



G.E.O.S.

**INGENIEUR-
GESELLSCHAFT MBH**

G.E.O.S.

Ingenieurgesellschaft mbH

09633 Halsbrücke
Schwarze Kiefern 2

09581 Freiberg, Postfach 1162

Telefon: +49(0)3731 369-0

Telefax: +49(0)3731 369-200

E-Mail: info@geosfreiberg.de

www.geosfreiberg.de

Informe sobre la

Lixiviación de oro de residuos que contienen pirita

Número de proyecto: 30220158

Cliente: Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR)
Stilleweg 2
30655 Hannover

Geschäftsführer:
Jan Richter

HRB 1035 Amtsgericht
Registergericht Chemnitz

Sparkasse Mittelsachsen
IBAN:
DE30 8705 2000 3115 0191 48
SWIFT (BIC): WELADED1FGX

Deutsche Bank AG
IBAN:
DE59 8707 0000 0220 1069 00
SWIFT (BIC): DEUTDE8CXXX


USt.-IdNr. DE811132746

Halsbrücke, 12 de octubre de 2022


Cliente:	Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) Dr. M. Drobe Stilleweg 2 30655 Hannover
Proyecto nº G.E.O.S.:	30220158
Plazo de tramitación:	Ago. 2022 - Oct. 2022
Procesador:	Dr rer. nat. Frank Haubrich Anke Patzig
País/distrito/municipio:	
Mapa topográfico:	
Número de páginas Texto:	14
Número de instalaciones:	2

Halsbrücke, 12 de
octubre de 2022

i.A.


Roland Mayer
Director de departamento
Procesos/Biotecnología

i. A.


Frank Haubrich
Jefe de proyecto

ÍNDICE

Página

1	Inicio y tarea	5
2	Descripción del servicio	5
3	Resultados	6
3.1	<i>Cantidades de muestra y parámetros de lixiviación que deben fijarse.....</i>	6
3.2	<i>Lixiviación y muestreo</i>	6
3.3	<i>Análisis químicos de sólidos (Actlabs)</i>	7
3.4	<i>Análisis químicos de sustancias disueltas - Contenidos de Au-CN (EUROFINS)</i>	8
4	Evaluación y debate	9
4.1	<i>Evolución temporal de la concentración y la producción de Au</i>	9
4.2	<i>Evolución de las concentraciones de CN a lo largo del tiempo.....</i>	10
4.3	<i>Comparación de las concentraciones de Au y CN</i>	11
4.4	<i>Comparación de la recuperación de Au con respecto al análisis de sólidos y soluciones</i>	12
5	Resumen y recomendaciones	12
5.1	<i>Comparación de los datos de lixiviación de Au (datos recientes + antiguos)</i>	12
5.2	<i>Otras investigaciones/recomendaciones</i>	13

LISTA DE ILUSTRACIONES

Página

Figura 1:	Concentraciones de Au en función del tiempo y lixiviación del Au en la solución de lixiviación (en relación con las concentraciones inicial y final de Au en los sólidos)	9
Figura 2:	Evolución en función del tiempo de las concentraciones de CN y del consumo de CN en la solución de lixiviación	10
Figura 3:	Comparación de la concentración de CN y Au en la solución de lixiviación	11
Figura 4:	Comparación de los datos de lixiviación de Au recientes y antiguos	13

LISTA DE CUADROS

Página

:	Recopilación los parámetros masa, densidad, volumen y adición de NaCN...	6
Tabla 2	Cantidades de muestras disponibles, análisis y cantidades residuales del Lixiviación	6
Cuadro 3:	Contenido en Au de la muestra inicial (TAIL1), contenido en Au de las muestras lixiviadas (TAIL2/TAIL3) y éxitos de lixiviación.....	7
Tabla 4:	Concentraciones de Au obtenidas en la solución en función del tiempo (en mg/l) ...	8
Tabla 5:	Recuperación de Au en la solución en relación con el sólido (en %).....	8
Cuadro 6:	Evolución del contenido de CN en la solucióna	8
lo largo del tiempo (en mg/l)		8
Cuadro 7:	Evolución del consumo de CN en la solución alo	9
largo del tiempo (en %).....		9

LISTA DE ANEXOS

Apéndice	1 Protocolo de análisis_EUROFINS_Au-CN
consumo	Apéndice 2 Protocolo de
análisis_Actlabs_Au_contents_solids	

1 Iniciación y Tarea

El Instituto Federal de Geociencias y Recursos Naturales (BGR) de Hannover está llevando a cabo investigaciones sobre la lixiviación de oro a partir de relaves que contienen pirita en el marco del proyecto MinSus TC. Para ello, se lixiviaron previamente muestras de estériles de distintos grados de molienda de unos 350-500 g de masa mediante lixiviación con cianuro con los parámetros especificados por el GC. La evaluación de los resultados planteó otras cuestiones relativas a la optimización de la lixiviación con cianuro. De acuerdo con las especificaciones del cliente, se encargó una muestra de tai- lín sin moler y otra molida con una adición adicional de cianuro y una prolongación del tiempo de lixiviación.

Los trabajos se realizaron de acuerdo con la oferta n° 3018622 de fecha 20/07/2022 y el pedido n°: 205- 4500134778 de fecha 28/07/2022.

Los residuos de lixiviación se lavaron después de la lixiviación y pueden devolverse al cliente o están disponibles para otras pruebas.

2 Descripción del servicio

Se ofrecieron los siguientes servicios:

- 2.1 Toma de submuestras representativas de los materiales de partida para el análisis de Au y granulometría.
- 2.2 Determinación del contenido de oro antes y después de la lixiviación (Actlabs) utilizando el método 1A2-ICP Au Fire Assay - ICP-OES 30 en el rango 2 - 30.000 ppb.
- 2.3 Lixiviación a rodillo abierto de las muestras según los parámetros especificados del GA hasta 66 horas y muestreo en intervalos de tiempo correspondientes con adición adicional de cianuro después de 42 horas.
- 2.4 Análisis del contenido de cianuro y Au en la solución de lixiviación - El cianuro se analiza a partir de la solución según el método de referencia: DIN EN ISO 14403-2: 2012-10 (EUROFINS).
Análisis de Au según el método de referencia DIN EN ISO 17294-2: 2005-02 (EUROFINS)
- 2.5 Lavado de sólidos tras la lixiviación, secado y homogeneización para su posterior análisis (Actlabs)
- 2.6 Evaluación e informes.

3 Resultados

3.1 Cantidades de muestra y parámetros de lixiviación que deben fijarse

El cliente exigió la adición de 2,2 g de CN por 500 g de material de muestra (corresponde a 8,3 g de NaCN por kg de sólido). La cantidad de CN se ajustó en función de la masa de muestra disponible para la lixiviación. Se determinó que la densidad total del material de relaves era de 3,15 g/cm³. Se añadió la cantidad de agua correspondiente a la densidad de la suspensión. Según la cantidad de CN especificada, se obtuvo una concentración de CN de 1,42 g/l, que es el valor de partida para el consumo de CN (Tabla 1). Los parámetros de lixiviación se basan en los resultados del proyecto "Lixiviación de oro de estériles que contienen pirita - número de proyecto 30220068" según el pedido 205-4500133420. Además, después de 42 h de lixiviación debe añadirse de nuevo 1,0 g de CN por 500 g de material de muestra y, a continuación, el tiempo de lixiviación debe prolongarse hasta 66 h (+24 h).

Tabla 1: Recopilación de los parámetros masa, densidad, volumen y adición de NaCN

Muestra	Cola			Encore		Conc.	Suspensión			Agua
	Masa	Densidad	Vol.	CN	NaCN	CN	Densidad	Masa	Vol.	Masa
	[g]	[g/cm ³]	[cm ³]	[g]	[g]	[g/l]	[g/cm ³]	[g]	[cm ³]	[g]
M1_U (sin conexión a tierra)	415,9	3,15	132,0	1,83	3,45	1,42	1,20	1703,2	1419,3	1287,3
M1_G (Tierra)	464,2	3,15	147,4	2,04	3,85	1,42	1,20	1901,0	1584,2	1436,8

La adición adicional de 1,0 g de CN / 500 g de residuos después de 42 h aumentó la concentración total de CN de 1,42 g/l en 0,65 g/l a 2,07 g/l.

3.2 Procedimiento de lixiviación y Muestreo

El cliente facilitó las siguientes cantidades de muestra. De ellas, se tomaron aproximadamente 96 g y 45 g para el análisis, de modo que se dispuso de las siguientes masas para la lixiviación (cuadro 2). Las submuestras se tomaron en 6 pasos después de 2, 4, 16, 27, 42 y 66 horas.

Cuadro 2: Cantidades de muestras disponibles, análisis y cantidades residuales de la lixiviación

Muestra	de AG Original	Para análisis ⁽¹⁾	Lixiviación con NaCN	Lixiviación residuo 105°C	Pérdida por lixiviación	Actlabs Analytics	Muestra residual
	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[g]	[g]
M1_U (sin conexión a tierra)	511,7	95,8	415,9	408,0	1,9	51,2	364,7
M1_G (Tierra)	508,9	44,7	464,2	456,6	1,7	50,3	413,9

Naturales - BGR

Los valores iniciales de pH de los residuos (lodo en agua desionizada) estaban entre 8,16 y 8,20. Tras añadir el NaCN, el valor de pH de la solución subió a 9,95 - 10,0. El valor de pH se ajustó a aproximadamente 9,0 con varias gotas de HCl diluido. Durante el periodo de lixiviación, el valor del pH descendió continuamente de 9 a 8,6-8,8. Después de cada muestreo, el valor de pH se reajustó a pH 9 con unas gotas de NaOH 1 M.

Tras un periodo de lixiviación de 42 h, se añadió 1,0 g de CN / 500 g de residuos. El valor de pH volvió a subir a 9,94 - 9,98. El valor de pH se reguló a aproximadamente 9 utilizando unas gotas de HCl.

Una vez finalizada la lixiviación, se procedió a la separación sólido-líquido (filtración embudo Büchner), se separó el sólido lo más cuantitativamente posible, se lavó y se secó a 105°C. Las pérdidas por lixiviación (sólidos de la muestra inicial a la muestra lixiviada) ascendieron a 1,9 % para la muestra sin moler y a 1,7 % para la muestra molida (Tabla 2).

3.3 Análisis químicos de sólidos (Actlabs)

Tanto la muestra inicial no molida (M1_U (TAIL1)) como las muestras lixiviadas (M1_U (TAIL2) / M1_G (TAIL3)) se enviaron al laboratorio de materias primas certificado Actlabs para obtener análisis fiables de Au en las muestras sólidas. Las muestras se analizaron mediante el Código 1A2-ICP Au Fire Assay - ICP-OES 30 en el rango 2 - 30.000 ppb después de molerlas hasta la finura analítica. Se obtuvieron los siguientes resultados (Tabla 3).

Tabla 3: Contenido en Au de la muestra inicial (TAIL1), contenido en Au de las muestras lixiviadas (TAIL2 / TAIL3) y éxitos de lixiviación

Muestra	Original - contenido inicial	Lixiviado - contenido residual	Éxito de la lixiviación	Contenido residual de Au
	Au [ppb]		[%]	
M1_U (TAIL1)	1800			
M1_U (TAIL2)		343	80,9	19,1
M1_G (TAIL3)		397	77,9	22,1

La tabla 3 muestra que la concentración inicial de Au es de 1,8 ppm Au. Después de un periodo de lixiviación de 66 h, todavía hay 0,343 ppm en la muestra no molida y 0,397 ppm en la muestra molida. Esto corresponde a una recuperación del 80,9 % y del 77,9 % y a un Au residual del 19,1 % y del 22,1 % respectivamente. En comparación con las muestras de estériles del pedido n° 205- . No. 205-4500133420, el contenido inicial de Au de 1,8 ppm es significativamente inferior (2,4 a 3,2 ppm).

Sin embargo, no se observa un efecto positivo adicional del esparcimiento por trituración. Esto concuerda con los resultados conocidos.

3.4 Análisis químicos de sustancias disueltas - Contenidos de Au-CN (EUROFINS)

Se tomaron muestras después de 2, 4, 16, 27, 42 y 66 h de lixiviación. En cada caso, se extrajeron unos 30 ml de solución tras una breve sedimentación del sólido después de su eliminación, se filtraron por membrana de 0,45 µm y se enviaron a Eurofins para su análisis en busca de Au y CN. Se obtuvieron los siguientes resultados de lixiviación del oro:

Tabla 4: Concentraciones de Au obtenidas en la solución en función del tiempo (en mg/l)

Muestra/Hora	2 h	4 h	16 h	27 h	42 h	66 h
M1_U	0,40	0,44	0,48	0,49	0,51	0,52
M1_G	0,46	0,49	0,51	0,52	0,53	0,55

Según los datos iniciales con 1,8 ppm de Au en el sólido, la cantidad de material de estéril y la cantidad de solución utilizada, se podría haber alcanzado una concentración máxima de Au de 0,65 mg/l. Según la tabla 4, 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 ha pasado a la solución en las 2 primeras horas (en función de los sólidos utilizados) (tabla 5). Tras los parámetros de 66 h especificados por el GC, se alcanzó un rendimiento máximo de Au del 80 % en la muestra sin moler y de casi el 85 % en la muestra molida.

Cuadro 5: Recuperación de Au en la solución en relación con el sólido (en %)

Muestra/Hora	2 h	4 h	16 h	27 h	42 h	66 h
M1_U	61,5	67,7	73,8	75,4	78,5	80,0
M1_G	70,8	75,4	78,5	80,0	81,5	84,6

No se pudo determinar un aumento significativo del contenido de Au mediante la adición de CN adicional.

Durante el periodo de lixiviación, los contenidos de CN disminuyeron sucesivamente

(Tabla 6). Tabla 6: Evolución del contenido de CN en la solución a lo largo del

Muestra/Hora	0 h	2 h	4 h	16 h	27 h	42 h	66 h
M1_U	1420	980	830	570	490	200	470
M1_G	1420	750	600	210	190	180	210

En las dos primeras horas se consumió la mayor cantidad de CN- como porcentaje del tiempo de lixiviación (Tabla 7).

Cuadro 7: Evolución del consumo de CN en la solución a lo largo del tiempo (cifras en %).

Muestra/Hora	0 h	2 h	4 h	16 h	27 h	42 h	66 h ⁽²⁾
M1_U	100	69,0	58,5	40,1	34,5	14,1	22,7
M1_G	100	52,8	42,3	14,8	13,4	12,7	10,1

⁽²⁾ El porcentaje de consumo de CN después de 66 h se basó en el valor 2070 mg/l de CN.

Al cabo de 42 horas, más del 85% del CN se ha consumido o degradado. Esto coincide con los resultados del proyecto anterior. La adición adicional de CN también se degrada muy rápidamente en 24 h, pero apenas tiene efecto sobre el rendimiento de Au.

4 Evaluación y debate

4.1 Evolución temporal de la concentración de Au y de la producción

El siguiente gráfico muestra la evolución del contenido de Au y la cantidad de Au liberado a lo largo del tiempo de lixiviación (Figura 1). Puede observarse que para ambas muestras la principal cantidad de Au pasa a solución en las primeras 2 h de tiempo de lixiviación. En cuanto a los éxitos de la lixiviación entre la muestra sin moler y la molida, sólo se observa un rendimiento ligeramente superior tras la molienda a lo largo del tiempo total. En lo que respecta a las dos primeras horas, la molienda da lugar a un rendimiento de Au un 10 % superior, del 61 % para la muestra sin moler y del 71 % para la muestra molida.

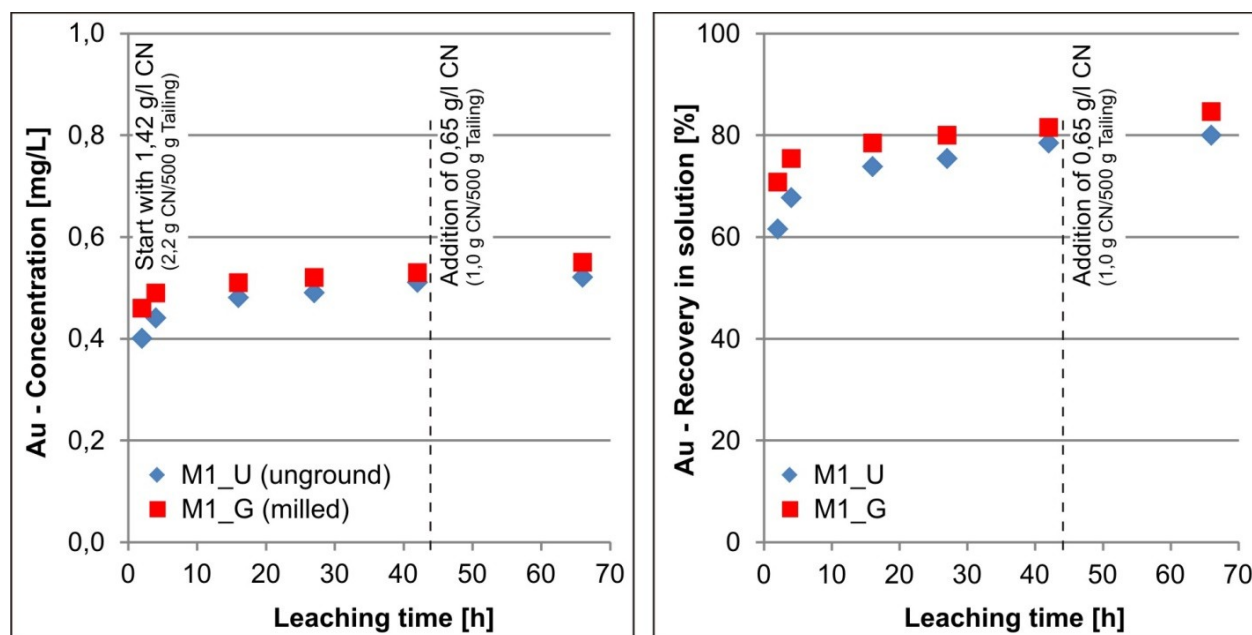


Figura 1: Concentraciones de Au en función del tiempo y lixiviación del Au en la solución de lixiviación (en relación con las concentraciones inicial y final de Au en los sólidos)

Se puede suponer que el comportamiento de lixiviación de ambas muestras es prácticamente el mismo a lo largo del tiempo y coincide con los resultados del proyecto "Lixiviación de oro de residuos que contienen pirita - proyecto número 30220068". El efecto de la adición adicional de CN para la movilización del Au es muy limitado y apenas visible (Figura 1).

4.2 Evolución temporal de las concentraciones de CN -

En cuanto a la evolución de las concentraciones de CN a lo largo del tiempo, la muestra de suelo consume CN más rápidamente. Casi la mitad del CN se consume en las 2 primeras horas. Después de 16 h, la concentración de CN ya ha descendido a un valor casi constante. En la figura 2 se muestra la adición de CN adicional tras 42 h de lixiviación. Después de 66 h, la concentración de CN en la muestra molida está al mismo nivel que después de 42 h. Por el contrario, el consumo de CN en la muestra sin moler es más gradual tras el tiempo de lixiviación, alcanzando el mismo valor tras 42 h que en la muestra sin moler.

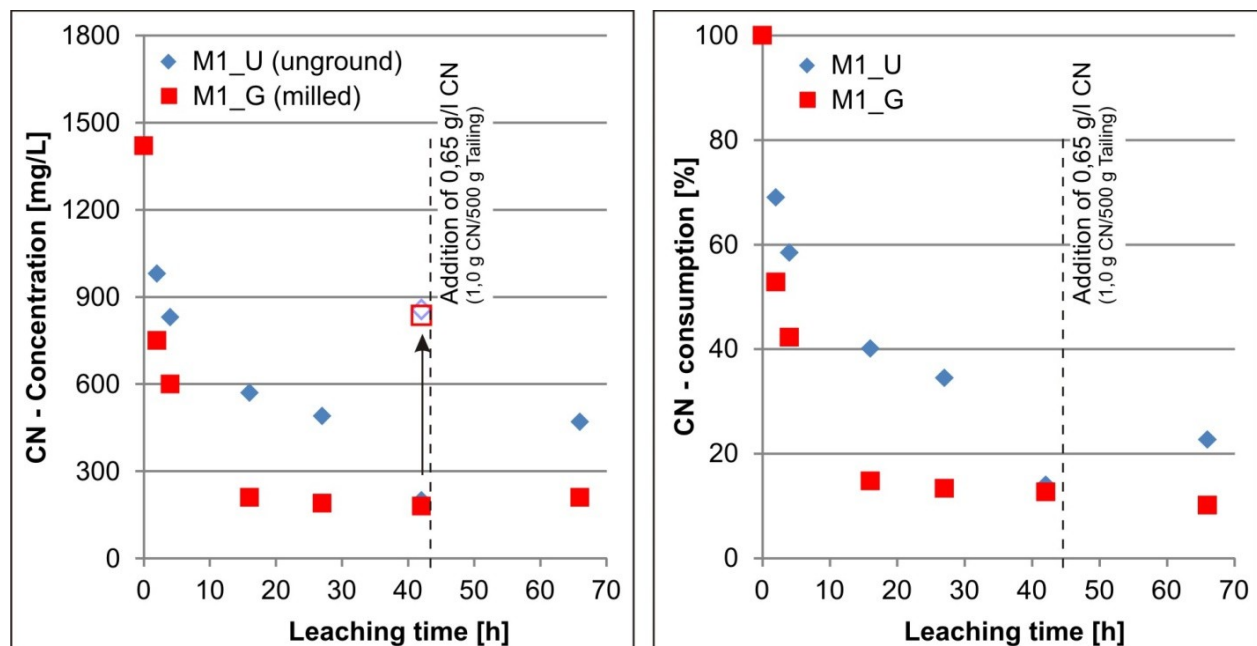


Figura 2: Evolución en función del tiempo de las concentraciones de CN y del consumo de CN en la solución de lixiviación

Incluso con la administración adicional de CN, el 78 o el 90 % del CN se consumió después de 66 h.

4.3 Comparación de las concentraciones de Au y CN -

La comparación del consumo de CN y la concentración de Au en la Figura 3 muestra muy claramente que la mayor parte del Au soluble en CN en las condiciones establecidas se eliminó al cabo de sólo 2 horas. Esto puede observarse en el mismo curso de consumo de CN y aumento de la concentración de Au para ambas muestras.

Al igual que en los resultados anteriores, un pequeño aumento de Au después de las 2 - 4 horas se asocia a un consumo de CN desproporcionadamente elevado.

Otros elementos/compuestos pueden reaccionar con el CN o éste puede ser oxidado por la lixiviación a rodillo abierto. Esto último tiene la ventaja de que el potencial tóxico del cianuro se reduce durante un periodo de lixiviación más largo y se simplifican los pasos posteriores para extraer o concentrar el Au.

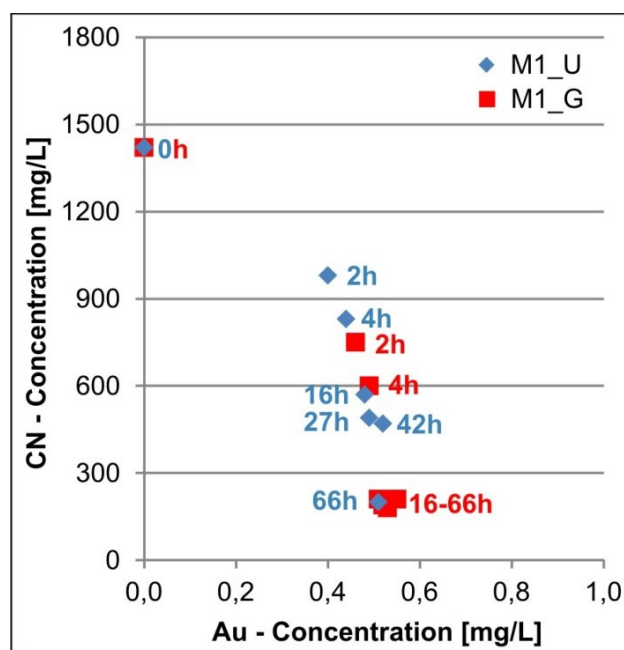


Figura 3: Comparación de la concentración de CN y Au en la solución de lixiviación

Ambas muestras muestran la misma progresión del consumo de CN a lo largo del tiempo, con sólo un 10 % del CN utilizado todavía presente tras 42 h de lixiviación. La lixiviación efectiva del Au sólo tiene lugar en las primeras 2 a 4 horas.

4.4 Comparación de la recuperación de Au con respecto a los análisis de sólidos y soluciones

La comparación de los datos de Actlabs (sólidos) y EUROFINS (soluciones) reveló diferencias en las concentraciones iniciales/residuales de Au en los sólidos y los balances en las soluciones analizadas. Según Actlabs, tras 66 h de lixiviación con 1,8 ppm de Au en la muestra inicial, todavía se encontraban 0,343 ppm de Au en la muestra sin moler y 0,397 ppm de Au en la muestra molida, lo que corresponde a una lixiviación del 80,9 y 77,9 % respectivamente. Según los datos EUROFINS con el valor inicial de 1,8 ppm, se moviliza el 80,0 % del Au de la muestra sin moler y el 84,6 % de la muestra molida en el mismo tiempo. Estas diferencias deben tenerse en cuenta a la hora de realizar extrapolaciones para aplicaciones industriales. La causa de las diferencias radica generalmente en las diferentes técnicas analíticas y en un error analítico inevitable.

5 Resumen y recomendaciones

Tanto las muestras molidas como las no molidas muestran la movilización más efectiva de Au en las primeras 2 - 4 horas. En el tiempo siguiente y también mediante la adición adicional de CN, sólo se lixivia un poco más de Au en porcentaje.

El comportamiento de la lixiviación en las primeras 2 - 4 h indica fases de Au libres que son fáciles de atacar con CN. Se supone que el resto no lixiviable del Au está ligado en la red de la pirita, como pequeñas escamas de Au encerradas en el grano de pirita y/u otras fases minerales de difícil acceso. En la comparación de las dos muestras, principalmente después de 2 horas, se observa un efecto visible de mayor recuperación gracias a la molienda adicional.

5.1 Comparación de los datos de lixiviación de Au (datos recientes + antiguos)

La figura 4 compara los resultados recientes con los del último proyecto.

Esto demuestra que se observa casi el mismo comportamiento y eficacia de lixiviación. Independientemente del tipo de molienda, la proporción principal de Au lixiviable por CN se moviliza en las primeras 2-4 horas (Figura 4).

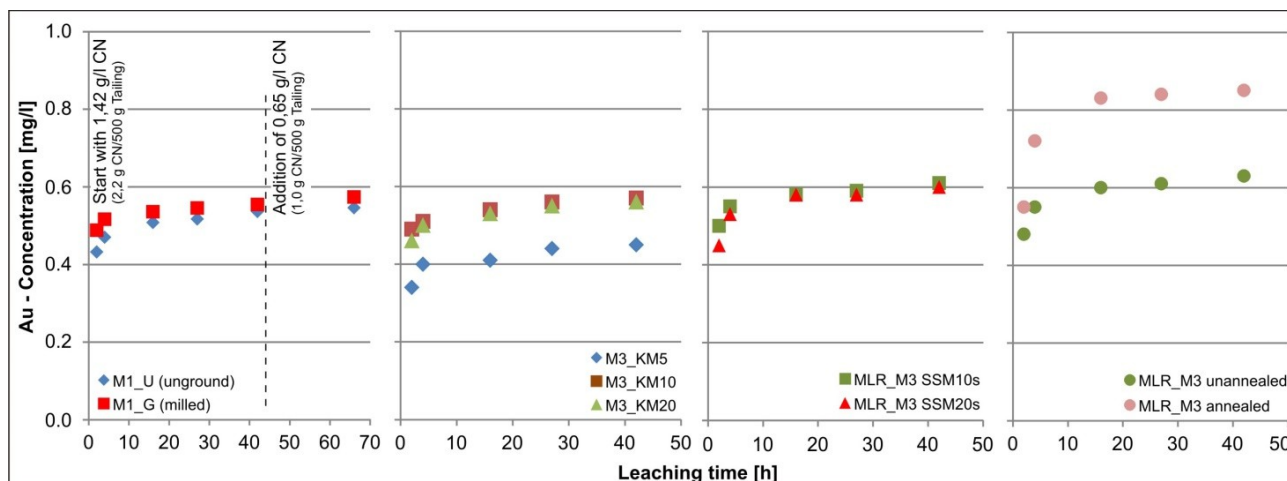


Figura 4: Comparación de los datos recientes de lixiviación de Au con los datos antiguos

Sin embargo, al comparar las muestras del contrato "Lixiviación de oro de estériles que contienen pirita - proyecto número 30220068", los contenidos de Au en las muestras de estériles son diferentes. Se detectaron contenidos de Au de 2,4 a 3,2 ppm (Actlabs). En las investigaciones recientes sólo se encontró 1,8 ppm de Au en los sólidos. Esto podría tener un impacto económico significativo en la cantidad de Au que puede extraerse.

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.

Dado que un nuevo esmerilado para exponer adicionalmente las fases de Au solubles en CN apenas condujo aquí a un resultado positivo de ruptura, podría utilizarse el material de partida sin esmerilar. Un nuevo esmerilado conllevaría mayores costes de inversión, consumo de energía y mano de obra, lo que no parece estar justificado en este caso.

5.2 Otras investigaciones/recomendaciones de

Para determinar si el Au no lixiviable anteriormente aún podría recuperarse, podrían realizarse las siguientes pruebas:

1. Molienda más intensiva de los residuos hasta $< 10 \mu\text{m}$ (molino micrométrico de la TU Bergakademie Freiberg, Inst. f. Mineralogie) con posterior lixiviación con cianuro (lixiviación agitada a pequeña escala).

2. Tratamiento de los estériles residuales con medios oxidantes / agua regia para movilizar el Au refractario (lixiviación agitada a pequeña escala).
3. Oxidación microbiana completa de la pirita a sulfato de Fe(III). El Au o las fases que contienen Au permanecerían como material refractario, que podría recuperarse completamente mediante lixiviación posterior con cianuro. La disolución completa de la pirita también permitiría recuperar el Au contenido en la red.

El proceso descrito en el punto 3 podría tener un trasfondo económico positivo si la pirita se utilizara para la producción de sales de Fe (sulfato de Fe(III)) para la industria. El Au puede extraerse completamente de los sólidos restantes (residuo de lixiviación) mediante lixiviación con cianuro.