

19



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 708 770**

51 Int. Cl.:

**C22B 15/00** (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **05.11.2013 PCT/BR2013/000475**

87 Fecha y número de publicación internacional: **15.05.2014 WO14071485**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **05.11.2013 E 13799176 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **31.10.2018 EP 2917378**

54 Título: **Proceso para eliminar uranio en concentrados de cobre mediante separación magnética**

30 Prioridad:

**06.11.2012 US 201261723196 P**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

**11.04.2019**

73 Titular/es:

**VALE S.A. (100.0%)  
Torre Oscar Niemeyer, Praia de Botafogo n° 186,  
Sala 701 a sala 1901, Botafogo,  
22250-145 Rio de Janeiro, RJ, BR**

72 Inventor/es:

**MARQUES, ANTONIO EUCLIDES JAQUES;  
DA SILVA, WESLEY JOSE;  
BERGERMAN, MAURÍCIO GUIMARÃES;  
RODRIGUES, WENDEL JOHNSON y  
GONÇALVES, KEILA LANE DE CARVALHO**

74 Agente/Representante:

**MANRESA VAL, Manuel**

**ES 2 708 770 T3**

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín Europeo de Patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre Concesión de Patentes Europeas).

## DESCRIPCIÓN

Proceso para eliminar uranio en concentrados de cobre mediante separación magnética.

5 Esta solicitud reivindica prioridad sobre la Solicitud de Patente de los Estados Unidos No. 61/723.196, titulada "Proceso para eliminar uranio en concentrados de cobre mediante separación magnética," presentada el 06 de noviembre de 2012.

### Campo de la Invención

10 La presente invención se refiere a un proceso para eliminar uranio de un concentrado de cobre mediante separación magnética con el objeto de reducir el contenido de uranio en un concentrado de cobre a niveles comercialmente aceptables.

### Antecedentes de la Invención

15 Existen muchas técnicas utilizadas con separación magnética, especialmente en procesos para la eliminación del uranio de un concentrado de cobre. Como se sabe, la eficiencia de la separación depende de varios factores, incluyendo el tiempo de resistencia en el campo magnético, la liberación de los componentes minerales y las fuerzas que compiten, como la gravedad y la fricción.

20 David C. Dahlin y Albert R. Rule han indicado que la Oficina de Minería de los Estados Unidos ha investigado la susceptibilidad magnética de los minerales en función de la intensidad del campo magnético para determinar cómo esa asociación podría afectar el potencial de la separación magnética de alto campo como una alternativa a otras tecnologías de separación. Se prepararon concentrados de un solo mineral con muestras de un mismo depósito, a fin de comparar las susceptibilidades magnéticas de los minerales que se producen conjuntamente. Además, se prepararon concentrados con muestras de distintos depósitos para comparar las susceptibilidades magnéticas de dichos minerales. El resultado de estas investigaciones mostró que la susceptibilidad magnética de los minerales es esencialmente independiente de la intensidad del campo magnético, después de la saturación con compuestos ferromagnéticos.

25 Teniendo en cuenta a esta información, una tecnología de separación magnética basada en mejorar las susceptibilidades de los minerales en campos magnéticos de alta intensidad es diferente y nueva.

35 Respecto de los procesos de separación de los metales, la separación magnética de alta intensidad por vía húmeda (WHIMS) (*wet high intensity magnetic separation*) o la filtración magnética son técnicas conocidas por cualquier experto en la técnica. Dichas técnicas son útiles para eliminar las impurezas magnéticas.

40 Las ventajas de la filtración magnética son la menor contaminación y la alta recuperación de los metales. A diferencia de otros beneficios o enriquecimientos, la misma puede ser fácilmente usada en partículas de tamaños micrométricos, pero esta tecnología requiere altos costos de capital.

45 Otro proceso de la técnica anterior relacionada con la separación magnética fue descrito por A.R. Shake, et al. Este artículo describe la Separación Magnética de Gradientes Elevados (HGMS) (*High-Gradient Magnetic Separation*), la que puede ser usada para concentrar plutonio y uranio en corrientes de residuos y suelos contaminados. La ventaja de esta tecnología es que no crea residuos adicionales y también reduce los reactivos químicos para una posterior descontaminación.

50 En general, la tecnología de la separación magnética puede ser usada en una amplia gama de aplicaciones en la industria minera. El documento US 7.360.657 describe un método y un aparato para la separación magnética continua para separar las partículas magnéticas sólidas de los lodos, proporcionando un separador magnético sustancialmente vertical que comprende la disposición de un envase para introducir un flujo continuo de alimentación de los lodos.

55 La purificación de la ilmenita de concentrados con cantidades muy bajas de cromo está bastante bien ilustrada en el documento US 3.935.094. Respecto de esta descripción, el concentrado de ilmenita es sometido a separación magnética por vía húmeda y se elimina de la misma el contaminante de cromita susceptible al alto magnetismo. A continuación, la parte no magnética es sometida a un horno en condiciones de oxidación y se observa un leve aumento en el peso de la ilmenita durante la oxidación. Posteriormente, la ilmenita oxidada es magnéticamente susceptible y es separada de las cromitas.

60 La separación magnética mediante superconducción es una tecnología de eliminación de minerales débilmente magnéticos más eficiente con costos de procesamiento más bajos. El uso de la separación magnética por superconducción puede ser aplicada para mejorar el brillo del caolín. Además, el separador de tambor

magnético para tierras raras puede ser aplicado a reducir los niveles de uranio y torio de los concentrados de ilmenita.

5 Se realizaron estudios experimentales con el separador magnético de gradiente elevado mediante superconducción (SC-HGMS) (*superconducting high gradient magnetic separator*) con mineral de uranio de baja graduación (análisis <100 ppm  $U_3O_8$ ), preparado a partir de colas de plantas de cobre de Rakha en las que el uranio se presenta como uraninita. Los estudios anteriores realizados respecto del separador magnético de alta intensidad en medio húmedo (WHIMS) mostraron que la recuperación de la uraninita se reduce cuando el tamaño de la partícula es inferior a 20  $\mu m$  y no excede el 20% de las partículas más pequeñas que 5 mm. Los estudios actuales muestran que el SC-HGMS es capaz de recuperar más del 60% con partículas aun más pequeñas que 5  $\mu m$ . Por lo tanto, resulta posible lograr mejoras importantes en la recuperación de uraninita mediante la técnica WHIMS, conjuntamente con las técnicas SC-HGMS.

15 El artículo "Estudio paramétrico del proceso para la recuperación de uranio con valores de tamaño muy fino mediante separador magnético de gradiente alto por superconducción", de N.P.H. Padmanabhan y T. Screenivas (Advanced Power Technology, vol. 22, 2011, páginas 131-127) analiza la aplicación del separador magnético de gradiente alto por superconducción para la recuperación de uranio de tamaño muy fino con valores minerales presentes en los residuos de flotación de un mineral de cobre de la India. El contenido de  $U_3O_8$  en las colas es del 0.009%. El enfoque de este estudio se centra en determinar los efectos de varios procesos variables como el campo magnético aplicado, el factor de relleno con lana en el receptáculo, el diámetro de la lana, la capacidad de carga de la matriz, el índice de flujo de alimentación y el pH de los lodos en la recuperación de los valores de uranio en la matriz magnetizada.

25 El artículo, "Recuperación de uraninita en minas de cobre de Rakha" de S.N. Degaleesam, V.M. Karve, K.V. Viswa- nathan y K.K. Majundar (Transactions of The Indian Institute of Metals, marzo 1968, páginas 42-44) explica que el mineral de cobre de las minas de Rakha de Bihar contiene 0.02% de  $U_3O_8$ , de lo cual una pequeña parte va al concentrado de sulfuro. Se han hecho intentos de recuperar los valores de uranio de las colas de flotación. Mediante el tratamiento en mesa vibratoria húmeda, seguida por separación magnética de la magnetita, el concentrado analizado del 1.65%  $U_3O_8$ , la recuperación es del 54.0%. Mediante una nueva combinación de reactivos, incluyendo el fosfato de ácido iso-octilo y el acondicionamiento de la pulpa a una alta densidad de pulpa, seguida de la adición de ácido sulfúrico para mantener un pH de 1.5, se obtuvo un concentrado analizado en 0.15%  $U_3O_8$ , siendo la recuperación del 88%.

### Resumen de la Invención

35 A la luz de los documentos antes mencionados, la presente invención describe un proceso ventajoso y efectivo para eliminar el uranio de un concentrado de cobre mediante separación magnética (campos altos y bajos) con el fin de reducir el contenido de uranio en un concentrado de cobre a niveles comercialmente aceptables.

40 Ventajas adicionales y características novedosas de estos aspectos de la invención serán descritas en parte en la descripción siguiente y, en parte, resultarán más aparentes para los expertos en la técnica una vez examinado lo siguiente, o una vez que, mediante la práctica, se aprenda la invención.

### Breve descripción de los dibujos

45 Varios ejemplos de aspectos de los sistemas y métodos serán descritos en detalle, pero sin limitación, con referencia a las siguientes Figuras, en donde:

50 La FIG. 1 es un diagrama de flujo que ilustra la flotación de finos de la carga circulante de flotación de limpieza (cleaner).

La FIG. 2 es un diagrama de flujo que ilustra la concentración de las cargas circulantes de la flotación de limpieza (cleaner).

La FIG. 3 es un diagrama de flujo de flotación de la pasada 2.

55 La FIG. 4 es un gráfico que ilustra la distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de relimpieza (re-cleaner) (pasada 2-circuito cerrado).

La FIG. 5 es un gráfico que ilustra la distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de relimpieza (re-cleaner) (pasada 3-circuito abierto).

La FIG. 6 es un gráfico que ilustra la distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) (pasada 3-circuito abierto).

60 La FIG. 7 es un diagrama de flujo de la flotación de las pasadas 1 y 2.

La FIG. 8 muestra los valores promedio de grado y distribución respecto del cobre y el uranio en las pasadas de flotación.

La FIG. 9 es un diagrama de flujo de la flotación del circuito cerrado de limpieza (cleaner) a partir de la muestra II.

La FIG. 10 es un gráfico que representa los resultados del grado del cobre y el uranio en la separación magnética del concentrado de flotación relimpieza (re-cleaner) (circuito de limpieza cerrado - muestra II).

La FIG. 11 es un gráfico que representa la distribución de cobre y uranio en la separación magnética del concentrado de flotación relimpieza (re-cleaner) (circuito de limpieza cerrado - muestra II).

La FIG. 12 es un gráfico que representa el grado de cobre y uranio en la separación magnética del concentrado de flotación de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) (circuito de limpieza cerrado)

La FIG. 13 es una micrografía que muestra las características de las asociaciones de uraninita en los productos de separación magnética - (A) producto no magnético y (B) producto magnético.

La FIG. 14 representa la campaña de la 3ª planta.

La FIG. 15 muestra el balance en masa del concentrador con flotación del producto magnético.

### Descripción detallada de la presente invención

La siguiente descripción detallada no tiene, de manera alguna, la intención de limitar el alcance, la aplicabilidad o la configuración de la invención. Más exactamente, la siguiente descripción proporciona el entendimiento necesario para implementar modalidades ilustradas en los ejemplos. Cuando se usan las descripciones proporcionadas en el presente, los expertos en la materia reconocerán alternativas adecuadas que pueden ser aplicadas, sin extrapolar el alcance de la presente invención.

La presente invención describe un proceso efectivo para eliminar el uranio del concentrado de cobre mediante separación magnética que comprende los pasos de: una separación magnética, un paso de trituración y un paso de flotación de finos de los concentrados de cobre, en donde el paso de la separación magnética comprende los siguientes subpasos:

i- La separación magnética de los concentrados de cobre dividiendo una fracción magnética (a) y una fracción no-magnética (b) con distribución de tamaño alrededor de 15-40  $\mu\text{m}$  ( $P_{80}$ ) con contenido de uranio es aproximadamente de 20 ppm a 100 ppm; en este paso se obtiene alrededor de 76-99.99% de un concentrado de cobre no-magnético con bajo contenido de uranio, y comercializable;

ii- El paso de trituración de la fracción magnética (a) logrado en la separación magnética i, a fin de producir un concentrado magnético con una distribución de tamaño de finos en un rango de 5-15  $\mu\text{m}$  ( $P_{80}$ ) con alto contenido de uranio aproximadamente de 100 ppm a 400 ppm.

iii- Un paso de columna de flotación de los finos del paso ii, que de esa manera produce un concentrado de cobre con una recuperación del cobre en un rango de 0.01% a 25% (c); en este paso, se obtiene un concentrado de cobre con contenido de uranio desde aproximadamente 100 ppm a 300 ppm, utilizando un colector de ditio+monotiofostato y espumante con un pH=8.

iv- La mezcla de la fracción no magnética (b) obtenida del paso de separación magnética i., que tiene bajo contenido de uranio con el concentrado logrado al final del paso iii, produciendo un concentrado final (c), con el contenido de uranio aproximadamente desde 40 ppm a 150 ppm y una recuperación final del cobre en el rango del 75 % a 99.99%.

### Ejemplos 1:

#### 1. Primera campaña en planta (muestra-I)

Se utilizó una muestra típica de mineral con composición litológica de brechas magnéticas (30%) y brechas cloríticas (70%). La muestra I que comprende 1,5 toneladas de dicho mineral proviene de una perforación de muestras y su análisis químico se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1 - Análisis químico de la muestra I

Elemento	Ensayo
Cu (%)	1.52
Au (g/t)	0.68
S (%)	1.35
Fe (%)	23.26
U (ppm)	131
F (ppm)	1423
Al (%)	4.88
K (%)	0.38
Si (%)	17.48

Primeramente, la muestra I fue sometida a las siguientes etapas de conminución:

- 5 i. Perforación para muestras a un tamaño de partícula inferior a 12.5 mm
- ii. Homogenización
- iii. Trituración a un tamaño de partícula inferior a 3.5 mm
- 10 iv. Clasificación en circuito cerrado compuesto por un molino de bolas (carga del 40%) y un clasificador en espiral.

El circuito de trituración ha operado con el 40% de la carga de bolas de acero. El derrame del clasificador de espiral estaba destinado a la alimentación de la flotación de recuperación (rougher), mientras que la corriente inferior fue enviada a la carga circulante de trituración. La alimentación de flotación de recuperación (rougher) presentó  $P_{80}$  de 210  $\mu\text{m}$ .

La flotación de recuperación (rougher) se realizó en celdas mecánicas con capacidad de 40 litros y las condiciones operativas se ilustran en la Tabla 2.

20

Tabla 2 – Condiciones de la flotación de recuperación (rougher)

Parámetro	Valor
Alimentación (kg/h)	200
Alimentación de concentración de sólidos (%)	37
Alimentación de gravedad específica ( $\text{t/m}^3$ )	1.36
PH de Flotación (natural)	8.5
Número de celdas	3
Tiempo de residencia de flotación (min)	18.5

Los colectores y los espumantes del desarrollo de ingeniería de la fase I se usaron nuevamente en la planta. Con el fin de evitar la caída en la eficiencia de los reactivos debido a la dilución de los lodos y al arrastre en la espuma, el colector y los espumantes fueron distribuidos en diferentes puntos de la etapa de recuperación (rougher). La Tabla 3 muestra las funciones, los puntos de dosificación y la dosificación de los reactivos de flotación.

25

Tabla 3 - Dosificación y función de los reactivos de flotación

Nombre	Función	Dosificación local	Dosificación (g/t)
Mezclador ditio + monotiofosfato	Colector	Celdas de Recuperación	10
Amilxantato	Colector	Molino de bolas	10
		Celdas de Recuperación	10
		Depuración-limpieza	5
Metil isobutil carbinol	Espumante	Recuperación	10
		Celda de depuración-limpieza	5
Polipropileno glicol	Espumante	Celdas de Recuperación	12.5

30

A continuación, se redujo el concentrado de recuperación continuación, se redujo el concentrado de recuperación (rougher) a  $P_{80}$  de 25  $\mu\text{m}$ . Este paso de re-trituración fue realizado en un molino vertical. Luego, el concentrado rougher fue sometido a un circuito de flotación de limpieza (cleaner), compuesto por las siguientes etapas:

- 35 i. Re-trituración en un molino vertical con 42% de carga (bolas de acero inoxidable), a fin de reducir el concentrado rougher a  $P_{80}$  de 25  $\mu\text{m}$ .
- ii. Paso de flotación cleaner del producto obtenido en el paso i. en una columna de flotación (2.0m x 0.1 m). El concentrado cleaner fue enviado a una etapa re-cleaner (relimpieza) y las colas siguieron a una

depuración-limpieza (scavenger-cleaner).

iii. Flotación relimpieza (re-cleaner) del producto obtenido al final del paso ii., realizado en una columna de flotación (2.0m x 1m). Las colas regresaron a la alimentación de limpieza.

5 iv. El paso de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) fue realizado en tres celdas mecánicas (capacidad de 10 L) a las que se alimentó con las colas de limpieza (cleaner) del paso ii.

El concentrado de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) fue reenviado al paso de limpieza y las colas de depuración-limpieza, conjuntamente con las colas de recuperación (rougher), compusieron las colas finales.

10 Esta configuración del circuito de limpieza permite realizar dos pasadas en un circuito abierto, sin reciclar el concentrado de depuración-limpieza y la cola de relimpieza e influye en el concentrado final.

Como alternativa al circuito abierto, la planta operó en un circuito cerrado.

15 La carga circulante de flotación (el concentrado depuración-limpieza y la cola de relimpieza) fue recogida y sometida a una re trituración ( $P_{80} = 7 \mu\text{m}$ ) y a continuación, a un paso de flotación en celdas mecánicas. En la Figura 1 se muestra un circuito de flotación de finos.

20 Se sometió el concentrado 2 a separación magnética usando una inducción de rendimiento magnético de 2000 y 15000 Gauss.

#### Respuesta de la flotación de la muestra I

25 La muestra I fue flotada en dos configuraciones cleaner (limpieza), en circuitos abierto y cerrado. Por lo tanto, para obtener datos de la distribución de los óxidos U-Pb, se realizaron las pasadas 1 y 3 en un circuito de limpieza abierto. La Tabla 4 presenta los resultados correspondientes.

Tabla 4 – Resultados de las pasadas 1 y 3 (circuito abierto)

Producto de flotación	Concentrado de relimpieza (re-cleaner)		
Parámetro	Elemento	Pasada 1	Pasada 3
Calidad	Cu (%)	30.24	30.91
	U (ppm)	154	160
	F (ppm)	354	596
Distribución (%)	Cu	71.0	75.0
	U	4.1	4.6
Producto de flotación	Carga circulante de limpieza (concentrado depuración-limpieza + cola relimpieza)		
Parámetro	Elemento	Pasada 1	Pasada 3
Calidad	Cu (%)	17.85	9.31
	U (ppm)	334	294
	F (ppm)	2400	2225
Distribución (%)	Cu	23.5	21.4
	U	5.0	8.0

30 Es posible concluir que:

i. El concentrado de relimpieza muestra un contenido promedio de cobre y uranio del 30.6% y 157 ppm, respectivamente. Por lo tanto, el concentrado de flotación está compuesto por 88% de calcopirita y 12% de ganga, que está distribuida entre óxidos de hierro y silicatos.

35 ii. La recuperación del cobre es baja, 71 y 75% debido a la ausencia de la recirculación del concentrado de depuración-limpieza y de la cola de relimpieza, mientras se considera que la distribución del uranio es importante, entre 5.0 y 8.0%.

40 La carga circulante de flotación de limpieza (concentrado de depuración-limpieza + cola de relimpieza) es

sometida a re-trituración, a fin de reducir este producto a  $P_{80}$  10  $\mu\text{m}$ . A continuación, se hace flotar la carga circulante, sin colectores. La Figura 2 muestra los resultados.

Como se indicó en la Figura 2, es necesario señalar que:

- i. El contenido de cobre en la cola de depuración es muy alto (3.14%) debido al bajo índice de colisión de las partículas finas ( $P_{80}=10 \mu\text{m}$ ) durante la flotación. Por lo tanto, se obtiene una baja recuperación del cobre del 72.4%.
- ii. Los grados de cobre y uranio de los concentrados de limpieza en los finos de flotación son de 32.73% y 87 ppm, respectivamente. Dado que el grado de uranio en la carga circulante es de 338 ppm, la flotación puede hacer disminuir el contenido de uranio en 74.3%.
- iii. Si se combinan los concentrados de recuperación y de limpieza obtenidos de la flotación de finos, se logra un grado de uranio más alto (178 ppm) debido a que se ha elevado la distribución del uranio en el concentrado de recuperación (8.6%).

La Figura 3 presenta los resultados de la pasada 2, realizados en un circuito cerrado de limpieza.

En base a estos resultados, es posible observar:

- i. El grado de cobre en el concentrado de flotación y la recuperación son, respectivamente, de 30.6% y 94.3%.
- ii. Las colas de la flotación final muestran el 0.09% de grado de cobre, compuesto por colas rougher (de limpieza) y colas de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) ( $\text{Cu}=0.41\%$ ).
- iii. El concentrado de limpieza (cleaner) mejora el concentrado de recuperación (rougher) en 30.7%. Por esta razón, el grado de cobre aumenta de 8.5% a 26.14%. La recuperación cleaner de cobre es de 88.4%.
- iv. La flotación de relimpieza (re-cleaner) muestra un factor de enriquecimiento bajo (1.17) con relación al concentrado cleaner. Este hecho indica que el agua de enjuague de la columna de re-cleaner puede ser optimizada a fin de mejorar la selectividad del concentrado.
- v. El grado de uranio del concentrado scavenger-cleaner es alto, 477 ppm, una evidencia de esta acumulación nociva.

Los estudios de microscopía electrónica de barrido en concentrados de relimpieza (circuitos cerrado y abierto) detectaron que los óxidos de uranio están asociados de manera preferencial con los sulfuros de cobre, aproximadamente 46% y 62% para los circuitos cerrado y abierto, respectivamente. Asimismo, se encontró uranio frecuentemente dentro de la magnetita. En el circuito de relimpieza cerrado, el 17% del contenido de uranio solamente se asocia con la magnetita y el 24% son asociaciones de magnetita-calcopirita-uraninita. Dado que el concentrado de relimpieza abierto tiene una baja cantidad de materiales medios (middlings), todas las asociaciones de uraninita-magnetita disminuyen a 19%. La Figura y la Figura presentan la distribución de uraninita en los concentrados de relimpieza (re-cleaner).

Además de la identificación relevante de las asociaciones de uranio, la microscopía electrónica de barrido permite estimar los tamaños de las partículas liberadas de los óxidos de uranio como así también las asociaciones de uranio. El tamaño medio de la partícula de la uraninita liberada es de aproximadamente 6.6  $\mu\text{m}$ , mientras el tamaño de la partícula de las asociaciones uraninita-sulfuro es inferior a 3.5  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, la uraninita se produce también en asociaciones de partículas muy finas, bajo un tamaño de partícula óptima para la flotación, que está en el rango entre 10 y 100  $\mu\text{m}$  de diámetro.

La Figura muestra la distribución del óxido de uranio en un concentrado depuración-limpieza de un circuito de limpieza abierto (pasada 3). De acuerdo con la Figura 6, el índice de liberación del uranio es 56%, mientras el uranio asociado con sulfuros representa el 18%. El tamaño de las partículas de óxidos de uranio es también muy fino (<35  $\mu\text{m}$ ). Esto mejora el arrastre nocivo hacia el lecho de espuma.

### Separación magnética de la muestra I

A fin de reducir el contenido de uranio en el concentrado de cobre, los productos de flotación de la muestra I fueron sometidos a separación magnética y flotación.

La separación magnética fue realizada en un separador magnético de alta intensidad en medio húmedo (WHIMS).

En base a las características del mineral, como ser el tamaño de la partícula, la gravedad específica y las asociaciones mineralógicas, se seleccionaron la separación magnética y la concentración de gravedad para purificar el concentrado.

La Tabla 5 muestra los resultados de la separación magnética, que fue realizado en un pH = 4.0 y un pH = 8.5 (pH natural del lodo), usando el concentrado de relimpieza de la pasada 2.

5 Tabla 5 – Grados de cobre y uranio en la separación magnética del concentrado de flotación relimpieza (pasada 2)

Producto	pH			
	4.0		8.5 (natural)	
	Cu (%)	U (ppm)	Cu (%)	U (ppm)
No magnético 15000 G	33.10	135	33.03	84
Magnético 15000 G	26.91	101	26.67	384
Magnético 2000 G	17.90	270	18.85	329
Alimentación	29.50	158	29.61	158

10 En los pH=4.0 y pH=8.5, las recuperaciones de cobre no magnéticas fueron de 78.9 y 80% respectivamente, mientras la distribución del uranio fue de 60.1% en pH 4.0 y 38.2% en pH=8.5. Por lo tanto, la separación magnética pudo eliminar aproximadamente 60% de la uraninita del concentrado de relimpieza de la pasada 2. Además, el grado de cobre se elevó de 29.5% a 33.10% en el producto no magnético. La recuperación del cobre, sin embargo, pudo ser optimizada mediante la regulación del agua de enjuague.

15 Por otra parte, el contenido de cobre en las colas magnéticas fue muy alto, aproximadamente el 20%. A pesar del alto contenido de uranio (>200 ppm), la cola magnética de cobre pudo ser recuperada por flotación, después de la re-trituración a P<sub>80</sub> o 10 µm. La simulación por software indicada La simulación por software indicó que la recuperación total de cobre aumentaría aproximadamente en 3%.

20 **2. Segunda campaña de planta (muestra II)**

En esta campaña se usó una muestra de mineral con composición litológica de brechas magnetíticas (50%) y brechas cloríticas (50%). La muestra II está compuesta por un alto contenido de uranio.

25 El análisis químico de la muestra II, que contiene 6 ton de mineral de mineral de extracción para muestras, se presenta en la Tabla 6, a continuación.

Primeramente, la muestra II fue sometida a las siguientes etapas de conminución:

- 30
- i. Perforación para muestras con trituración a un tamaño de partícula inferior a 12.5 mm.
  - ii. Homogenización.
  - iii. Trituración a un tamaño de partícula inferior a 3.5 mm.

Tabla 6 – Análisis químico de la muestra II

Elemento	Análisis
Cu (%)	2.35
Au (g/t)	1.55
S (%)	2.42
Fe (%)	30.8
U (ppm)	150
F (ppm)	3827
Al (%)	3.55
Si (%)	13.7

El circuito de trituración operó con carga de bolas de acero del 40%. El derrame del clasificador de espiral fue destinado a la alimentación de la flotación de recuperación, mientras el sub-derrame fue enviado a la carga circulante de trituración. La alimentación de la flotación de recuperación (rougher) presentó  $P_{80}$  de 210  $\mu\text{m}$ . Se efectuó la clasificación en circuito cerrado compuesto por molino de bolas (carga del 40%) y un clasificador en espiral. La flotación rougher fue realizada en celdas mecánicas con capacidad de 40 litros. Las condiciones operativas se resumen en la Tabla 7, a continuación.

5

Tabla 7 – Condiciones de flotación de recuperación (rougher)

Parámetro	Valor
Alimentación (kg/h)	200
Alimentación de concentración de sólidos (%)	37
Alimentación gravedad específica ( $\text{t}/\text{m}^3$ )	1.36
PH de Flotación (natural)	8.5
Número de celdas	4
Tiempo de residencia de flotación (min)	18.1

La Tabla 8 muestra las funciones, los puntos de dosificación y la dosificación de los reactivos de flotación.

10

Tabla 8 - Dosificación y función de los reactivos de flotación

Nombre	Función	Dosificación local	Dosificación (g/t)
Ditio+monotiofosfato mixer	Colector	Celdas (rougher) Recuperación	15
Amilxantato	Colector	Molino de bolas	15
		Celdas de recuperación	12.5
		Depuración-limpieza (scavenger-cleaner)	5
Metil isobutil carbinol		Recuperación	12.5
		Celda de depuración-limpieza	5
Polipropileno glicol		Celdas de recuperación	12.5

Dado que la calcopirita no fue liberada a  $P_{80}$  de 212  $\mu\text{m}$ , el concentrado de limpieza fue sometido a un paso de re-trituración a  $P_{80}$  de 20 y 30  $\mu\text{m}$ . Después de la re-trituración, el concentrado de limpieza fue enviado a un circuito de limpieza, que incluyó los siguientes pasos:

15

- i. Re-trituración en un molino vertical con 42% de carga (bolas de acero inoxidable), a fin de reducir el concentrado rougher a  $P_{80}$  20 y 30  $\mu\text{m}$ .
- ii. Paso de flotación cleaner del producto obtenido en el paso i. en una columna de flotación (4.7m x 0.1 m). El concentrado cleaner fue enviado a una etapa re-cleaner (relimpieza) y las colas siguieron a una depuración-limpieza.
- iii. Flotación relimpieza (re-cleaner) del producto obtenido al final del paso ii., realizado en una columna de flotación (2.0m x 0.1m). Las colas regresaron a la alimentación de limpieza.
- iv. El paso de depuración-limpieza fue realizado en columna (2.0 m x 0.1 m), a fin de mejorar la selectividad de su concentrado.

20

25

El concentrado de depuración-limpieza fue reenviado al paso de limpieza ii y las colas de depuración-limpieza, junto con las colas de limpieza formaron las colas finales.

30

Esta configuración del circuito de limpieza (cleaner) permitió realizar tres pasadas en circuito abierto, sin reciclar el concentrado de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) y la cola de relimpieza, a fin de evaluar comportamientos dañinos de cada producto de flotación, sin influencias medias en el concentrado final. Además de estas pasadas de circuito abierto, la planta realizó seis pasadas en circuito cerrado, con el fin de estimar el rendimiento de la flotación y la acumulación perjudicial.

35

Asimismo, se realizó la re-trituración del concentrado de limpieza a partir de una prueba de circuito abierto en 20  $\mu\text{m}$ .

**Respuesta de flotación de la muestra II**

5 La muestra II de alto contenido de uranio fue flotada en dos configuraciones de limpieza, en circuito abierto y circuito cerrado. Es importante destacar que la depuración-limpieza (scavenger- cleaner) se realizó en una columna de flotación debido a la necesidad de mejorar la selectividad.

10 La Figura muestra los resultados medios de las pasadas 1 y 2, que se realizaron en un circuito de limpieza abierto.

15 El concentrado re-cleaner obtenido de estas pasadas logró una altísima selectividad, dado que los grados de cobre y uranio grade fueron 33.52% y 69 ppm respectivamente. Este hecho indicó el aumento de la presencia de calcopirita en la relimpieza (>95%), dado que el sulfuro es la fuente principal del cobre. Por lo tanto, la presencia de baja ganga en el concentrado de relimpieza (<5%) permite una reducción del contenido de uranio a valores por debajo de los 75 ppm.

20 Con respecto a la flotación de depuración-limpieza, que se realizó en una columna, los resultados indicaron el aumento de la selectividad (el grado de cobre fue de 30.2%). Por otra parte, el grado de uranio fue aun alto (220 ppm), lo que podría elevar la acumulación de este elemento perjudicial en el circuito de limpieza.

25 Otra importante observación es que no se halló diferencia entre el P<sub>80</sub> obtenido en la re-trituración de recuperación (rougher). La Tabla 9 – Calidad de los concentrados de relimpieza en diferentes P80 compara los resultados.

Tabla 9 - Calidad de los concentrados de relimpieza en diferentes P<sub>80</sub>

Concentrado de limpieza P <sub>80</sub> (µm)	Cu (%)	U (ppm)	F (ppm)
20	33.31	67	211
30	33.52	69	229

Además de las pasadas en un circuito de limpieza abierto, la planta efectuó seis ensayos de flotación en un circuito de limpieza cerrado, a fin de evaluar la influencia de la carga circulante de limpieza (el concentrado de depuración-limpieza y la cola de relimpieza) en el concentrado de flotación obtenido de la muestra II.

30 Tabla 10 – Desempeño de flotación en el circuito de limpieza cerrado obtenido de la muestra II.

Pasadas	Calidad del concentrado		Calidad del concentrado
	Cu (%)	U (ppm)	
A	31.74	110	87.4
B	28.24	149	72.3
C (*)	29.5	88.5	16.5
D	30.1	128.1	77.1
E	30.4	112.7	71.1
F	31.1	136.9	71.9
G (*)	29.9	118.5	62.9
H (*)	29.9	89.8	45.5

(\*) Debido a problemas operativos con las bombas de alimentación de las columnas de limpieza y relimpieza, las pasadas C, G y H fueron excluidas de las evaluaciones.

En base a la Tabla 10 y a la Figura 8, es posible observar lo siguiente:

- 35 i. El grado máximo de cobre en los concentrados de relimpieza (re-cleaner) fue de 31.7%, con el contenido de uranio de 110 ppm. Este hecho evidencia la acumulación del uranio en la carga circulante de limpieza.
- ii. La recuperación de limpieza fue baja, -38.6%, debido a un alto enriquecimiento de cobre en esta

columna. Por otra parte, la relimpieza obtuvo altos valores de recuperación (>95%), probablemente debido a una buena liberación de calcopirita en esta etapa.

iii. A pesar de la mayor selectividad de cobre en el circuito de limpieza, el contenido de uranio continuó aumentando (>100 ppm). Esto indicó la presencia de asociaciones de calcopirita-uraninita o acumulación de finos de uraninita en el concentrado de flotación.

iv. La flotación de depuración-limpieza en columna presentó baja recuperación debido al alto contenido de cobre en su cola, 3.1%. Probablemente, hubo bajos índices de colisión debido al tamaño pequeño de las partículas ( $P_{80}$ -30  $\mu$ m).

### 10 Separación magnética de la muestra II

A fin de reducir el contenido de uranio en el concentrado de cobre, los productos de flotación obtenidos de la muestra II fueron sometidos a ensayos de procesamiento, tales como la concentración de la separación magnética. Los ensayos de separación magnética se efectuaron con un separador magnético de alta intensidad por humedad (WHIMS). En este proceso se evaluó el comportamiento de la relimpieza y los concentrados de la depuración-limpieza.

Las Figuras 9 y 10 presentan los resultados de la separación magnética en un circuito cerrado del concentrado de flotación de relimpieza (re-cleaner) obtenido de la muestra II. El ensayo de separación magnética mostró un grado de cobre de 28.3% en la alimentación.

La separación magnética permitió una reducción de 46 ppm en el grado de uranio del producto no magnético. El grado de cobre se elevó a 31.4% en este producto y la recuperación del cobre fue de 89.9%.

El concentrado de flotación depuración-limpieza (scavenger-cleaner) obtenido de la muestra II en un circuito de limpieza cerrado fue también sometido a separación magnética a fin de reducir el contenido de uranio en la carga circulante de limpieza. La Figura 11 muestra el comportamiento del grado de cobre y uranio en el ensayo.

A pesar del hecho de que la separación magnética del concentrado de flotación depuración-limpieza dio por resultado una selectividad entre la calcopirita y la uraninita (Índice de selectividad de Gaudin - 1.3), el contenido de uranio en el producto no magnético se elevó a > 180 ppm. Esto indica que la uraninita siguió acumulándose en el circuito de flotación de limpieza.

### 35 3. Tercera campaña de planta (Muestra III)

En esta campaña, se usó una muestra típica de mineral que incluyó la composición litológica de brechas magnéticas (24%), brechas cloríticas (64%) y dilución intrínseca (12%), componiendo la muestra III, con bajo contenido de uranio. Esta muestra incluyó 5 ton. de perforación de muestras de mineral y los resultados del análisis químico realizado se muestran en la Tabla 11.

40 Tabla 11 – Resultados de los análisis químicos de la muestra III

Elemento	Análisis
Cu (%)	1.5
S (%)	1.4
Fe (%)	21.8
U (ppm)	74
F (ppm)	2168
Al (%)	4.4
K (%)	0.5
Si (%)	18.3

Primeramente, la muestra III fue sometida a las siguientes etapas de conminución:

- i. Clasificación de las muestras de perforación en tambores, de acuerdo con la litología y el grado de cobre (alto, medio y bajo).
- ii. Trituración a un tamaño de partícula inferior a 3-5 mm de cada tambor de muestra.
- iii. Duplicación de los análisis químicos (Cu y U) en cada tambor de muestra.
- iv. Homogenización de las muestras trituradas y analizadas.

v. Clasificación en circuito cerrado compuesto por un molino de bolas (carga del 40%) y un clasificador en espiral.

5 El circuito de trituración realizado fue con carga del 40% de bolas de acero. El derrame del clasificador de espiral fue destinado a la alimentación de flotación de recuperación, mientras el sub-derrame fue enviado a la carga circulante de trituración. La alimentación de flotación de recuperación debía presentar  $P_{80}$  de 210  $\mu\text{m}$ , sin embargo, se obtuvo  $P_{80}$  de 150  $\mu\text{m}$ .

10 La flotación de recuperación (rougher) fue realizada en celdas mecánicas con capacidad de 40 litros. Las condiciones operativas se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12 – Condiciones de flotación de recuperación (rougher)

Parámetro	Valor
Alimentación (kg/h)	200
Concentración de sólidos Alimentación (%)	38
Gravedad específica Alimentación ( $\text{t/m}^3$ )	1.36
PH de Flotación (natural)	8.5
Número de celdas	3
Tiempo de residencia de flotación (min)	18.5

15 Los colectores y los espumantes del desarrollo de ingeniería de la fase I se usaron nuevamente en la planta. Con el fin de evitar la caída en la eficiencia de los reactivos, debido a la dilución de los lodos y el arrastre en la espuma, el colector y los espumantes fueron distribuidos en diferentes puntos de la etapa de recuperación (rougher). La Tabla 13 muestra las funciones, los puntos de dosificación y la dosificación de los reactivos de flotación.

20 Tabla 13 - Dosificación y función de los reactivos de flotación

Nombre	Función	Dosificación local	Dosificación (g/t)
Mezcla de ditio+monotiofosfato	Colector	Celdas de Recuperación	20
		Molino de bolas	20
		Celdas de Recuperación	10
Amilxantato	Colector	Depuración-limpieza	10
Metil isobutil carbinol	Espumante	Recuperación	10
		Depuración-limpieza	5
Polipropileno glicol	Espumante	Celdas de recuperación	12.5

Seguidamente, se redujo el concentrado de recuperación (rougher) a  $P_{80}$  de 25  $\mu\text{m}$ . Este paso de re-trituración fue realizado en un molino vertical. Luego, el concentrado de limpieza fue sometido a un circuito cleaner de flotación, que consistía en las siguientes etapas:

- 25
- i. Re-trituración en un molino vertical con 42% de carga (bolas de acero inoxidable) a fin de reducir el concentrado de recuperación (rougher) a  $P_{80}$  25 $\mu\text{m}$ .
  - ii. El paso de flotación de limpieza (cleaner) del producto obtenido en el paso i. en una columna de flotación (2.0m x 0.1 m). El concentrado cleaner fue enviado a la etapa de relimpieza (re-cleaner) y la cola continuó a la etapa de depuración-limpieza (scavenger-cleaner).
  - 30 iii. La flotación relimpieza (re-cleaner) del producto obtenido al final del paso ii. Fue realizado en una columna de flotación(2.0m x 0.1m). Las colas regresaron a la alimentación de limpieza.
  - iv. El paso de depuración-limpieza fue realizado en tres celdas mecánicas (con capacidad de 10 L) a las que se las alimentó con las colas de cleaner del paso ii.

35

La depuración-limpieza fue realizada en tres celdas mecánicas (con capacidad de 10 L) y fue alimentada con las colas de cleaner. El concentrado de depuración-limpieza fue reenviado a la etapa de limpieza (cleaner) y las colas de la depuración-limpieza junto con las colas de recuperación (rougher) conformaron las colas finales.

5 La planta operó en un circuito cerrado, este ensayo fue realizado para calcular el desempeño de flotación y la calidad del concentrado. Además del ensayo realizado en la planta, la muestra III también fue sometida a una prueba de ciclo cerrado (*locked cycle test* (LCT)) y a un ensayo de cleaner abierto, en donde dichos ensayos siguieron los mismos procedimientos de preparación de la campaña de la tercera planta, excepto por la re-trituración del concentrado rougher, 20 µm P<sub>80</sub>.

10

**Flotación LCT y respuestas magnéticas de la muestra III**

Primeramente, esta muestra fue sometida a un ensayo de flotación de limpieza abierta y a un ensayo de ciclo cerrado LCT (*locked cycle test*). La Tabla 14 presenta los resultados de estos ensayos, en los que la etapa de re-triturado del concentrado de limpieza fue realizada aproximadamente a 20 µm P<sub>80</sub>.

15

Tabla 14 – Resultados de los ensayos de concentración

Ensayos CDM	Elemento	Flotación de relimpieza		Concentrado no magnético	
		Cleaner abierto	LCT	Cleaner abierto	LCT
Calidad	Cu (%)	30.4	30.8	32.44	33.8
	U (ppm)	123.4	138	71.4	11
Distribución	Masa	4.5	4.4	3.7	3.7
	Cu	88.4	92.0	80.9	84.9
	U	7.5	8.2	3.5	4.5

20 El concentrado de flotación obtenido en el ensayo LCT mostró contenidos de cobre y uranio de 30.8% y 138 ppm respectivamente, y recuperación del cobre de alrededor de 92%. Estos resultados ratifican los estudios anteriores realizados respecto del mineral típico, como ser estudios de variabilidad y ensayos de planta (campañas I y II).

25 Además, el concentrado de flotación fue sometido a separación magnética de alta intensidad, que produjo un análisis de concentrado no magnético de 33.8% de cobre y 91 ppm de uranio con una recuperación global de cobre del 84.9%. Como se observó en las campañas de planta I y II, estos resultados también indican que la separación magnética es capaz de reducir el contenido de uranio en el concentrado a valores más pequeños que 100 ppm.

30 Se efectuó un análisis de partículas minerales mediante microscopía electrónica de barrido de los productos de la separación magnética para determinar el comportamiento del uranio y las características de fragmentación. Los minerales con contenido de uranio son óxidos U-Pb con 61% U y 15% Pb. En el concentrado no magnético, los óxidos U-Pb están predominantemente asociados a granos de minerales de calcopirita ± ganga. Además, se observó que las asociaciones de uraninita-calcopirita tienden a tener un tamaño promedio de grano más fino (<10 µm). A su vez, los productos magnéticos también demostraron altas cantidades de asociaciones de uraninita-calcopirita finas.

35

Estos hechos pueden ser observados en la Tabla 15 y en la Figura 12.

40

Tabla 15 - Asociaciones de uraninita en los productos de la separación magnética

Producto no magnético			
Asociaciones de uraninita	Conteo de partículas	Tamaño de partícula más grueso (µm)	
		Promedio	Desviación
Calcopirita ±ganga	56	2.51	1.28
Partículas liberadas	11	6.02	4.60

continua

17.000 producto magnético de Gauss			
Asociaciones de uraninita	Conteo de partículas	Tamaño de partícula más grueso ( $\mu\text{m}$ )	
		Promedio	Desviación
Calcopirita $\pm$ ganga	78	3.86	3.52
Galena $\pm$ ganga	6	5.26	2.72
Ganga	26	3.76	2.33
Partículas liberadas	11	16.39	8.77
2.000 producto magnético de Gauss			
Asociaciones de uraninita	Conteo de partículas	Tamaño de partícula más grueso ( $\mu\text{m}$ )	
		Promedio	Desviación
Calcopirita $\pm$ ganga	125	2.68	1.68
Pirita $\pm$ ganga	2	8.80	2.83
Ganga	105	2.71	1.39
Partículas liberadas	2	6.82	1.81

5 A pesar de tener un contenido de uranio más alto (>400 ppm) y de asociaciones de calcopirita-uraninita más finas, los productos magnéticos tienden a presentar contenidos de cobre elevados (>16%), lo que también se observó en las campañas de planta I y II. Este hecho indica un posible mejoramiento de la recuperación metalúrgica a través de una re-trituración más fina de este producto.

10 Otro hito fue un incremento de la concentración de uranio en el concentrado de relimpieza, cuando hay pulpa de recirculación, como el concentrado de depuración-limpieza y la cola de relimpiezas. Dado que los materiales medios (middlings) del circuito de flotación presentan elevadas cantidades de asociaciones de calcopirita-uraninita, estas partículas no liberadas pueden ser recogidas por burbujas y reconducidas a la capa de espuma.

### Planta de Flotación y espuestas magnéticas de la muestra III

15 Se realizó en la planta un segundo paso de ensayos metalúrgicos usando la muestra III. Se realizaron ensayos de flotación en circuito cerrado y los resultados se muestran en la Figura 14.

En base a estos resultados de la tercera campaña de planta, es posible observar lo siguiente:

- 20 i. En esta campaña de planta, el grado de cobre del concentrado de flotación y la recuperación fueron del 31.5% y 91.4% respectivamente, mientras el contenido de uranio en este producto fue de 124 ppm. Si bien el mineral típico presenta una buena respuesta de flotación, el contenido de uranio permanece alto en el concentrado de relimpieza (re-cleaner), lo que indica una liberación débil de la uraninita.
- 25 ii. Las colas finales mostraron un leve alto contenido de cobre (0.22% Cu) debido a la fracción magnética aun presente en el elevado contenido de cobre (17.3% Cu). Este hecho puede permitir una mejora en la recuperación del metal.
- iii. La flotación relimpieza (re-cleaner) enriqueció el concentrado de limpieza en 242%. Por esta razón, el grado de cobre aumentó de 13% a 31.5%, lo que indica que el agua de enjuague de la columna de relimpieza tiene un efecto importante en la selectividad del concentrado de flotación.
- 30 iv. El concentrado de depuración-limpieza y las colas de relimpieza mostraron contenidos de uranio de 203 ppm y 356 ppm respectivamente. Estas elevadas concentraciones de uranio confirman que la acumulación perjudicial se produce en los elementos medios (middlings) de flotación.

### Recuperación del cobre en el producto magnético (cola) de la muestra III

35 El producto magnético (cola) es re-triturado a menos de 10  $\mu\text{m}$  y la flotación puede ofrecer una manera posible de recuperación de la calcopirita obtenida del producto magnético sin el aumento de uraninita en el concentrado

de flotación. El producto magnético obtenido de la planta fue flotado a escala de banco. Primeramente, este producto fue sometido a fina re-trituración a aproximadamente 9  $\mu\text{m}$  P<sub>80</sub> en molino de bolas (carga de bolas al 50%). Las respuestas de flotación del producto magnético se presentan en las Tablas 16 y 17.

- 5 Pasada 1: P<sub>80</sub>(alimentación) = 9  $\mu\text{m}$ ; dosificación del colector (Ditio + monotiofosfato) = 20 g/t; dosificación del espumante (MIBC)=10 g/t y pH<sub>pulp</sub>=8.6 (pH natural).

Tabla 16 – Resultados de la pasada de flotación 1 con producto magnético

Producto	Calidad química		Distribución (%)		
	%Cu	U (ppm)	Masa	Cu	U
Concentrado de limpieza	33.4	90	21.2	41.5	5.8
Colas de limpieza	24.4	491	10.2	14.6	15.2
Concentrado de Recuperación	30.5	220	31.4	56.0	21.0
Colas de recuperación	11.0	380	68.6	44.0	79.0
Alimentación	17.1	330	100.0	100.0	100.0

- 10 Pasada 2: P<sub>80</sub> (alimentación) = 9  $\mu\text{m}$ ; dosificación depresora (carboxil metil celulosa-CMC) =200 g/t; dosificación del colector (Ditio + monotiofosfato) = 20 g/t; dosificación del espumante (MIBC) = 10 g/t y pH<sub>pulp</sub> = 8.6 (pH natural).

Tabla 17 – Resultados de la pasada de flotación 1 con producto magnético

Producto	Calidad química		Distribución (%)		
	%Cu	U (ppm)	Masa	Cu	U
Concentrado de Recuperación	33.0	108	3.9	7.4	1.3
Colas de recuperación	16.9	325	96.1	92.6	98.7
Alimentación	17.6	316	100.0	100.0	100.0

- 15 En base a los resultados de flotación del producto magnético, se observa que:

- 20 i. Hubo una importante disminución del contenido de uranio en el concentrado de flotación, debido a una baja afinidad química entre los ditiofosfatos y las partículas de uraninita, dado que este mineral es un óxido. Asimismo, la uraninita liberada no tendió a adherirse a las burbujas, de acuerdo con el aumento del contenido de uranio en las colas de flotación.
- 25 ii. A pesar del alto contenido de calcopirita en el concentrado de flotación (%Cu=33.4%), el contenido de uranio aun permanece aproximadamente en 90 ppm, lo que indica que se producen asociaciones de uraninita-calcopirita más finas (<5 mm).
- 30 iii. La baja recuperación del cobre ha sido atribuida a una baja en la eficiencia de colisión de las partículas finas. Por otra parte, a pesar del leve aumento de contenido de uranio, la flotación de finos de cobre pueden permitir el aumento de la recuperación metalúrgica para el proyecto.
- 35 iv. En la pasada 2, los resultados evidenciaron que la CMC produjo una fuerte depresión de la calcopirita y, por lo tanto, se redujo la recuperación del cobre.

Por lo tanto, la recuperación de la calcopirita a partir del producto magnético puede llevar a un aumento de aproximadamente 5% en la recuperación del cobre. El equilibrio metalúrgico del circuito de concentración con inclusión de la flotación del producto magnético se ilustra en la Figura 15, que considera el rendimiento de la planta de 691.3 t/h y %Cu=1.5%.

De acuerdo con los ensayos del proceso y los análisis realizados, la uraninita está principalmente asociada a la calcopirita y a la magnetita. Más aun, estas asociaciones de calcopirita-uraninita son muy pequeñas, por debajo de los 5  $\mu\text{m}$ .

40 Dado que la uraninita no tiene una buena liberación, ni siquiera con una re-trituración más fina, el uranio se considera fuertemente dependiente del contenido de cobre en el concentrado final. Por lo tanto, los altos grados de concentrado de cobre pueden reducir el uranio en el concentrado por debajo de los 94 ppm.

5 Aun cuando diferentes tamaños de trituración, 30  $\mu\text{m}$  and 20  $\mu\text{m}$   $P_{80}$ , no sean capaces de reducir el uranio en los concentrados de flotación, es posible que los 20  $\mu\text{m}$   $P_{80}$  puedan mejorar la selectividad de la separación magnética. Por otra parte, las partículas ultrafinas pueden conducir a un aumento de las partículas magnéticas en el concentrado no magnético debido al arrastre. Estos hechos indican que debe proyectarse la re-trituración a fin de obtener concentrados con  $P_{80}$  diferente, lo que dependerá en la operatividad.

10 Sin embargo, la, flotación de relimpieza (re-cleaner) fue capaz de reducir el arrastre de la uraninita en el concentrado de flotación, si bien el grado de la uraninita permanece aun muy alto (>120 ppm). Además, la separación magnética eliminó aproximadamente el 40% de uraninita del concentrado de flotación de relimpieza (re-cleaner), disminuyendo el contenido de uranio a 88 ppm en el concentrado final.

15 La flotación del producto magnético fue incluida en el circuito de flotación a fin de mejorar la recuperación de cobre y oro. Por lo tanto, en base a los estudios de estos procesos, la recuperación de cobre y oro es de aproximadamente 90.1% y 70%, respectivamente, para minerales típicos.

**REIVINDICACIONES**

- 5 1. El proceso para eliminar el uranio de concentrados de cobre con contenido de magnetita y uranio mediante separación magnética que comprende los pasos de: separación magnética, el paso de trituración y el paso de flotación de finos de los concentrados de cobre, en donde la separación magnética comprende los siguientes subpasos:
- 10 i. la separación magnética de los concentrados de cobre, mediante división de una fracción magnética (a) y una fracción no magnética (b) con una distribución de tamaño de 15-40 micrones ( $P_{80}$ ) con contenido de uranio de 20 ppm a 100 ppm; de ese modo se obtiene 75- 99.99% de un concentrado de cobre no magnético;
- 15 ii. el paso de trituración de la fracción magnética (a) logrado en la separación magnética i, a fin de producir un concentrado magnético de cobre con una distribución de tamaño de finos en el rango de 5-15 micrones ( $P_{80}$ ) con alto contenido de uranio de 100 ppm a 300 ppm;
- 20 iii. un paso de flotación de finos que de ese modo produce un concentrado de cobre con una recuperación del cobre en el rango de 0.01% a 25% (c); en este paso se obtiene un concentrado de cobre con contenido de uranio de 100 ppm a 300 ppm, y
- iv. mezclar la fracción no magnética (b) obtenida del paso i. de la separación magnética, que tiene un bajo contenido de uranio; el concentrado obtenido al final del paso iii produce un concentrado final comercializable (c) con 40 ppm a 150 ppm de uranio, y la recuperación final del cobre en el rango de 75 % a 99.99%, en donde las expresiones ppm y % se refieren a la fracción en masa.
- 25 2. El proceso para eliminar el uranio del concentrado de cobre mediante separación magnética, de acuerdo con la reivindicación 1, en donde óxidos de uranio (uraninita) se asocian con sulfuros de cobre (54%), magnetita (14%) y otros óxidos (paramagnéticos, 7%).
- 30 3. El proceso para eliminar el uranio del concentrado de cobre mediante separación magnética, de acuerdo con las reivindicaciones 1 y 2, en donde la fracción no magnética (b) del concentrado de cobre está en un rango de 20 ppm a 100 ppm de contenido de uranio.
- 35 4. El proceso para eliminar el uranio del concentrado de cobre mediante separación magnética, de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 3, en donde el concentrado final (a)+(c) tiene un contenido de uranio en un rango del 40 ppm a 150 ppm, preferiblemente por debajo de 100 ppm.
5. El proceso para eliminar el uranio del concentrado de cobre mediante separación magnética, de acuerdo con las reivindicaciones 1 a 4, en donde la distribución del tamaño es preferiblemente de aproximadamente 25 micrones ( $P_{80}$ ).

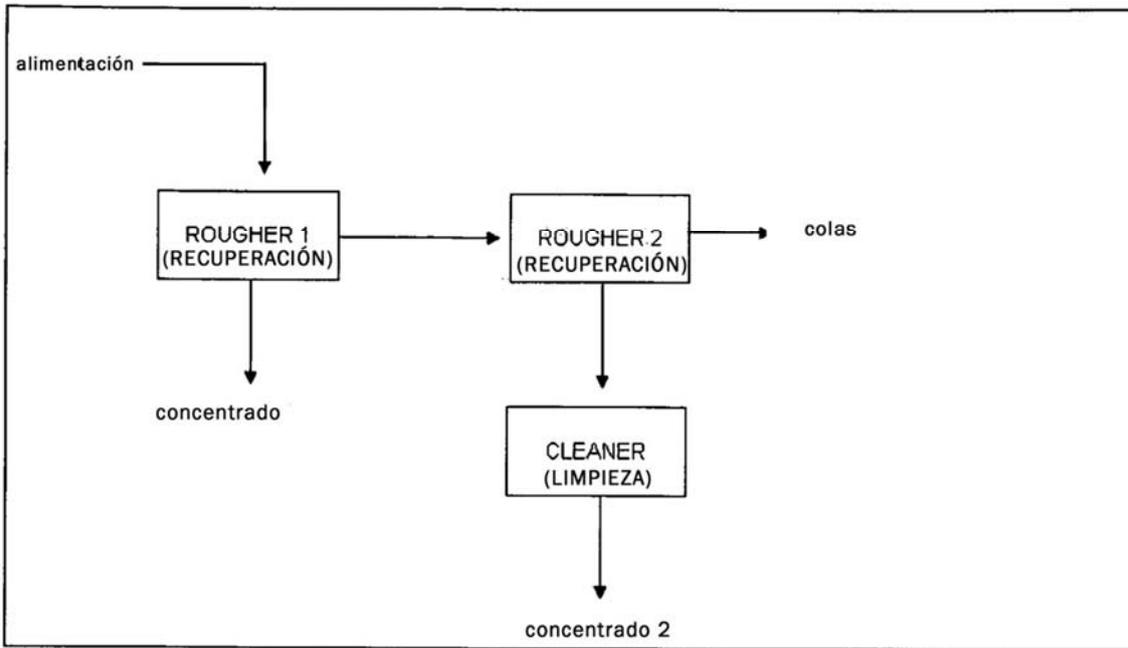


Figura 1 - Flotación de finos de la carga circulante de flotación de limpieza (cleaner).

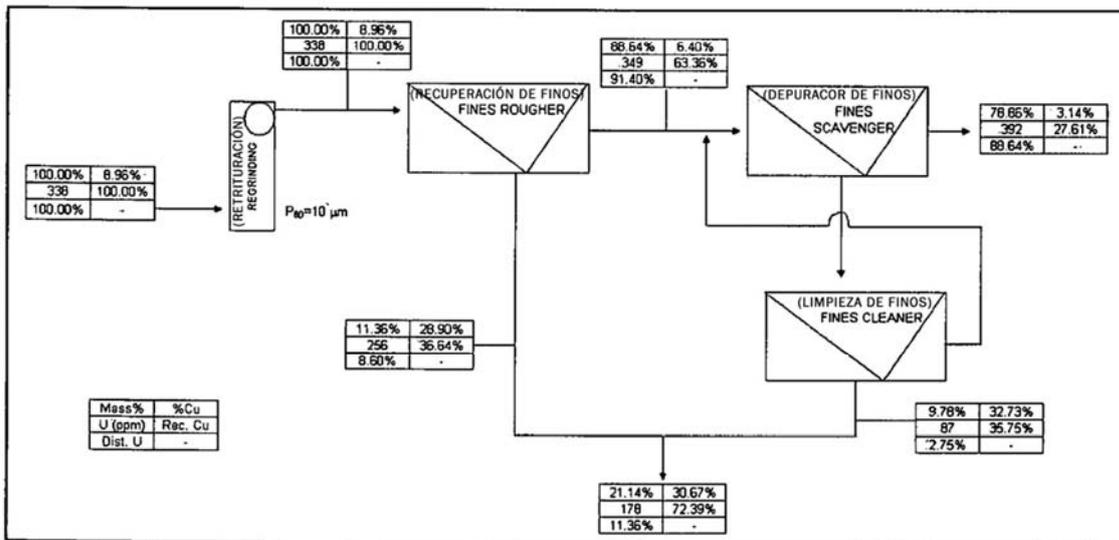


Figura 2 - Diagrama de flujo que ilustra la concentración de las cargas circulantes de la flotación de limpieza (cleaner)

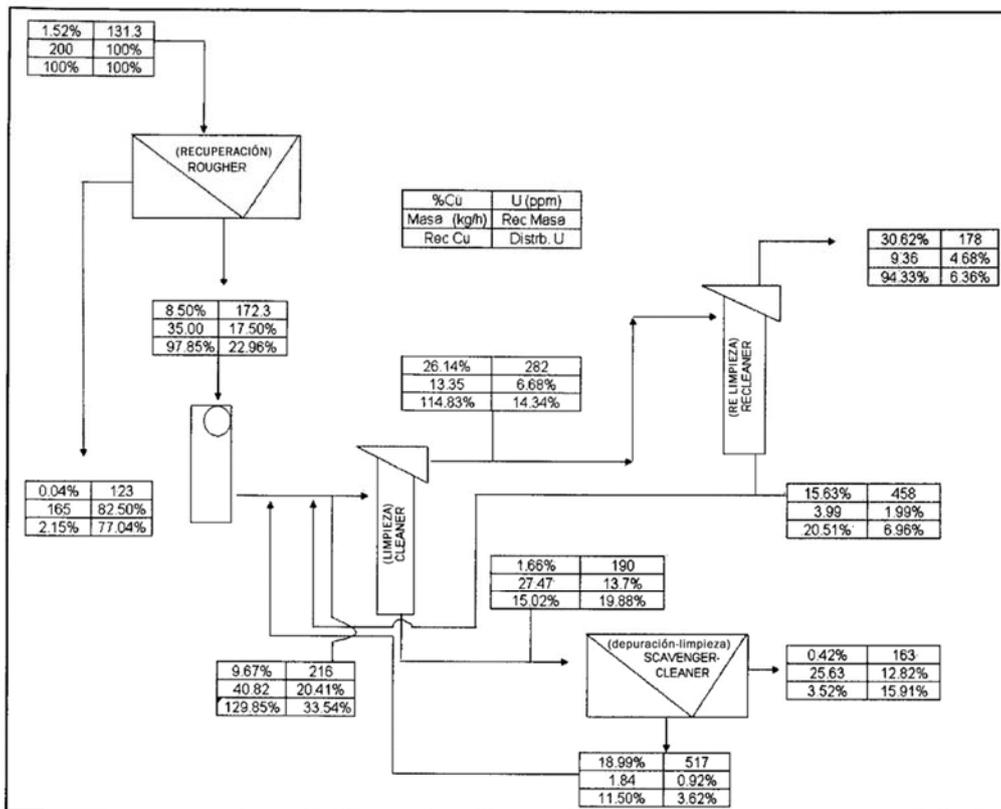


Figura 3 - Diagrama de flujo de flotación de la pasada 2

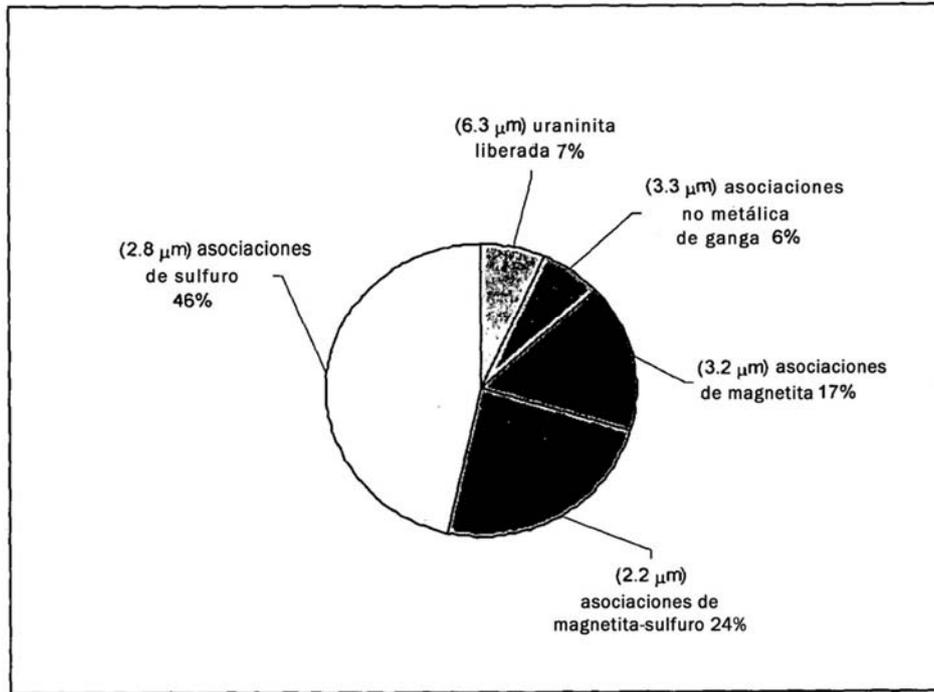


Figura 4 - Distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de relimpieza (re-cleaner) (pasada 2-circuito cerrado).

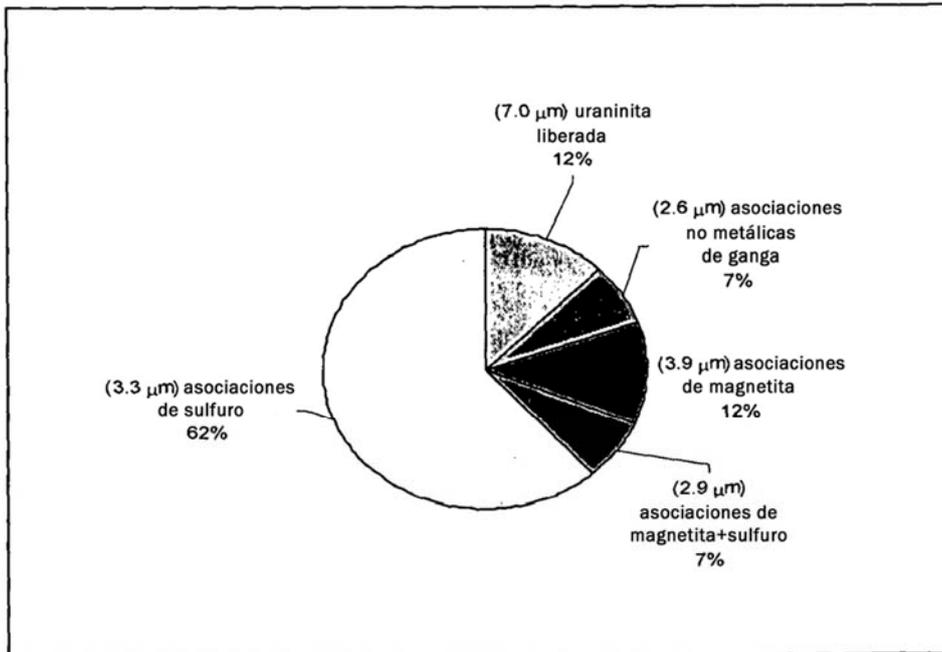


Figura 5 - Distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de relimpieza (re-cleaner) (pasada 3-circuito abierto)

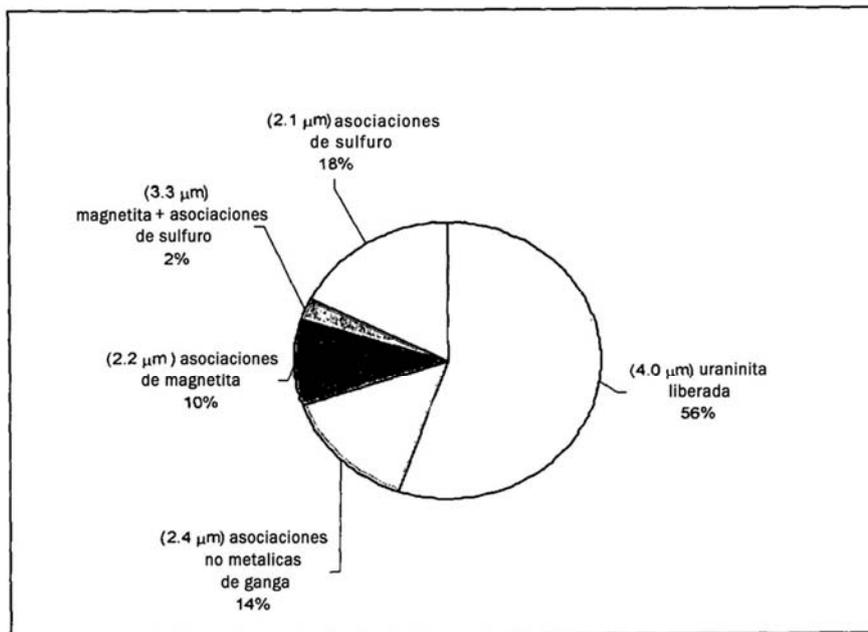


Figura 6 - Distribución de los óxidos de U-Pb en el concentrado de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) (pasada 3-circuito abierto)

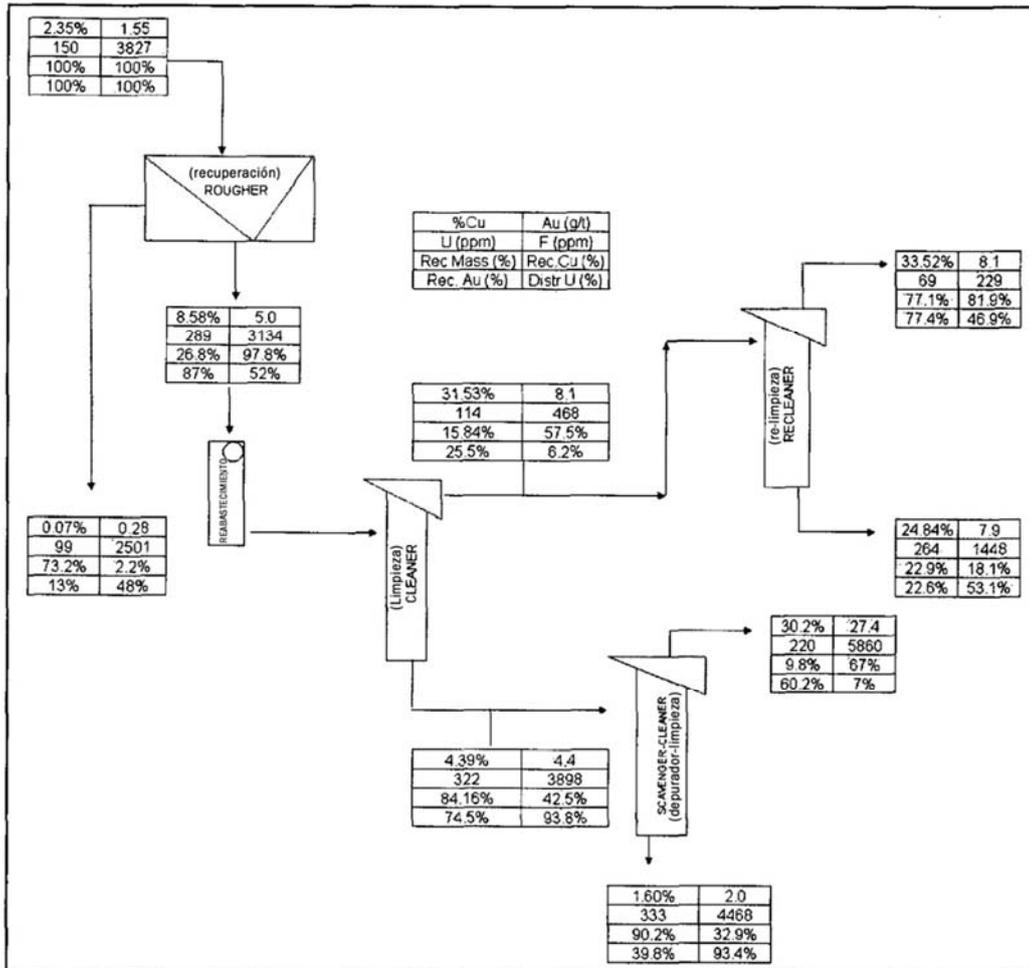


Figura 7 - Diagrama de flujo de la flotación de las pasadas 1 y 2

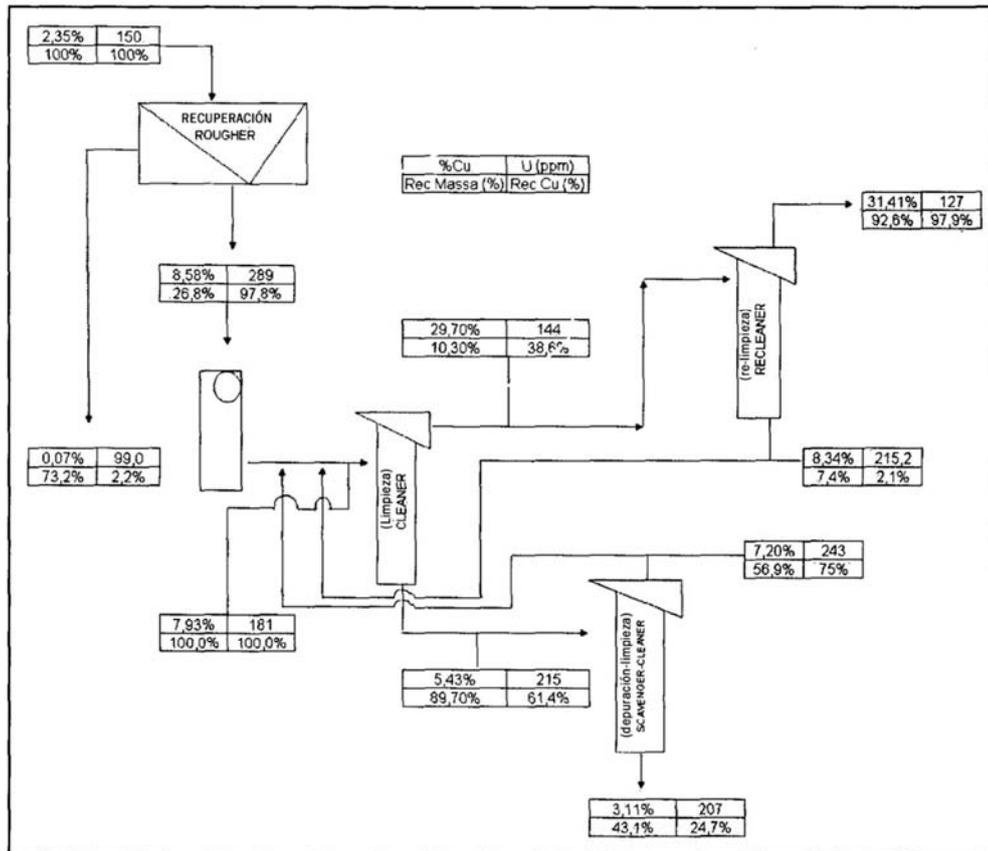


Figura 8 - Valores promedio de grado y distribución respecto del cobre y el uranio en las pasadas de flotación

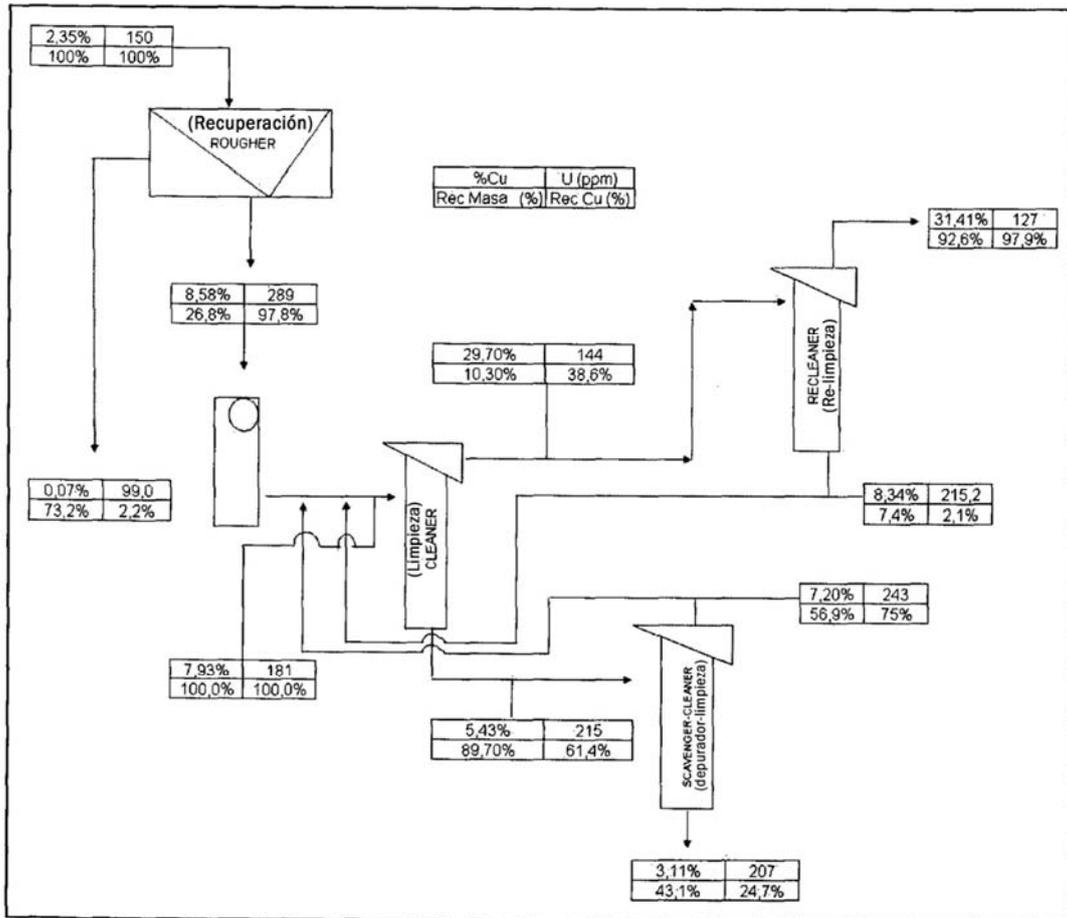


Figura 9 - Flujo de la flotación del circuito cerrado de limpieza (cleaner) a partir de la muestra II.

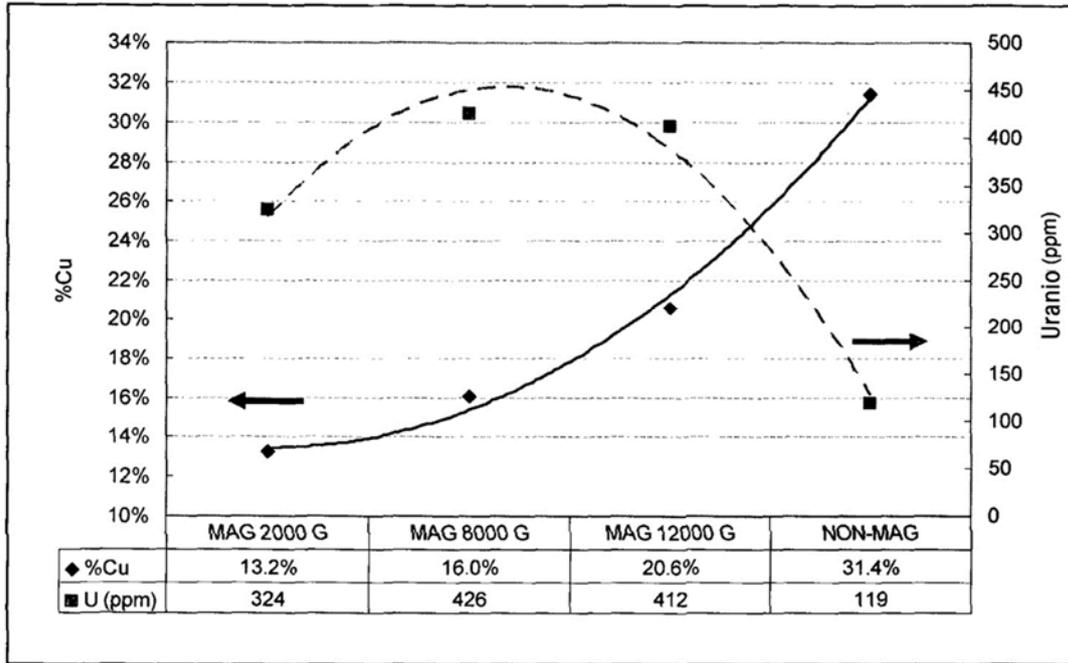


Figura10 - Grado del cobre y el uranio en la separación magnética del concentrado de flotación relimpieza (re-cleaner) (circuito de limpieza cerrado - muestra II).

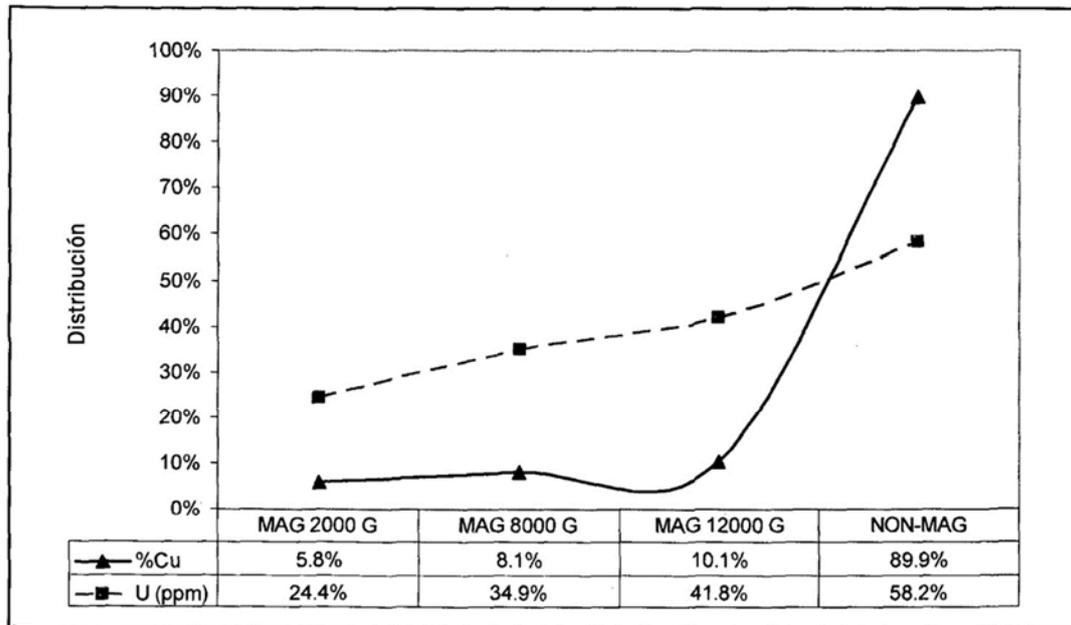


Figura 11 - Distribución de cobre y uranio en la separación magnética del concentrado de flotación relimpieza (re-cleaner) (circuito de limpieza cerrado - muestra II)

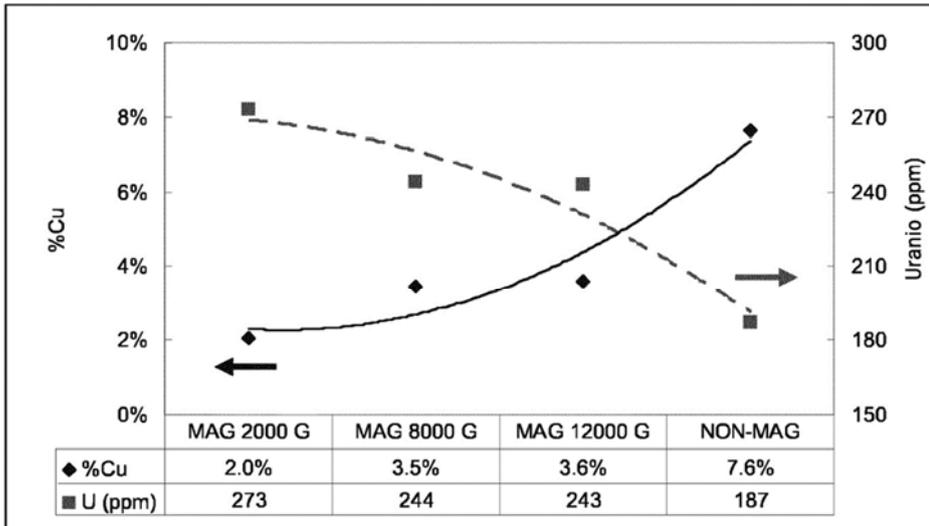


Figura 12 - Grado de cobre y uranio en la separación magnética del concentrado de flotación de depuración-limpieza (scavenger-cleaner) (circuito de limpieza cerrado)

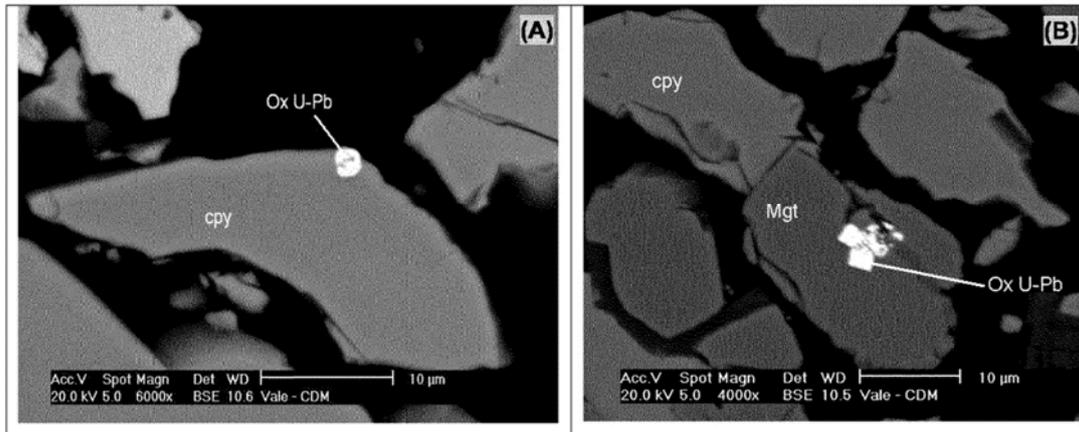


Figura 13 - Micrografía que muestra las características de las asociaciones de uraninita en los productos de separación magnética - (A) producto no magnético y (B) producto magnético.

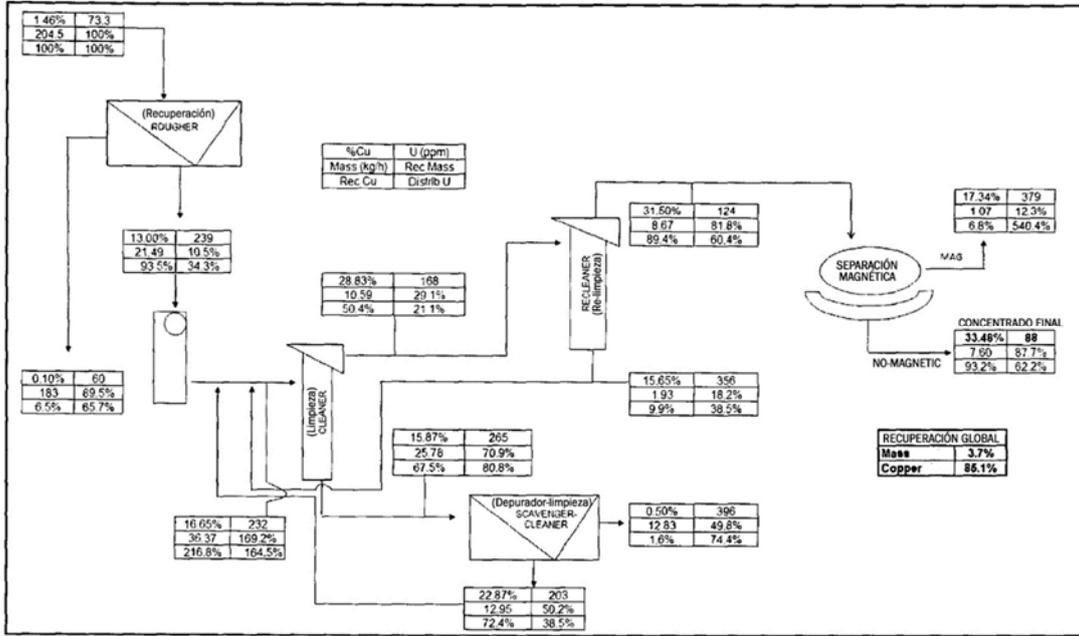


Figura 14 – Campaña de la 3º planta.

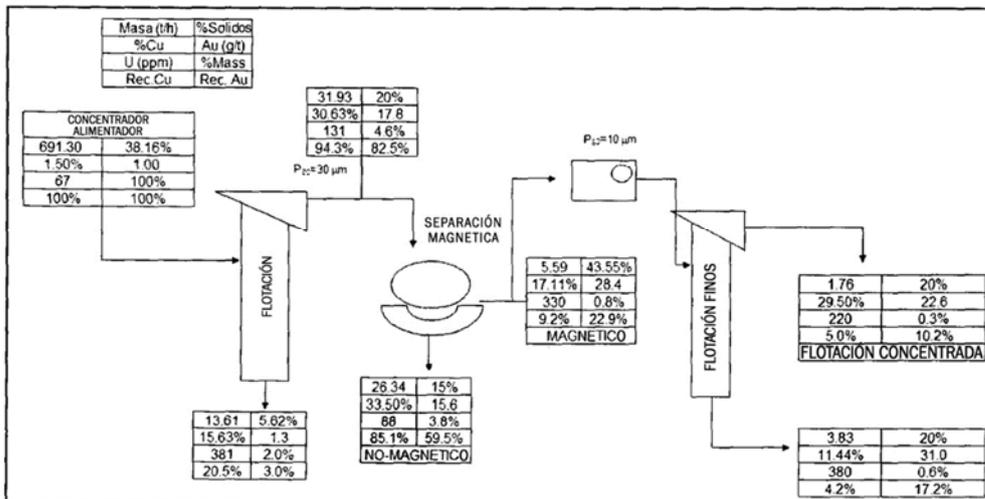


Figura 15 -Balance en masa del concentrador con flotación del producto magnético