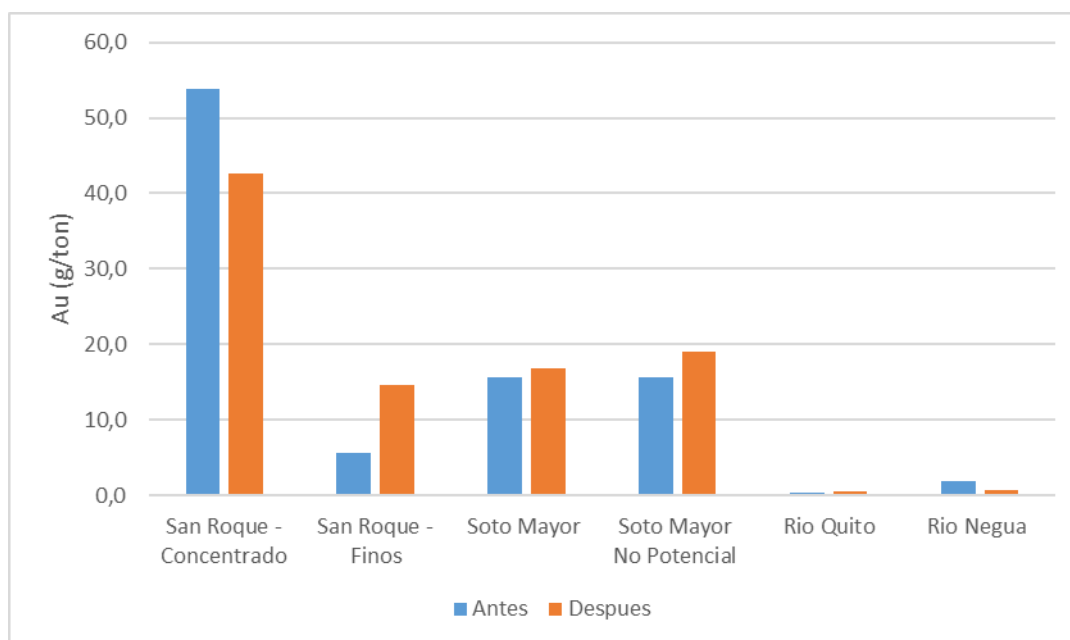


Figura 10. Presencia de oro antes y después del procesamiento de relaves.



4.5. Presencia de Cianuro

La Tabla 10 muestra los resultados de laboratorio del cianuro total (CN) en cada uno de los relaves de los sitios caracterizados.

Tabla 10 Presencia de CN Total en los relaves procesados.

<i>Relave</i>	<i>Tipo de Placa</i>	<i>CN Total (ppm)</i>
San Roque - Concentrado	Potencial	33,5
San Roque -Finos	Potencial	144,0
Soto Mayor	Potencial	10,0
Soto Mayor	Sin Potencial	10,0
Rio Quito	Potencial	0,843
Rio Neguá	Potencial	0,399

En la Figura 11 se observa que en todos los relaves que fueron utilizados en las pruebas se encuentra la presencia de cianuro en mayor concentración para lo relaves provenientes de minería de veta, esto evidencia que los relaves ya fueron procesados para la obtención de oro con el uso cianuro. Los relaves con mayor cantidad de Cianuro corresponden a los de San Roque, específicamente los relaves finos con 144 ppm, mientras que el Río Neguá presenta la menor concentración con 0,399 ppm.

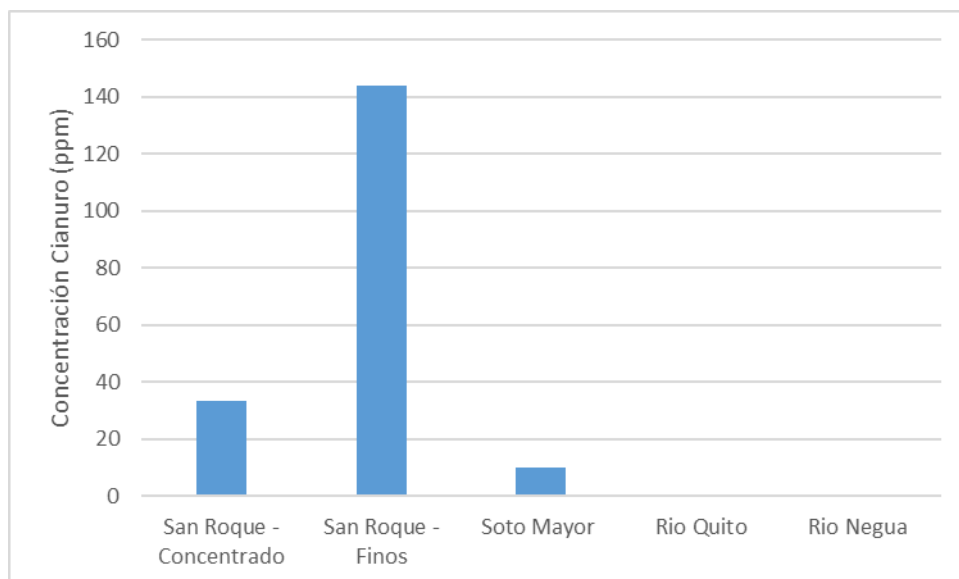


Figura 11 Presencia de Cianuro total (Cn) en los relaves procesados

4.6. Prueba de toxicidad por lixiviación (TCLP)

Uno de los aspectos más importantes a revisar en este proyecto es la clasificación de los relaves bajo la mirada de la regulación Nacional, en especial, la pregunta ¿Son los relaves provenientes de la minería aurífera artesanal residuos peligrosos? Para poder responder es necesario remitirse al decreto 4741 de 2005¹, el cual, establece los límites máximos permitidos de contaminantes para la clasificación o no de un desecho como residuo peligroso.

Una de las pruebas más relevantes para clasificar un material como peligroso corresponde la prueba de Lixiviación con Características de Peligrosidad (TCLP). Estas pruebas fueron realizadas a los relaves resultantes del proceso a las placas de cobre. La

Tabla 11 muestra los resultados obtenidos por el laboratorio

¹ Incluido en el Decreto único Reglamentario del sector Ambiente No. 1076 de 2015



Tabla 11. Comparación de resultados de TCLP con la regulación Colombiana.

Elemento	Ag	As	B	Ba	Cd	Cr	Pb	Se	U	Hg
Unidades	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	ng/L
Límite de detección	0,1	0,1	0,1	0,1	0,01	0,1	0,1	0,1	1	6
Límite legal D. 1076 - 2015	5	5	-	100	1	5	5	1	-	200
San Roque Concentrados	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,3	0,09	< 0.1	0,3	< 0.1	< 1	< 6
San Roque Finos	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0,4	0,18	< 0.1	0,3	< 0.1	< 1	10
Soto Mayor	< 0.1	7,9	< 0.1	< 0.1	0,03	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 1	21
Soto Mayor Sin Potencial	< 0.1	0,6	< 0.1	< 0.1	0,03	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 1	9
Rio Quito	< 0.1	0,1	< 0.1	0,6	< 0.01	< 0.1	0,1	< 0.1	< 1	< 6
Rio Neguá	0,2	< 0.1	< 0.1	0,4	< 0.01	< 0.1	0,1	< 0.1	< 1	31600

Acorde a los resultados obtenidos únicamente los relaves provenientes de Rio Neguá no cumplieron con los límites permisibles establecidos en la regulación nacional vigente. Por otro lado, los demás relaves no reportaron peligrosidad por lixiviación toxica, sin embargo, es necesario complementar los criterios de la normatividad vigente, incluyendo los parámetros conocidos comúnmente bajo la sigla CRRETIB. La Tabla 12 muestra una descripción desde el punto de vista técnico y regulatorio, sin embargo, es posible que se requiera un estudio más profundo para validar su peligrosidad con más análisis de laboratorio debidamente acreditado.



Tabla 12. Análisis CRRETIB Técnico-Regulatorio

Parámetro	Requerimiento normativo*	Análisis
C-Corrosividad	pH>2 y pH<12,5	Durante las pruebas en el laboratorio se realizaron análisis de capto bajo la técnica cinta colorimétrica para determinar pH. Los resultados reportaban valores cercanos a 7 o neutros.
R - Reactividad	<p>Genera gases, vapores y humos tóxicos. Cianuros, sulfuros, peróxidos orgánicos que, por reacción, liberen gases, vapores o humos tóxicos</p> <p>Reacción explosiva o detonante</p> <p>reacción endotérmica o exotérmica al ponerse en contacto con aire, agua u otro elemento o sustancia</p> <p>Provocar o favorecer la combustión.</p>	<p>Los relaves son en general residuos o material en proceso que la experiencia indica que son muy estables en condiciones normales de temperatura, presión y exposición a la intemperie.</p> <p>No es probable que se presenten reacciones exotérmicas o endotérmicas debido a que dentro de sus componentes no hay presencia de materiales con estas capacidades.</p> <p>El análisis mineralógico descarta sustancias con clasificadas como oxidantes fuertes o comburentes.</p>
R - Radioactividad	Elementos o isótopos, con una actividad radiactiva por unidad de masa superior a 70 K Bq/Kg (setenta kilos becquerelios por kilogramo)	Este tipo de peligrosidad es típica de sectores como energía nuclear, imágenes diagnósticas como Rayos X en el sector salud y lugares con cercanías o antecedentes de operaciones o fabricación de armamento nuclear (Petrangeli, 2006). Los sitios contaminados con mercurio no presentan ninguna de estas características.
E-Explosividad	Forma mezclas potencialmente explosivas con el agua;	



	<p>Produce fácilmente una reacción o descomposición detonante o explosiva a temperatura de 25 °C y presión de 1.0 atmósfera</p> <p>Ser una sustancia fabricada con el fin de producir una explosión o efecto pirotécnico.</p>	
I - Inflamabilidad	<ul style="list-style-type: none">• Ser un gas inflamable• Ser un líquido inflamable• Sólido con la capacidad bajo condiciones de temperatura de 25°C y presión de 1.0 atmósfera, de producir fuego por fricción, absorción de humedad o alteraciones químicas espontáneas y quema vigorosa y persistentemente dificultando la extinción del fuego• Ser un oxidante que puede liberar oxígeno y, como resultado, estimular la combustión y aumentar la intensidad del fuego en otro material.	Los relaves no cumplen con estas características de peligrosidad pues son sólidos con alta presencia de humedad y no tienen entre sus constituyentes materiales considerados inflamables.
B – Riesgo biológico o infeccioso	Agentes patógenos; los agentes patógenos son microorganismos (tales como bacterias, parásitos, virus, rickettsias y hongos) y otros agentes tales como priones, con suficiente virulencia y concentración como para causar enfermedades en los seres humanos o en los animales.	Este tipo de residuos son propios de lugares en los que se realicen procedimientos de salud o lugares donde se haya dispuesto cadáveres por causa de enfermedades pandémicas. Los sitios donde están ubicados los relaves no presentan ninguna de estas características.

*Decreto 4741 de 2005 anexo III.



5. Conclusiones

Después de desarrollar las pruebas piloto a escala de laboratorio de la tecnología denominada placas de cobre, se puede concluir:

- La composición mineralógica del relave no es un factor fundamental para aplicar la técnica de retención de mercurio de placas de cobre. Sin embargo, si es un parámetro importante para identificar en qué tipo de mineral se puede encontrar el oro presente y a la vez poder revisar los procesos de extracción de oro que se estén utilizando en el área de donde pertenece el relave.
- La caracterización mineralógica permite respaldar y validar que efectivamente las minas de donde se originan estos relaves son de tipo metálico, es decir características de altos contenidos de oro (Au).
- El haber utilizado diferentes métodos y técnicas de análisis en la determinación de la concentración de mercurio en los relaves permite confirmar la confiabilidad de los datos que se están analizando.
- En la mayoría de los ensayos realizados sobre las placas de cobre se reporta una reducción de mercurio en los relaves procesados, sin embargo, cuando los relaves reportan unas cantidades muy pequeñas de concentración de mercurio, están reportan un incremento debido a posibles interferencias en las mediciones con Absorción Atómica y con las lecturas del XRF.
- Las placas de cobre preparadas con potencial eléctrico reportan una mayor reducción de mercurio en los relaves que aquellas que fueron preparadas sin potencial eléctrico, debido a que facilitan la afinidad electroquímica entre los metales presentes (Cu, Ag) y los procesados (Hg, Au).
- Es posible incrementar la retención de mercurio sobre las placas de cobre teniendo en cuenta observaciones como: (i) las placas deben tener una superficie bastante áspera que ayuda la captura del mercurio, (ii) el flujo de la solución de relaves no requiere ser de flujo laminar, entre más turbulencia se genere, más posibilidad de captura de mercurio sobre la placa.
- Es de vital importancia realizar una revisión detallada de cada uno de los hallazgos encontrados durante las pruebas piloto de laboratorio con el fin de minimizar los riesgos que se puedan presentar en el momento de escalar la pruebas a laboratorio.
- La volatilidad característica del mercurio puede generar una pequeña varianza en los resultados de reducción de vapores de mercurio en las pruebas



realizadas, que aunque si reporten un porcentaje de reducción el valor puede ser un poco menor del reportado en el presente informe

- Los relaves sin tratamiento evaluados en las pruebas contienen niveles que exceden los límites permitidos por la regulación colombiana para el mercurio, esto sugiere que deberían ser tratados como residuos peligrosos.
- No existe interferencia de las placas de cobre con la cantidad de oro presente en los relaves, ya que no se evidencia una variación significativa de la concentración de oro en los relaves durante el proceso de las placas de cobre.
- Los resultados de las pruebas TCLP realizadas a los relaves ya procesados por las placas de cobre, evidencian que para cinco de las seis muestras tomadas, no se excede los niveles de toxicidad estipulados por la normativa colombiana. Sin embargo, es necesario desarrollar un análisis complementario más detallado que involucre los demás parámetros considerados bajo la normatividad de residuos peligrosos para confirmar si deben o no clasificarse como residuos peligrosos.
- Se debe revisar más en detalle el proceso de retiro del mercurio capturado por las placas de cobre, debido a que durante los ensayos realizados, la captura de mercurio se presentó a concentraciones muy bajas las cuales hicieron amalgama sobre el recubrimiento de plata y no mercurio metálico como se esperaba en un inicio. Se espera que con las concentraciones en campo se pueda optimizar este parte del proceso.

6. Referencias

Cornelius, H. (1981). Manual de mineralogía de Dana. Editorial Reverté.

Gómez-Biedma, S., Soria, E., & Vivó, M. (2002). Análisis electroquímico. Revista de Diagnóstico Biológico, 51(1), 18-27. Recuperado en 05 de febrero de 2020, de http://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-79732002000100005&lng=es&tlng=es.

Jiménez, J. (2019). En Antioquia está el 14 % de la actividad minera de Colombia. [online] www.elcolombiano.com. Available at:



<https://www.elcolombiano.com/antioquia/antioquia-esta-el-14-de-la-actividad-minera-de-colombia-AO11688888> [Accessed 5 Feb. 2020].

Rosenqvist, T. (1987). *Fundamentos de Metalurgia Extractiva*. México DF: Limusa.

Townley, B. (2017). *Yacimientos Minerales y Procesos Geológicos*. [Online] Medellín.unal.edu.co. Available at: <https://www.medellin.unal.edu.co/~rrodriguez/Townley/Yacimientos-procesos-geologicos.htm> [Accessed 3 Feb. 2020].

Vásquez, M. H. (2005). *Manual de Mineralogía*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia sede Medellín.

Vladimir Arias Arce, R. C. (2005). *Refractory of gold concentrate*. Instituto de Investigación FIGMMG, 10.



ANEXOS

- Anexo A – Reportes Laboratorio Cocoltec
- Anexo B - Reporte Mineralógico de Relaves
- Anexo C – Detalle Lecturas XRF
- Anexo D – Reporte Laboratorio Act Labs
- Anexo E - Bitácora de Ensayos Placas de Cobre y Procesos