



**Proyecto “Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos (MinSus)”**

# **Reaprovechamiento de relaves abandonados**

*Experiencias y resultados de la cooperación técnica con la empresa minera SMRL Acumulación Los Rosales en Puno, Perú*

**Informe técnico** Lima, febrero 2024



## Reaprovechamiento de relaves abandonados

### Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales

**Impressum:****Tema: Reaprovechamiento de relaves abandonados**

Experiencias y resultados de la cooperación técnica con la empresa minera SMRL Acumulación Los Rosales en Puno, Perú

**Autor:**

M. Sc. Jacob Mai

**Revisión:**

Mag.rer.nat. Achim Constantin

Dr. Malte Drobe

**Proyecto:**

Cooperación Alemana con la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL):  
"Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos" (MinSus)

**Ejecutado por:**

Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR)

**En colaboración con :**

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)

**Encargado por:**

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)

**Website:**

[www.minus.net](http://www.minus.net)

[www.bgr.bund.de/EN/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarb/Projekte/Laufend/Lateinamerika/3026\\_2020-2218-4\\_Andenlaender\\_Bergbau\\_III\\_en.html](http://www.bgr.bund.de/EN/Themen/Zusammenarbeit/TechnZusammenarb/Projekte/Laufend/Lateinamerika/3026_2020-2218-4_Andenlaender_Bergbau_III_en.html)

**Contacto:**

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe

Stilleweg 2

30655 Hannover

BMZ No.: 2020.2218.4

BGR No.: 05-2424

Estado: febrero 2024

Foto de la carátula: © BGR

Otros imágenes: © BGR

## Cooperación Regional para la gestión sustentable de los recursos mineros en los países andinos (MinSus)

Informe técnico Lima, febrero 2024

# Reaprovechamiento de relaves abandonados

*Experiencias y resultados de la cooperación técnica con la empresa minera SMRL Acumulación Los Rosales en Puno, Perú*

*Desde enero de 2021, el BGR colabora con la empresa SMRL Acumulación Los Rosales (SMRL ALR) en Perú para transferir tecnología e innovación en la gestión de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y la reutilización de relaves. En Vilque, Puno, SMRL ALR reprocesa relaves de una antigua producción minera de cobre, declarados como PAM, buscando extraer oro y cerrar la mina de acuerdo con la legislación vigente, y de esa manera, reducir la contaminación ambiental. Este proyecto ejemplifica la reutilización económica de residuos mineros abandonados para mejorar el desarrollo local y representa un caso destacado de minería secundaria en la región andina, promoviendo la sostenibilidad y la economía circular.*

*La colaboración entre BGR y SMRL ALR incluyó asistencia técnica para mejorar la eficiencia en el reprocesamiento de relaves y evaluar el riesgo de drenaje ácido de minas. En este contexto, cabe destacar la participación del Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de Dresde, Alemania, en la gestión del agua. Los ensayos metalúrgicos desarrollados revelaron que los métodos de concentración gravimétrica y centrifugación no superan los resultados de la lixiviación actual. Se comprobó que se puede conseguir una recuperación de alrededor del 70% del oro, incluso sin molienda de los relaves, y con un tiempo de lixiviación corto. Con una molienda inicial y un tiempo de lixiviación largo, en el laboratorio sólo se consigue una recuperación máxima de oro del 85 %, lo que se debe al enriquecimiento de oro de 15 % en la red cristalina de la pirita. Se identificó el riesgo de que el material formara drenaje ácido de mina y se subrayó la importancia de la prevención para el medio ambiente. Además, se determinó que los relaves no contienen tierras raras e otros minerales valiosos aparte del oro, plata y cobre. Por otro lado, la*

## **Reaprovechamiento de relaves abandonados**

### **Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales**

*evaluación de riesgos con el Water Risk Filter, elaborado por el WWF y adaptado por BGR para operaciones mineras, mostró un bajo a medio riesgo hídrico en el emplazamiento de Los Rosales.*

## Agradecimientos

La empresa SMRL Acumulación Los Rosales desempeñó un papel decisivo en el inicio y la realización con éxito del proyecto, con su búsqueda de estándares medioambientales mejoradas y un procesamiento más eficaz.

Agradecemos la excelente cooperación, la comunicación abierta y la hospitalidad durante las visitas. Nos gustaría dar las gracias a todo el personal, en particular al director José Carneiro Arévalo, Darwin Delgado Mita, Wiliam Medrano y Oliver Huaman Soto.

El proyecto de investigación se llevó a cabo en estrecha colaboración con el Departamento de Geología de Recursos Minerales (B.1.2) de la BGR, en particular con Malte Drobe y la becaria Luisa Daxeder. La buena cooperación científica y la ejecución constructiva de los experimentos apoyaron fuertemente el proyecto.

También agradecemos la estrecha cooperación y el intercambio con el Dresdner Grundwasser-forschungszentrum, especialmente con Gonzalo Lagas Vera, Tania Roth y Dr. Ronald Giese.

También queremos dar nuestro agradecimiento al Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú por la realización precisa y fiable de los análisis químicos de las muestras de suelo.

El autor desea además dar las gracias a todos los que han contribuido al éxito de este estudio.

# Contenido

<b>1</b>	<b>Antecedentes</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>Trabajos realizados</b>	<b>7</b>
<b>3</b>	<b>Mejora del enriquecimiento del oro</b>	<b>8</b>
3.1	Propiedades del material base	8
3.1.1	Análisis químico	8
3.1.2	Microscopía Electrónica	8
3.1.3	Análisis granulométrico	9
3.2	Ensayos Gravimétricos	10
3.3	Ensayos de Flotación	11
<b>4</b>	<b>Ensayos de Lixiviación con Cianuro</b>	<b>13</b>
4.1	Parámetros Actuales de Lixiviación en Los Rosales	13
4.2	Preparación de la Muestra	13
4.2.1	Muestra Tostada	13
4.3	Correlación con grados de molienda	14
4.4	Correlación con tiempo de lixiviación	14
4.5	Ablación láser	16
4.6	Observaciones y recomendaciones	16
<b>5</b>	<b>Potencial de drenaje ácido</b>	<b>17</b>
<b>6</b>	<b>Contenido de Tierras Raras</b>	<b>17</b>
<b>7</b>	<b>Filtro de Riesgo Agua</b>	<b>18</b>
<b>8</b>	<b>Resumen y Conclusiones</b>	<b>21</b>
<b>9</b>	<b>Anexos</b>	<b>22</b>

## Lista de figuras

Fig. 1: Puntos de muestreo (imagenes superior) y bolsas de muestras para los análisis realizados en el BGR (izquierda) y de GEOS (derecha) .....	7
Fig. 2: Imagen de electrones retrodispersados (BSE), con enriquecimientos de oro, mostrados en blanco, aglomerado a los granos de pirita (Fuente: BGR, 2022). .....	9
Fig. 3: Distribución granulométrica en función del molino y del tiempo de molienda .....	10
Fig. 4: Mesa vibratoria para separación gravimétrica con relaves y concentrado (Fuente: BGR, 2022) ...	11
Fig. 5: Célula de flotación durante los experimentos de flotación para el enriquecimiento del oro (Fuente: BGR, 2022).....	11
Fig. 6: Esquema de flotación.....	12
Fig. 7: Recocido de la muestra MLR_M3; a) antes del recocido; b) después del recocido a 800°C, c/d) comparación del color de la muestra inicial M3_L (c) y la muestra recocida M3_R (d) antes de la lixiviación (después de la lixiviación) (Fuente: GEOS, 2021) .....	14
Fig. 8: Concentraciones de Au en función del tiempo y del grado de molienda.....	15
Fig. 9: Concentraciones de Au dependientes del tiempo y recuperación del Au en la solución de lixiviación.....	15
Fig. 10: Escaneado láser del concentrado de pirita (Fuente: BGR, 2021) .....	16
Fig. 11: Factores de riesgo físicos, normativos y de reputación específico del lugar (Fuente: WWF, 2022) .....	19
Fig. 12: Parámetros de la operación (Fuente: BGR, 2022) .....	19
Fig. 13: Resumen de las normas industriales de referencia para el cuestionario compuesto por 23 preguntas.....	20
Fig. 14: Resultados del cuestionario sobre riesgos operativos y de cuenca utilizando el ejemplo de Los Rosales.....	20
Fig. 15: resultados detallados de las pruebas granulométricas y su composición química.....	24

## **Lista de tablas**

Tab. 1: Minerales de valor medio de los antiguos relaves .....	8
Tab. 2: Distribución granulométrica en función del molino y del tiempo de molienda.....	9
Tab. 3: Recuperación de Oro en ensayos de flotación.....	12
Tab. 4: Resultados de la lixiviación según el grado de molienda (Fuente: BGR, 2022).....	14
Tab. 5: Ensayo de tierra raras - multielemental 23 elementos .....	18
Tab. 6: Análisis químico de la muestra de relaves en función de los minerales valiosos: .....	22
Tab. 7: Especificaciones de los reactivos.....	25
Tab. 8: Resultados del análisis de flotación .....	27



## Abreviaturas

Abreviaturas	Significado
ABA	Acid-Base Accounting
AU	Oro
BGR	Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe
CN	Cianuro
DGFZ	Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de Dresde, Alemania
ICMM	International Council on Mining and Metals
KM	Molino de bolas
mm	Milímetro
NAG	Net Acid Generation
PAM	Pasivos Ambientales Mineros
PN	Potencial de Neutralización
SSM	Molino de discos vibratorios
SMRL ALR	SMRL Acumulación Los Rosales

# 1 Antecedentes

Desde enero de 2021, el BGR está colaborando con la SMRL Acumulación Los Rosales (SMRL ALR), perteneciente al régimen de pequeña minería en el Perú, con el objetivo de lograr una transferencia exitosa de tecnología e innovación en la gestión de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) y la reutilización de relaves<sup>1</sup>.

En el sitio ubicado en Vilque, departamento de Puno, Perú, la empresa SMRL ALR reprocesa relaves desde el año 2019, de una antigua producción minera de cobre, clasificados como Pasivos Ambientales Mineros (PAM), es decir, de [...] *depósitos de residuos producidos por operaciones mineras, abandonadas o inactivas a la fecha de vigencia de la Ley, y que constituyen un riesgo permanente y potencial para la salud de la población, el ecosistema circundante y la propiedad* (Art. 2º de la Ley N° 28271 de 07/2004) . Con la concesión para el reaprovechamiento de los relaves abandonados otorgada por el gobierno regional de Puno, SMRL ALR también asumió la responsabilidad de realizar el cierre adecuado y rehabilitación de los pasivos ambientales, derivados de la antigua explotación de cobre.

Mediante el reprocesamiento de los antiguos relaves, la empresa extrae el mineral valioso (oro) restante en los residuos mineros, y a la vez, realiza el cierre adecuado de la mina de acuerdo con la legislación nacional vigente, lo que, en consecuencia, reduce la contaminación ambiental de las aguas superficiales y subterráneas, del suelo, y el aire.

El caso de Los Rosales es un buen ejemplo de cómo la reutilización económica de los residuos mineros abandonados puede reducir su impacto al ambiente, eliminando un legado minero y mejorando el desarrollo socioeconómico local. Por otro lado, el trabajo de la empresa incluye diversas medidas para involucrar a las comunidades locales, con el objetivo de establecer una buena relación social con su entorno.

Cabe destacar que SMRL ALR es uno de muy pocos proyectos de minería secundaria en la región andina, lo que lo convierte en un interesante ejemplo hacia una minería más sostenible, aplicando el concepto de la economía circular.

Las principales áreas de trabajo incluyeron la asistencia técnica para identificar mejoras de eficiencia en el reprocesamiento de los relaves y el análisis del potencial de drenaje ácido de minas para evaluar los riesgos y el cambio a largo plazo en la estabilidad química.

Además, el Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de Dresde, Alemania (DGFZ) prestó apoyo en la aplicación de la gestión y el control del agua mediante la instalación de puntos de medición de aguas subterráneas. Sin embargo, el presente informe no incluye los trabajos y resultados obtenidos por el DGFZ.

---

<sup>1</sup> Residuos de grano fino procedentes del tratamiento de minerales, generalmente en forma de lodos.

## 2 Trabajos realizados

El sitio de Los Rosales se encuentra en Vilque, en la provincia de Puno, en el sur de Perú a una altura de aproximadamente 4.000 m.s.n.m., tiene un clima de montaña con una temperatura media anual de 15 °C y unos 700 mm de precipitaciones al año, repartidas entre lluvias abundantes en verano y precipitaciones más escasas en invierno.

Desde enero de 2021, el BGR y el Centro de Investigación de Aguas Subterráneas de Dresde (DGFZ) cooperan con SMRL ALR., con el objetivo de lograr una transferencia exitosa de tecnología e innovación en la gestión de Pasivos Ambientales Mineros y la reutilización de residuos mineros.

Las principales áreas de trabajo incluyeron la asistencia técnica para identificar mejoras de eficiencia en el procesamiento de los relaves, la gestión y monitoreo del agua a través de la instalación de piezómetros por parte del DGFZ y el análisis del potencial de drenaje ácido de mina para evaluar riesgos y cambios a largo plazo en la estabilidad química.

El 20 de febrero de 2021, se tomaron muestras para una primera serie de pruebas en varios puntos del antiguo depósito de relaves y en el punto de recogida del material antes de que se introdujera en el molino. Se enviaron las muestras a Alemania donde el Departamento de Geología de Recursos Minerales (B1.2) de el BGR, realizó primeras pruebas gravimétricas y de flotación. En noviembre de 2021, se tomó otras muestras para enviarlas a la empresa de ingeniería GEOS de Alemania para un estudio de optimización de lixiviación (véase la Fig. 1).



*Fig. 1: Puntos de muestreo (imágenes superior) y bolsas de muestras para los análisis realizados en el BGR (izquierda) y de GEOS (derecha)*

Los resultados de estas pruebas se presentan en los capítulos siguientes.

## 3 Mejora del enriquecimiento del oro

Aparte del contenido residual de minerales valiosos, la eficacia con que éstos pueden extraerse es un factor decisivo para la viabilidad económica de los proyectos de reprocesamiento de relaves mineros.

En este contexto, los especialistas de BGR en Alemania realizaron una serie de investigaciones como microscopía electrónica, ensayos gravimétricos, de flotación y ensayos de lixiviación con cianuro a fin de determinar potenciales de mejora para la recuperación del oro. Es importante resaltar que hasta ahora, este tipo de estudios en los relaves abandonados de la región andina son escasos.

### 3.1 Propiedades del material base

Para llevar a cabo procedimientos analíticos dirigidos a mejorar el aprovechamiento del oro, es importante comprender primero las propiedades estructurales del material de partida. Para ello, se llevó a cabo un análisis químico, microscópico y de la distribución granulométrica.

#### 3.1.1 Análisis químicos

Los análisis del material original han demostrado que aún hay unos 2-3 g/t de oro en promedio 16 g/t de plata y bajos concentraciones de cobre, zinc y hierro en los residuos. Los valores que aparecen en la Tab. 1 representan los valores medios.

Tab. 1: Minerales de valor medio de los antiguos relaves

Au [ppm]	Ag [ppm]	Cu [%]	Zn [%]	Fe [%]
3,00	16,00	0,17	0,07	14,96

En el Capítulo 3.3 encontrará más resultados de análisis sobre el contenido de oro tras los procesos de tratamiento.

También se analizaron las muestras en busca de elementos de tierras raras, cuyos resultados se presentan por separado en el Capítulo 5 Contenido de Tierras Raras.

#### 3.1.2 Microscopía electrónica

El análisis microscópico también revela que approx. 75% del oro se encuentra como fase libre (ver imagen microscópica Fig. 2), generalmente aglomerada a minerales de pirita, mientras que 25% del oro se encuentra en la red cristalina de los granos de pirita. El tamaño de las inclusiones de oro oscila entre 5 y 20  $\mu\text{m}$ .

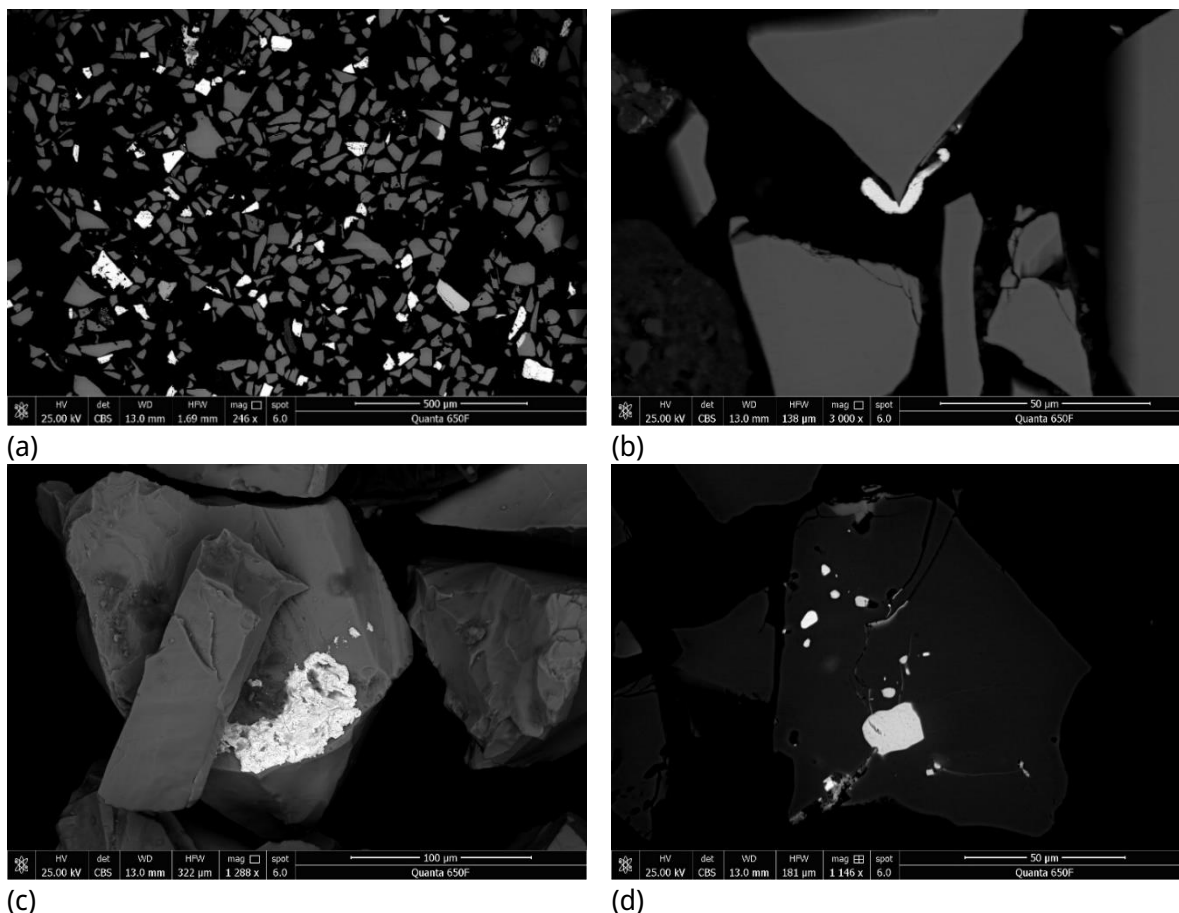


Fig. 2: Imagen de electrones retrodispersados (BSE), con enriquecimientos de oro, mostrados en blanco, aglomerado a los granos de pirita (Fuente: BGR, 2022).

### 3.1.3 Análisis granulométricos

Para profundizar en la investigación sobre cómo el grado de molienda afecta la recuperación del oro, se sometió el material a procesos de molienda utilizando un molino de bolas (KM) y un molino de discos vibratorios (SSM). El material de base (M3) se sometió a molienda durante intervalos de 5, 10 y 20 minutos con el molino de bolas y durante 10 y 20 segundos con el molino de discos vibratorios. Los resultados de este estudio se detallan en la Tab. 2.

Tab. 2: Distribución granulométrica en función del molino y del tiempo de molienda

Nº de artículo	< 2	2 - 6.3	6.3 - 20	20 - 63	63 - 125	125 - 200	200 - 630	630 - 2000
M3 org	6,2	5,8	9,7	26,6	32,0	14,7	4,5	0,1
M3_SSM10	7,4	7,5	12,8	29,1	30,0	10,8	1,8	0,2
M3_SSM20	8,1	7,8	12,8	31,4	30,6	7,9	0,9	0,1
M3_KM05	5,5	7,4	14,0	34,0	30,4	6,9	1,0	0,0
M3_KM10	7,7	8,9	19,6	43,2	16,7	2,8	0,5	0,3
M3_KM20	7,5	10,0	24,2	50,3	6,0	1,0	0,5	0,2

Además, los resultados del análisis se representaron con sus fracciones granulométricas acumuladas en la Fig. 2.

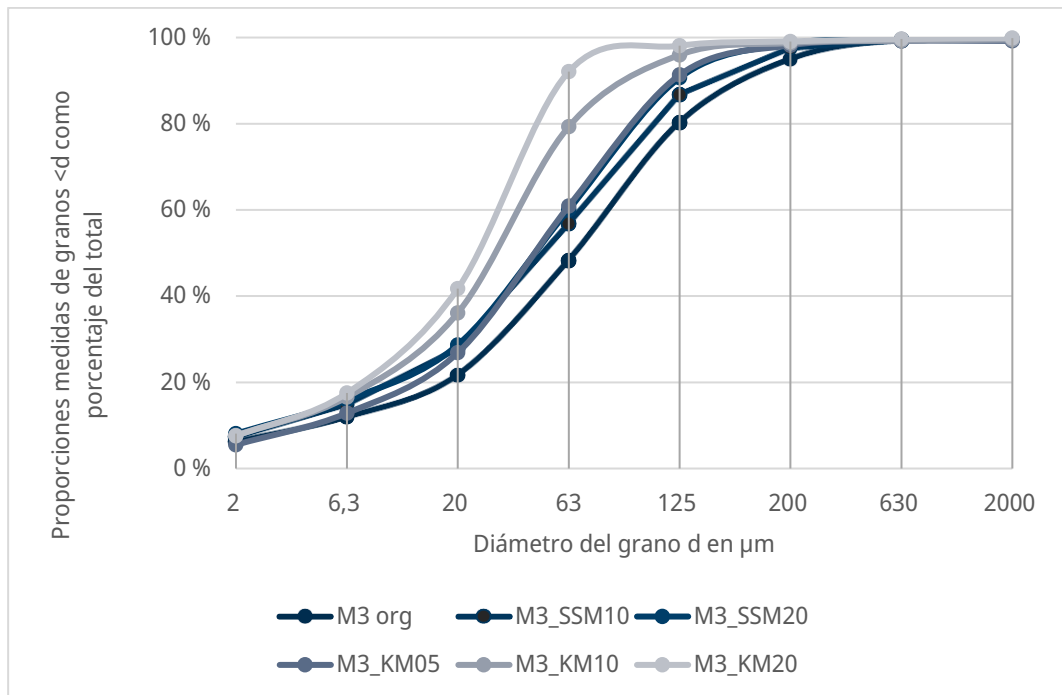


Fig. 3: Distribución granulométrica en función del molino y del tiempo de molienda

La metodología del análisis granulométrico se basó en los siguientes parámetros:

- 25 mL de dispersante de pirofosfato más 25 mL de agua en tubos Nalgene de 85 mL
- Añadir 10 g de muestra, suspensión con agitador de hélice (toda la noche)
- Tamiz cortado a 63  $\mu\text{m}$
- Fracción seca > 63  $\mu\text{m}$ , analizar con Camsizer
- Fracción < 63  $\mu\text{m}$  con sedimento

### 3.2 Ensayos gravimétricos

En una serie inicial de pruebas, se utilizaron métodos gravimétricos para la separación del oro del mineral de ganga. Como se ilustra en la Fig. 4, se implementó tanto una mesa vibratoria como una centrifugadora para este propósito. Sin embargo, los resultados de las pruebas indicaron que la separación gravimétrica no generó concentrados de alta calidad. Según los análisis microscópicos, esto posiblemente se debe a que una parte significativa del oro queda atrapada en la red de pirita. Además, el tamaño diminuto de las partículas del oro expuesto podría ser otra razón para la limitada eficacia de la separación.





**Fig. 4: Mesa vibratoria para separación gravimétrica con relaves y concentrado** (Fuente: BGR, 2022)

### 3.3 Ensayos de flotación

La flotación constituye un proceso fisicoquímico de tres fases (sólido-líquido-gaseoso) diseñado para la separación de especies minerales mediante la adhesión selectiva de partículas minerales a burbujas de aire. Este objetivo se logra mediante la incorporación de productos químicos específicos al sistema.



**Fig. 5: Célula de flotación durante los experimentos de flotación para el enriquecimiento del oro** (Fuente: BGR, 2022)

En este experimento, se genera un concentrado a través de cuatro etapas consecutivas de flotación, detalladas en la Fig. 6, con la adición de los productos químicos especificados en el Tab. 7: Especificaciones de los reactivos del Anexo.

**Reaprovechamiento de relaves abandonados**  
**Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales**

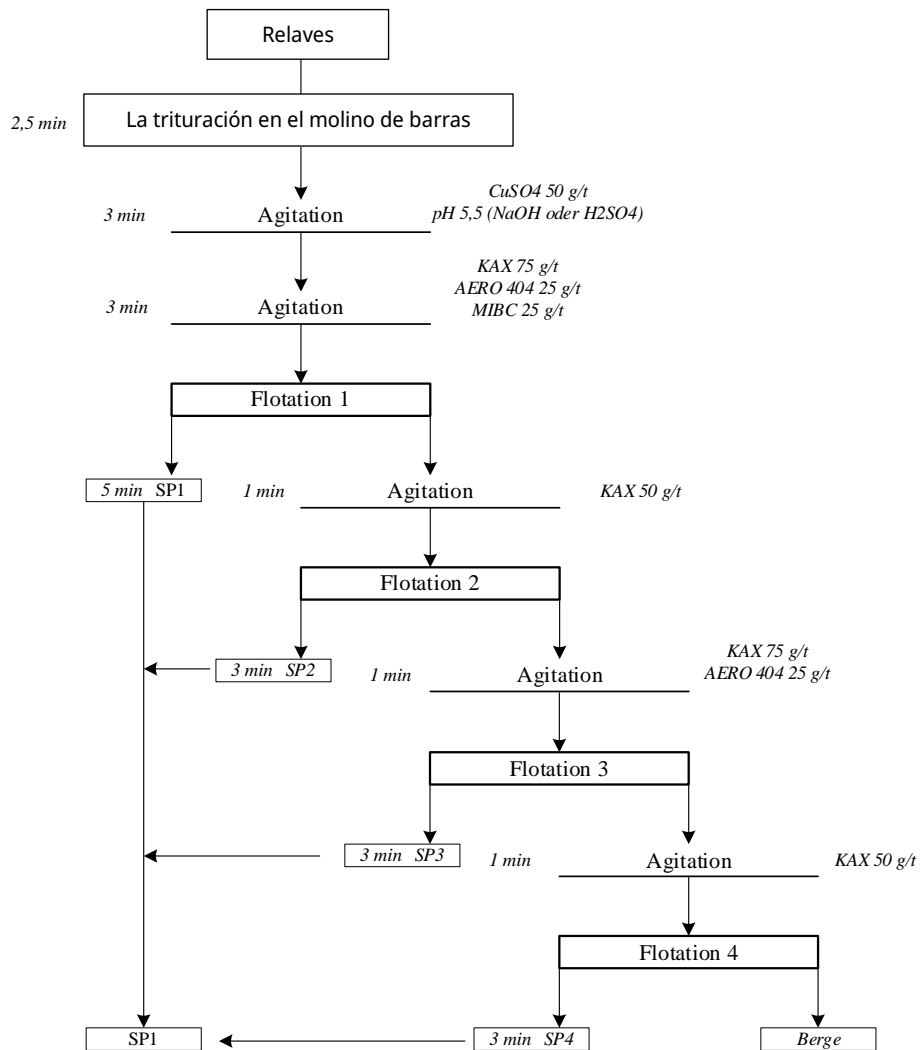


Fig. 6: Esquema de flotación

Las pruebas de flotación generaron un concentrado con una recuperación del 60-65% (consulte laver Tab. 3). Debido a razones económicas, se percibe como insuficiente según las especificaciones de SMRL Acumulación Los Rosales.

Tab. 3: Recuperación de Oro en ensayos de flotación

Muestra	Producto	Masa		Au	
		g	%	Ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 01	Concentrado	299,4	25,1	5,62	<b>62,9</b>
	Relave	893,0	74,9	1,11	<b>37,1</b>
	Alimentación	1192,40	100,00	2,24	<b>100,0</b>
MLR 08	Concentrado	285,4	23,8	1,1	<b>62,0</b>
	Relave	914,50	76,2	0,23	<b>38,0</b>
	Alimentación	1199,90	100,00	0,50	<b>100,0</b>



## 4 Ensayos de lixiviación con cianuro

La investigación sobre la lixiviación de oro de residuos que contienen pirita fue realizada por la oficina de ingeniería G.E.O.S Ingenieur GmbH de Alemania.

En un primer ensayo, se analizó la extracción con un tiempo de lixiviación de 42 horas y una molienda variable (ver sección 4.3). En una segunda prueba, se seleccionó un grado de molienda constante muy fino y se aumentó el tiempo de lixiviación hasta 66 horas (ver (4.4). Este informe completo, que se tradujo al español utilizando la plataforma en línea DeepL, se encuentra en el Anexo 9.5.

### 4.1 Parámetros actuales de lixiviación en Los Rosales

Debido a los inadecuados resultados obtenidos con los procesos de tratamiento mecánico, descritos en los capítulos anteriores, se vio necesario optimizar la eficacia del proceso de lixiviación. Éste es el proceso utilizado actualmente por SMRL ALR y produce una tasa de recuperación del 60-75%.

El proceso que actualmente se lleva a cabo en la planta de procesamiento de SMRL ALR, es con un valor de pH entre 7,5 y 10,5, utilizando aproximadamente 5,5 kg de NaOH por tonelada de material. La concentración de cianuro es constante y actualmente se utilizan 4,4 kg de cianuro por tonelada de material. El tiempo de lixiviación es de 42 horas a una temperatura de entre 18 y 20°C con una densidad de turbidez de 1,2 kg/L.

El objetivo de las pruebas era optimizar la recuperación en función de los factores variables del grado de molienda, la duración de la lixiviación y la concentración de cianuro.

### 4.2 Preparación de las muestras

#### 4.2.1 Muestra tostada

Una muestra se recoció a 800 °C (MLR M3\_R). El proceso de recocido hizo que la muestra perdiera un 16,5 % de su masa. La densidad determinada de 2,67 g/cm<sup>3</sup> resultó ser inferior a la de la muestra inicial, que era de 3,15 g/cm<sup>3</sup>. Se supone que la hematita (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) resultante no es compacta, sino que tiene una densidad menor debido a los microporos, que se aprecian en los ensayos. Al mismo tiempo, sin embargo, la lixiviación parecía más rápida.



Fig. 7: Recocido de la muestra MLR\_M3; a) antes del recocido; b) después del recocido a 800°C, c/d) comparación del color de la muestra inicial M3\_L (c) y la muestra recocida M3\_R (d) antes de la lixiviación (después de la lixiviación) (Fuente: GEOS, 2021)

### 4.3 Correlación con grados de molienda

La muestra, tomada tras el proceso de molienda actual, se volvió a moler durante 5, 10 y 20 minutos utilizando un molino de bolas (KM) y se molieron dos muestras más durante 10 y 20 segundos con un molino de discos vibratorios (SSM). Los distintos grados de molienda, que se presentan en capítulo 3.1.3 **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**, indican la influencia de la liberalización de los componentes de oro atrapados en el proceso de lixiviación.

Tab. 4: Resultados de la lixiviación según el grado de molienda (Fuente: BGR, 2022)

Muestra	Au Original	Au residual	Lixiviado
	[ppb]	[ppb]	[%]
Muestra inicial	2980	824	<b>72,3</b>
Molino de bolas 5min	2360	844	<b>64,2</b>
Molino de bolas 10min	2480	672	<b>72,9</b>
Molino de bolas 20min	2250	728	<b>67,6</b>
Molino de discos vibratorio 10sec	3200	791	<b>75,3</b>
Molino de discos vibratorio 20sec	2650	824	<b>68,9</b>
Muestra Tostada	2910	788	<b>72,9</b>

Los resultados muestran que no existe una correlación relevante ni entre el grado de molienda ni entre el recocido y los resultados de la lixiviación. Los resultados de la lixiviación varían entre el 64,2% y el 75,3%, por lo que esta variación corresponde a desviaciones metrológicas y representativas. El informe completo se encuentra en el Anexo 9.4.

### 4.4 Correlación con tiempo de lixiviación

En una primera prueba, se llevó a cabo un periodo de lixiviación de 42 horas con una única adición de 2,2 g de CN- por cada 500 g, como en el proceso actual de Los Rosales. Los resultados de la concentración de oro durante el proceso de lixiviación a diferentes grados de molienda se muestran en la Fig. 8.

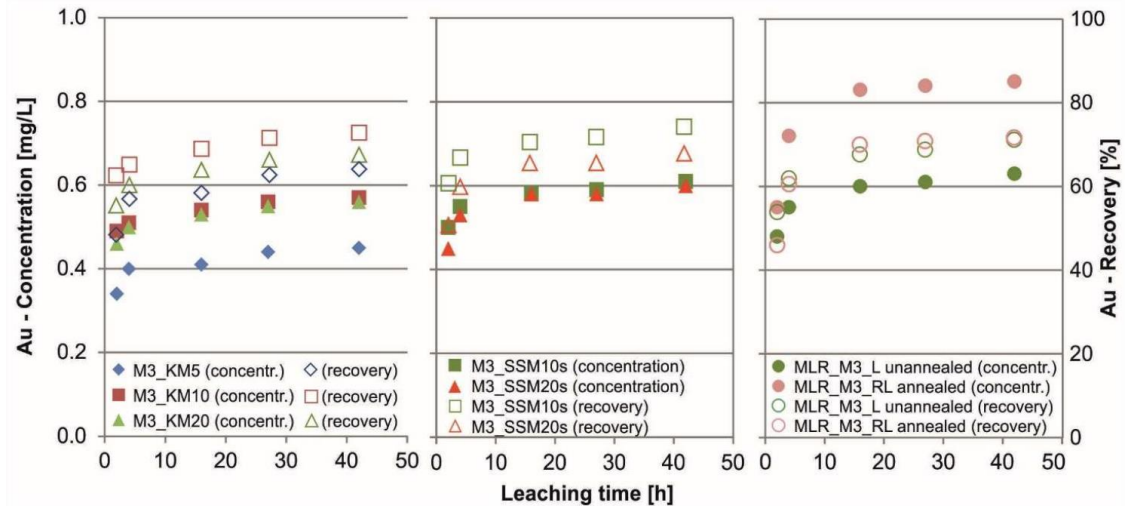


Fig. 8: Concentraciones de Au en función del tiempo y del grado de molienda.

Se verifica que aproximadamente el 50% del oro ya está disuelto tras un máximo de 4 horas. Una prolongación del proceso de lixiviación sólo conduce entonces a una ligera mejora del éxito de la lixiviación.

Para determinar si aún podía recuperarse el oro no lixiviable anteriormente, se realizó una prueba en la que los residuos se molieron a  $< 10 \mu\text{m}$ . Además, se volvió a añadir 1,0 g de CN por 500 g de material de muestra tras 42 h de lixiviación y el tiempo de lixiviación se amplió a 66 horas total. En cuanto a la metodología, se tomaron submuestras en 6 pasos después de 2, 4, 16, 27, 42 y 66 horas. Se produce una lixiviación sucesiva del Au con el aumento de la duración de la lixiviación, por lo que el 61 - 71 % del Au ya se ha disuelto en las 2 primeras horas. Después de 66 horas, se alcanzó un rendimiento máximo de Au del 80% en la muestra sin moler y de casi el 85% en la muestra molida (ver Fig. 9).

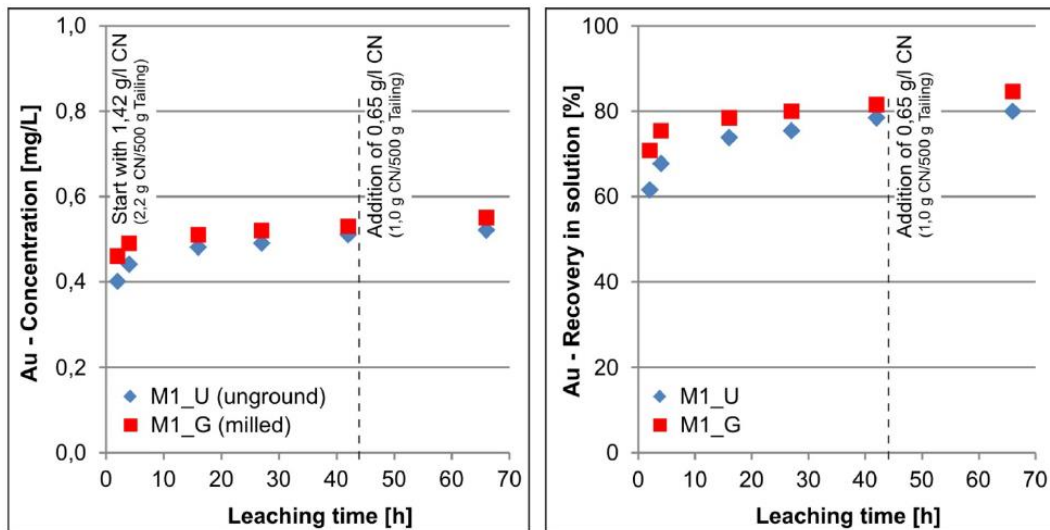


Fig. 9: Concentraciones de Au dependientes del tiempo y recuperación del Au en la solución de lixiviación

## 4.5 Ablación láser

En otra prueba, se escaneó el concentrado de pirita con un láser, como se muestra en Fig. 10.

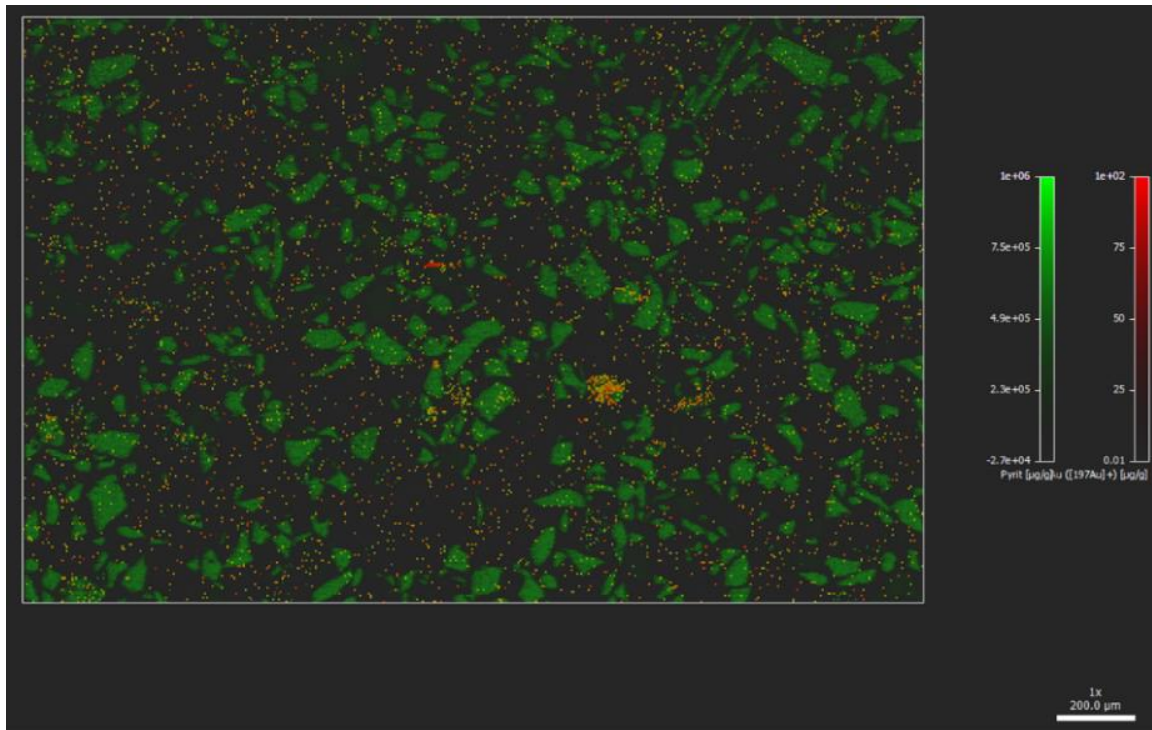


Fig. 10: Escaneado láser del concentrado de pirita (Fuente: BGR, 2021)

El contenido de oro es relativamente homogéneo en los granos de pirita (color verde). Sin embargo, hay algunos puntos con un contenido de oro muy elevado (colores amarillo y rojo). Esto significa que las piritas tienen un contenido de oro constante dentro de su red cristalina y que también hay inclusiones de oro entre los granos de pirita o en sus bordes. Esto también es comparable con las imágenes de la Fig. 2 b, c, d. El contenido de oro en los puntos donde se detectó es de 12,8 g/t, mientras que el contenido de oro en los granos de pirita es de 6 g/t. Este valor se debe a los 0,7 g/t que quedan en el residuo del proceso de lixiviación.

Este ensayo sugiere que el oro no lixiviable está presente como inclusiones en la pirita. Esto también corrobora los resultados de las pruebas de lixiviación, en las que un tiempo de lixiviación más largo no condujo a una extracción completa del oro.

## 4.6 Observaciones y recomendaciones

Se observa que aproximadamente el 50 % del oro se lixivia en las primeras 2 - 4 h, tanto para las muestras molidas como para las no molidas. En el tiempo siguiente y también con la adición extra de CN, solo se lixivia un poco más de Au en términos porcentuales, lo que incrementa el consumo de CN. El comportamiento de la lixiviación en las primeras 2 - 4 h indica fases de Au libres que son fácilmente accesibles al CN. Se supone que el resto no lixiviable del Au está ligado en la red cristalina de la pirita, encerrado en el grano de pirita y/o en otras fases minerales de difícil acceso. La prueba de calcinación dio lugar a una transformación de fase de pirita a

hematita. En general, este proceso está establecido en la industria para hacer lixiviable el Au refractario de la pirita. En este caso, esto no parece haber tenido lugar, porque el oro no está incluido en partículas muy pequeñas, pero en la red cristalina del pirita. Por lo tanto, no es necesario un pretratamiento ni el molino para obtener los mismos resultados.

El tiempo de lixiviación adicional aumenta el rendimiento de Au hasta un máximo de 85% en la muestra molida extra fina, pero también provoca un mayor consumo de CN. A escala industrial, habría que sopesar si sería más favorable una lixiviación breve e intensiva, con lo que se movilizaría una mayor cantidad de material de escombrera, o si, por el contrario, sería preferible un periodo de lixiviación más largo para movilizar la mayor cantidad posible de Au. Sin embargo, esto último conllevaría unos costes energéticos más elevados y un tiempo de lixiviación más largo con un menor rendimiento de material.

En la realidad se tiene que establecer un diagrama de flujo donde los costos e los ingresos están en una relación óptima. Dado que una molienda posterior para exponer adicionalmente las fases de Au solubles en CN apenas condujo aquí a un resultado positivo, el material de partida pudo utilizarse sin moler. Un nuevo esmerilado supondría mayores costes de inversión, energía y mano de obra, que no parecen justificados en este caso.

## 5 Potencial de drenaje ácido

El drenaje ácido de minas representa uno de los riesgos medioambientales más críticos en el ámbito de la minería, tanto activa como post-minería. En consecuencia, se ha realizado un análisis del potencial de drenaje ácido. Los resultados del análisis evaluado se presentan íntegramente en el Informe del Anexo 9.6.

En función a los resultados de análisis de laboratorio para los ensayos ABA y NAG, del estudio geoquímico se puede concluir que las muestras cumplen tres criterios con resultados de potencial generador de acidez por lo que finalmente están resultando ser generadores de acidez. Los resultados del análisis SPLP presentan a las muestras FAJA (licor NAG) y TQ-5(Licor NAG) los cuales fueron lixiviados con un pH de 2.6, exceden las concentraciones de metales con respecto a la normativa ambiental peruana.

En base a los resultados, hay que señalar que los relaves de la antigua relavera y los nuevos relaves, tienen el potencial de generar acidez. Asimismo, los lixiviados que se generarán son capaces de movilizar los metales y metaloides de As, Cd, Fe, Pb y Zn.

## 6 Contenido de Tierras Raras

A través del Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMMET), se realizó un ensayo de tierras raras en muestras sólidas mediante fusión eléctrica con metaborato de litio e ICP-MS, con el objetivo de determinar la posible presencia de tierras raras en los relaves. Para ello, las muestras fueron sometidas a un tratamiento químico que implicó la fusión con metaborato de litio y dilución ácido en agua regia invertida.

Los resultados de los análisis se presentan en la Tab. 5 y muestran que no se encontró enriquecimiento de ningún elemento del grupo de las tierras raras en la muestra.

<b>Elementos</b>	<b>Unidades</b>	<b>Concentración</b>
Be	ppm	<0.6
Ce	ppm	3.5
Cs	ppm	0.19
Dy	ppm	0.4
Er	ppm	0.2
Eu	ppm	<0.1
Ga	ppm	<0.3
Gd	ppm	0.3
Hf	ppm	1.0
Ho	ppm	<0.1
In	ppm	<0.2
Lu	ppm	<0.15
Nb	ppm	0.6
Nd	ppm	1.6
Pr	ppm	0.3
Sm	ppm	0.3
Ta	ppm	<0.5
Tb	ppm	<0.1
Th	ppm	0.6
Tm	ppm	<0.1
U	ppm	0.2
W	ppm	<1
Yb	ppm	0.3

Tab. 5: Ensayo de tierra raras - multielemental 23 elementos

## 7 Filtro de Riesgo Agua (WRF)

El filtro de riesgo del agua fue diseñado originalmente por el WWF<sup>2</sup> para evaluar el riesgo hídrico de un lugar específico. La herramienta está diseñada para proporcionar una evaluación inicial y preliminar de los riesgos hídricos de una empresa y de las actividades actuales de gestión del agua, con el fin de priorizar nuevas acciones. El filtro incluye riesgos físicos, normativos y de reputación, y consta de dos partes.

El riesgo de cuenca (ubicación), que es una herramienta en línea. La capa de riesgo físico representa, por ejemplo, las condiciones naturales y antrópicas de las cuencas fluviales. Comprende cuatro categorías de riesgo que cubren diferentes aspectos de los riesgos físicos,

---

<sup>2</sup> <https://riskfilter.org/water/home>



como escasez de agua, inundaciones, calidad del agua y estado de los servicios de los ecosistemas. Los factores del lugar, riesgos de cuenca no indican un riesgo elevado (ver Fig. 11y Fig. 12). Fig. 11)

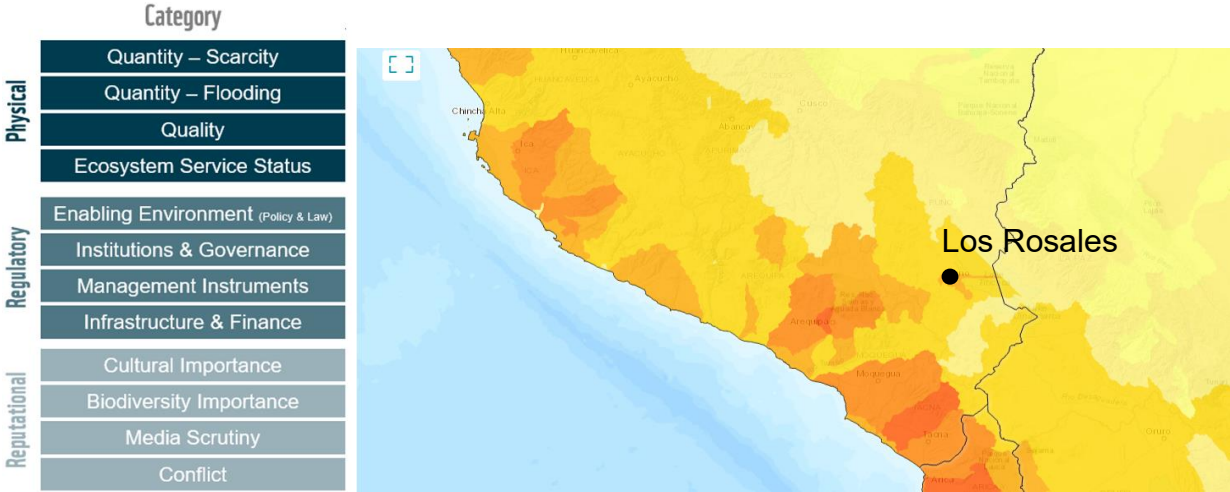


Fig. 11: Factores de riesgo físicos, normativos y de reputación específico del lugar (Fuente: WWF, 2022)

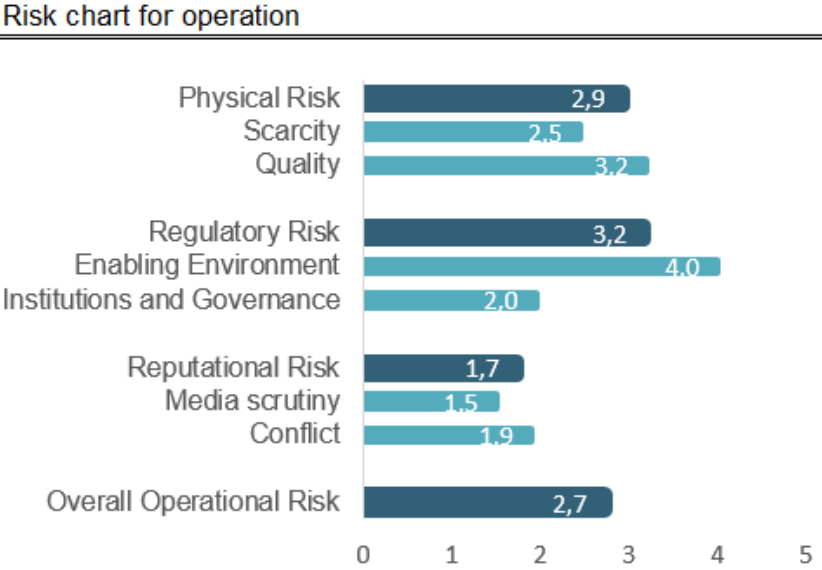


Fig. 12: Parámetros de la operación (Fuente: BGR, 2022)

La segunda parte es una herramienta de evaluación de riesgos operativos que consta de 23 preguntas para evaluar los riesgos físicos, de reputación y normativos. Esta fue adaptada específicamente por el BGR para la industria minera. La herramienta integra los factores de riesgo hídrico relevantes y los asigna a los estándares de mejores prácticas de la industria, como se ve en Fig. 13.

## Reaprovechamiento de relaves abandonados

### Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales

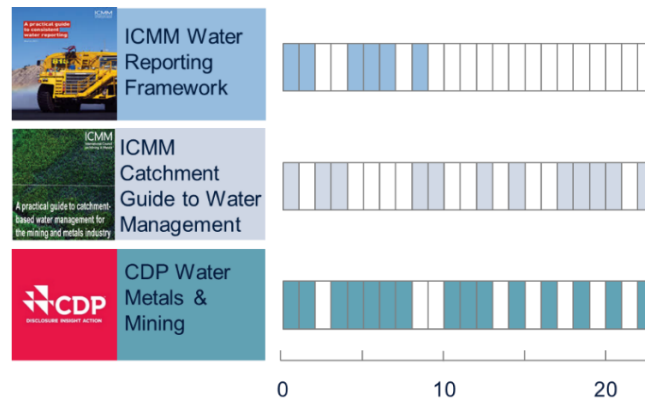


Fig. 13: Resumen de las normas industriales de referencia para el cuestionario compuesto por 23 preguntas

Esta versión permite evaluar la madurez de la gestión del agua de una empresa minera y comparar los resultados con las normas del ICMM.

Junto con el equipo de SMRL ALR, se cumplimentó el cuestionario. Eso permitió realizar una evaluación de los riesgos operativos y de la gestión interna resultante. A la vez, permitió comprobar la aplicabilidad de la herramienta en base de una operación minera real.

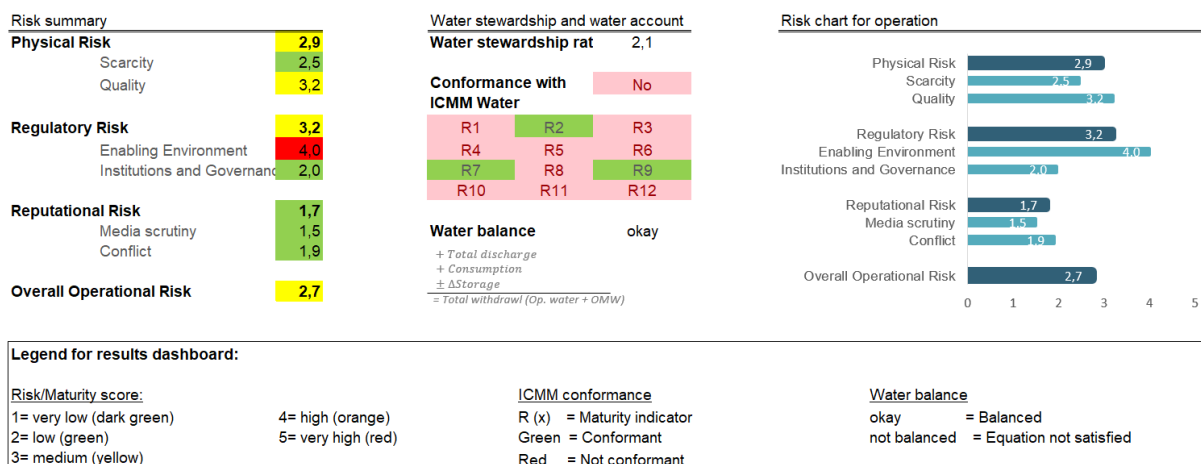


Fig. 14: Resultados del cuestionario sobre riesgos operativos y de cuenca utilizando el ejemplo de SMRL ALR

Los riesgos operativos se clasifican globalmente como medio-altos. Esto se desglosa en riesgos de reputación, que se clasifican como bajos, y riesgos físicos y normativos, que se clasifican como medio-altos, como se muestra en la Fig. 14. En el caso de los riesgos normativos, el subapartado de entorno propicio (Leyes y Políticas) se califica como factor de riesgo alto. Esto se debe al hecho de que el lugar está sometido a una regulación y/o aplicación legal mucho mayor (de las más estrictas de la cuenca) y a que las licencias actuales limitan los planes operativos futuros. Los resultados también muestran que no aplican en gran medida los criterios del ICMM, las que se muestran en detalle en la Tabla Anexo 9.6.3.

Las respuestas para evitar o mitigar el riesgo pueden derivarse de estas dos evaluaciones de riesgo.



## 8 Resumen y Conclusiones

Los análisis realizados en los relaves de SMRL Acumulación Los Rosales proporcionaron información sobre su composición química, la distribución del oro y su potencial de reprocesamiento a través de diferentes métodos de concentración.

Se pudo demostrar que tanto la concentración gravimétrica mediante mesa vibratoria, como la centrifugación o la flotación no son alternativas a la lixiviación actual debido a la menor recuperación.

Por otro lado, una amplia serie de pruebas de lixiviación demostró que la recuperación de oro no podía superar el 85%. Estos resultados fueron en gran medida independientes del grado de molienda de las muestras, lo que significa que se recomienda prescindir de la molienda a escala industrial. Además, la mayor parte de la lixiviación se completó después de 4 horas y después produjo sólo pequeños aumentos porcentuales. En cualquier caso, entre el 15 y el 35% del oro permanece en el residuo, lo que puede atribuirse a la acumulación de aproximadamente 0,7 g/t de oro en la red cristalina de la pirita, que no podría extraerse económicamente.

Además, podría demostrarse que existe un riesgo de drenaje ácido de la mina, por lo que el reprocesamiento de las relaves con cierre de minas al mismo tiempo también es muy beneficioso desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, dado que los relaves que se producen a través del proceso de reaprovechamiento, también contienen un considerable potencial de generación de drenaje ácido. Este hecho también debe tenerse en cuenta para la disposición y cierre final de los nuevos relaves generados por el reprocesamiento de los PAM.

Por otro lado, se determinó que los relaves abandonados no contienen relevantes contenidos de tierras raras o de otros minerales valiosos.

Finalmente, la evaluación de riesgos mediante el Filtro de Riesgos del Agua del WWF, adaptado por BGR para operaciones mineras, mostró que el emplazamiento de Los Rosales sólo tiene un riesgo hídrico de nivel bajo a medio.





## Reaprovechamiento de relaves abandonados

### Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales

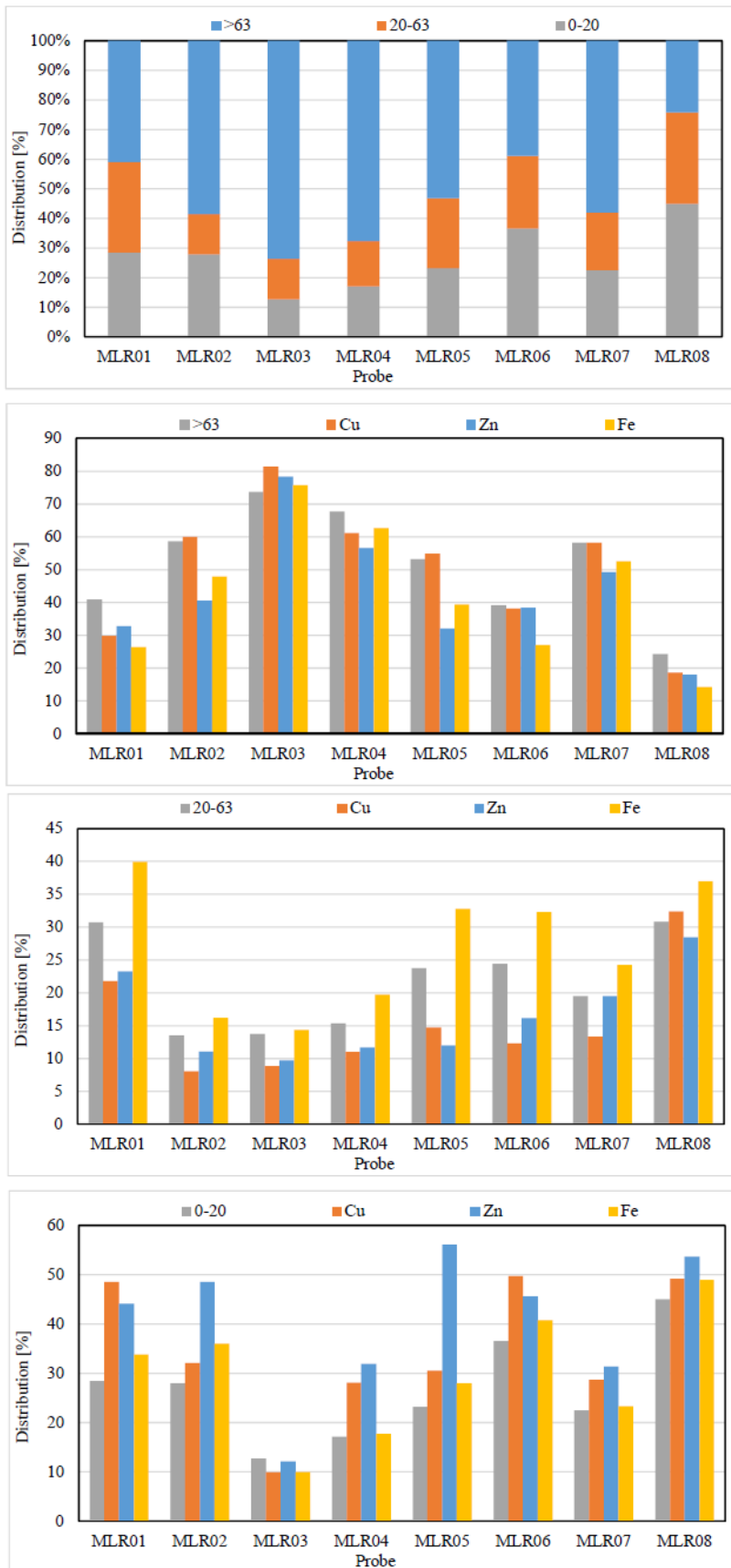


Fig. 15: resultados detallados de las pruebas granulométricas y su composición química

### 9.3 Reactivos y resultados de los ensayos de Flotación

	Nombre	Pureza	Tipo	Fabricante
KAX	Amilxantato de potasio	90%	colector sulfuros	Alkemin
AERO 404 promoter	Mercaptobenzotiazol+ditioposfato		colector sulfuros con Au	Solvay
MIBC	Metil isobutil carbinol	98 %	espumador	Merck Millipore
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido sulfúrico	96 %	pH	Carl Roth GmbH
NaOH	Hidróxido sódico	99 %	pH	Carl Roth GmbH
CuSO <sub>4</sub>	Sulfato de cobre(II) anhidro	99 %	activador de los sulfuros	Carl Roth GmbH

Tab. 7: Especificaciones de los reactivos

## Reaprovechamiento de relaves abandonados

### Experiencias y resultados de la cooperación técnica con SMRL Acumulación Los Rosales

Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 01	Konzentrat	299,4	25,1	5,62	62,9	33	48,0
	Berge	893	74,9	1,11	37,1	12	52,0
	Aufgabe	1192,4	100,0	2,24	100	17,27	100,00
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 02	Konzentrat	124,4	10,3	10,6	72,1	24	31,4
	Berge	1086,1	89,7	0,47	27,9	6	68,6
	Aufgabe	1210,5	100,0	1,5	100,0	7,8	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 03	Konzentrat	320,6	26,5	7,92	85,4	35	80,8
	Berge	887,2	73,5	0,49	14,6	3	19,2
	Aufgabe	1207,8	100,0	2,5	100,0	11,5	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 04	Konzentrat	284,9	24,0	5,89	36,9	30	35,8
	Berge	902,1	76,0	3,18	63,1	17	64,2
	Aufgabe	1187,0	100,0	3,8	100,0	20,1	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 05	Konzentrat	282,2	23,5	6,04	44,3	30	30,5
	Berge	919,7	76,5	2,33	55,7	21	69,5
	Aufgabe	1201,9	100,0	3,2	100,0	23,1	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 06	Konzentrat	284	23,6	7,2	53,4	29	34,5
	Berge	921,4	76,4	1,94	46,6	17	65,5
	Aufgabe	1205,4	100,0	3,2	100,0	19,8	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 07	Konzentrat	251,8	20,9	8,31	71,4	42	64,9
	Berge	952,5	79,1	0,88	28,6	6	35,1
	Aufgabe	1204,3	100,0	2,4	100,0	13,5	100,0
Muestra	Producto	Masa		Au		Ag Silber	
		g	%	ley [ppm]	Recuperación [%]	ley [ppm]	Recuperación [%]
MLR 08	Konzentrat	285,4	23,8	1,2	62,0	15	53,9
	Berge	914,5	76,2	0,23	38,0	4	46,1
	Aufgabe	1199,9	100,0	0,5	100,0	6,6	100,0
Muestra	Masa [%]	Au Gold		Ag Silber			
		ley [ppm]	recuperación [%]	ley [ppm]	recuperación [%]		
MLR 01	25,11	5,62	62,93	33,00	47,97		
MLR 02	10,28	10,60	72,09	24,00	31,42		
MLR 03	26,54	7,92	85,38	35,00	80,83		
MLR 04	24,00	5,89	36,91	30,00	35,79		
MLR 05	23,48	6,04	44,30	30,00	30,48		
MLR 06	23,56	7,20	53,36	29,00	34,46		
MLR 07	20,91	8,31	71,40	42,00	64,92		
MLR 08	23,79	1,20	61,95	15,00	53,92		

Muestra	Cu Kupfer		Zn Zink		Pb Blei		Fe Eisen	
	ley [%]	Recuperación [%]	ley [%]	Recuperación [%]	ley [%]	Recuperación [%]	ley [%]	Recuperación [%]
MLR 01	0,47	58,2	0,092	32,5	0,049	15,8	30,8	56,4
	0,11	41,8	0,064	67,5	0,087	84,2	8,0	43,6
	0,20	100,00	0,07	100,00	0,08	100,00	13,72	100,00
MLR 02	0,68	64,3	0,067	21,6	0,156	30,5	27,4	32,9
	0,04	35,7	0,028	78,4	0,041	69,5	6,4	67,1
	0,11	100,00	0,03	100,00	0,05	100,00	8,57	100,00
MLR 03	0,60	88,8	0,095	61,8	0,191	70,9	30,1	56,2
	0,03	11,2	0,021	38,2	0,028	29,1	8,5	43,8
	0,18	100,00	0,04	100,00	0,07	100,00	14,24	100,00
MLR 04	0,27	30,8	0,073	23,7	0,048	18,5	31,3	47,8
	0,19	69,2	0,074	76,3	0,067	81,5	10,8	52,2
	0,21	100,00	0,07	100,00	0,06	100,00	15,69	100,00
MLR 05	0,40	41,3	0,130	25,8	0,052	22,1	30,9	50,8
	0,17	58,7	0,115	74,2	0,057	77,9	9,2	49,2
	0,23	100,00	0,12	100,00	0,06	100,00	14,27	100,00
MLR 06	0,44	48,2	0,122	30,2	0,056	25,6	28,8	46,0
	0,14	51,8	0,087	69,8	0,050	74,4	10,4	54,0
	0,21	100,00	0,10	100,00	0,05	100,00	14,75	100,00
MLR 07	0,51	67,9	0,097	39,5	0,136	44,5	29,9	46,3
	0,06	32,1	0,039	60,5	0,045	55,5	9,2	53,7
	0,16	100,00	0,05	100,00	0,06	100,00	13,52	100,00
MLR 08	0,37	62,8	0,083	43,5	0,099	45,0	26,2	48,8
	0,07	37,2	0,034	56,5	0,038	55,0	8,6	51,2
	0,14	100,00	0,05	100,00	0,05	100,00	12,76	100,00
	ley [%]	recuperación [%]	ley [%]	recuperación [%]	ley [%]	recuperación [%]	ley [%]	recuperación [%]
	0,47	58,20	0,09	32,52	0,049	15,8	30,8	56,4
	0,68	64,29	0,07	21,60	0,156	30,5	27,4	32,9
	0,60	88,84	0,10	61,76	0,191	70,9	30,1	56,2
	0,27	30,84	0,07	23,67	0,048	18,5	31,3	47,8
	0,40	41,34	0,13	25,80	0,052	22,1	30,9	50,8
	0,44	48,22	0,12	30,18	0,056	25,6	28,8	46,0
	0,51	67,90	0,10	39,55	0,136	44,5	29,9	46,3
	0,37	62,84	0,08	43,48	0,099	45,0	26,2	48,8

Tab. 8: Resultados del análisis de flotación

## **9.4 Reporte I GEOS: Lixiviación de oro de residuos que contienen pirita**



Anexo 9.4. Reporte I GEOS Lixiviación de

## **9.5 Reporte II GEOS: Lixiviación de oro**



Anexo 9.5. Reporte II GEOS.pdf

## **9.6 Resultados de los ensayos del Potencial de Drenaje Acido**

### **9.6.1 Resultados de ensayos de Pontificia Universidad Católica del Perú**



Anex 9.6.1 Potencial drenaje acida.pdf

### **9.6.2 Informe Geoquímico preparado por Golden Growing**



Anexo 9.6.2 ESTUDIO GEOQUIMI



### 9.6.3. ICMM imperative

R1	Please specify to which level the site has developed awareness of the hydrological basin context
R2	Please specify to which level the site has developed awareness of high value water assets in the basin
R3	Please specify the to which level the site has developed awareness of the social and governance dimension of catchment water use
R4	Please specify to which level the site has developed a site-wide water balance
R5	Please specify to which level the site has developed its basin and operational water risk awareness?
R6	Please specify to which level the site has develop its internal water management plan
R7	Please specify to which level the site monitors and manages its water use performance in operations?
R8	Please specify to which level this site engages with its stakeholders on water challenges?
R9	Please specify to which level this site engages in developing awareness and capacities around water issues?
R10	Please specify to which level the site has assigned water related accountabilities
R11	Please specify to which level the site builds water into its business strategy?
R12	Please specify to which level the site discloses and reports against their water use and performance
R13	Please specify to which level the site sets water targets and objectives