

REVISIÓN DEL ESTUDIO DE CASO DEL ALBION PROCESS™ COMO ALTERNATIVA EFECTIVA A LA OXIDACIÓN A PRESIÓN

***Rebecca McKechnie¹, Laurie McDonnell¹, Scott Martin² y Stanko Nikolic¹**

¹ *Glencore Technology, Australia 29/180 Ann Street, Brisbane 4000*

(*Autor correspondiente: rebecca.mckechnie@glencore.com.au)

² *Glencore Technology, Canada*

RESUMEN

Al tiempo que los minerales de óxido sin tratamiento químico se han visto mermados, las operaciones están progresivamente buscando extraer y tratar depósitos de sulfuros. La oxidación a presión (POX) es típicamente la opción de procesamiento predeterminada, pero conlleva un mayor riesgo técnico de seguridad, requiere más equipo auxiliar técnicamente complejo y caro (y de este modo, más gastos de capital), y requiere operadores con más capacitación y mayor experiencia técnica en comparación con algunas soluciones alternativas. Existen alternativas menos complejas que se han probado comercialmente para el tratamiento de minerales sulfurosos. Sin embargo, muchas veces se menosprecian pensando que no son tan efectivas. El Albion Process™ es una de dichas soluciones ofrecidas por Glencore Technology, la cual combina la trituración ultrafina IsaMill™ con la lixiviación oxidativa en el reactor OxiLeach™. El diseño del tanque del reactor OxiLeach™, combinado con la inyección supersónica de oxígeno del sistema HyperSparge™, logra una alta transferencia de masa de oxígeno y una utilización del 80% del oxígeno o más, proporcionando extracciones muy altas de metal que pueden compararse con las logradas por medio de POX. Este documento describe el Albion Process™ y lo compara los resultados de estudios de caso entre pruebas con POX y Albion Process™ para muchos proyectos de metales preciosos y de baja ley con la finalidad de demostrar que el Albion Process™ es una alternativa viable a la lixiviación oxidativa.

PALABRAS CLAVE

Lixiviación oxidativa, Oxidación a presión, POX, Albion Process, Lixiviación atmosférica, Oro refractario, Minerales de sulfuros.

INTRODUCCIÓN

Al tiempo que los cuerpos de minerales «sin tratamiento químico» se han mermado progresivamente, los procesos de extracción a partir de minerales complejos se han convertido en un reto más frecuente. Desde una perspectiva de procesamiento, los minerales se clasifican en términos generales en óxidos y sulfuros. Los óxidos son el resultado típico de la erosión de minerales de sulfuro y esos minerales más cercanos a la superficie están expuestos al oxígeno y el agua. El desgaste subsecuente aumenta el contenido de metal que es soluble y susceptible para la extracción directa mediante lixiviación (típicamente, cianuro para metales preciosos y ácido sulfúrico para los metales de baja ley). De este modo, los minerales se conocen en general como minerales «sin tratamiento químico».

Por el contrario, los minerales de sulfuros, que se forman mediante procesos geológicos, se consideran refractarios, lo que significa que no son viables para una recuperación alta por medio de técnicas de lixiviación tradicionales. Los metales objetivo están mezclados con, o finamente diseminados en la matriz de sulfuro. Durante el proceso de lixiviación, el azufre elemental que forma un derivado de la reacción de lixiviación crea una capa superficial pasivante, que retrasa significativamente el grado y cinética de la lixiviación. De esta manera, los minerales de sulfuros requieren típicamente un tratamiento previo para liberar los metales de la matriz de sulfuro y hacerlos receptivos a procesos posteriores para la extracción comercial de metales objetivo.

Existen muchos medios de procesamiento comercializados para el tratamiento de concentrados y minerales de sulfuros. Las bases de estos procesos y su conveniencia para mineralogías y productos específicos se han descrito extensivamente en la literatura existente. En resumen, las opciones de procesamiento claves para el tratamiento de sulfuros incluyen:

La calcinación se ha aplicado a minerales de oro refractario y concentrados de metal de baja ley particulares. El calcinado es un método establecido que involucra una reacción gas-sólido mientras que un concentrado de sulfuros se calienta a altas temperaturas (450 to 820 °C) en presencia de aire, lo que convierte el sulfuro en un óxido y genera dióxido de azufre gaseoso (Lunt & Weeks, 2016). Los diagramas de flujo para calcinado son adecuados para bajo contenido de arsénico, predominantemente material de pirita. El arsénico es volátil, forma humos y se condensa en la corriente de descarga gaseosa. Además, se oxida, por lo que necesitaría un tratamiento hidrometalúrgico para permitir su estabilización. Los calcinadores producen una corriente gaseosa rica en dióxido de azufre susceptible de producir ácido a lo largo de la planta de ácido metalúrgico. Por lo tanto, este tipo de diagrama de flujo requiere de permisos, junto con la captura y depuración ambientales necesarias de los gases de cola de acuerdo con la jurisdicción correspondiente.

La oxidación a presión (POX), involucra la lixiviación de los minerales de metales preciosos y de baja ley o concentrados con oxígeno a altas temperaturas y presión. La oxidación a presión se puede realizar mediante sustancias alcalinas o ácidas para los metales preciosos o de baja ley, con el segundo tipo de sustancias aplicado típicamente para toda la lixiviación de minerales para la recuperación de metales preciosos. El proceso utiliza recipientes de alta presión (autoclaves), que operan típicamente con oxígeno a alta presión (350 a 700 kPa(g)), lo que permite una temperatura de operación de 180 a 230°C (Thomas y Pearson, 2016). Como resultado de estas condiciones, los tiempos de paso por la POX son notablemente más bajos (60 a 90 minutos) en comparación con alternativas atmosféricas. Al controlar la densidad de la alimentación de las autoclaves, la temperatura puede a su vez ser regulada mediante el control de las reacciones de oxidación exotérmicas. La oxidación de los sulfuros en POX a alta temperatura típicamente excede el 98%; aunque esto ofrece recuperaciones altas, también aumenta los costos asociados con la necesidad de oxígeno y neutralización del ácido. Además, el equipo especializado que se requiere para la POX, incluyendo las autoclaves en sí y el equipo auxiliar como bombas de alta presión, tanques de revaporizado, etc. contribuyen a aumentar los gastos de capital (CAPEX) y los gastos operativos (OPEX) para esta ruta de procesamiento. Se han desarrollado procesos de lixiviación a presión a temperatura baja y media, que funcionan a 80 – 140 °C y 140 – 180 °C La oxidación a presión realizada con estas temperaturas bajas requiere una trituración fina para mejorar la cinética de la lixiviación o la adición de reactivos específicos para minimizar la superficie humedecida por el azufre fundido (que retardaría la cinética de la lixiviación) (McDonald y Muir, 2007).

Oxidación Biológica (BIOX®). Diseñada principalmente para el tratamiento de minerales de oro refractario, la oxidación biológica utiliza bacterias como catalizador para oxidar los minerales de sulfuro antes de un tratamiento convencional. El proceso involucra la alimentación desde un concentrado de flotación hacia un circuito de oxidación especializado en el que los sulfuros se oxidan mediante la acción de organismos biológicos. La oxidación ocurre mediante el contacto directo de las bacterias con los minerales de sulfuros, e indirectamente por medio del ciclo de reducción oxidación de los iones férricos y ferrosos en la interfaz mineral-solución. La temperatura del proceso se controla a ~ 45 °C durante la etapa de oxidación primaria y a 65 °C durante la

oxidación secundaria. La reacción de oxidación produce una reacción exotérmica, eliminando la necesidad de calentamiento externo. El proceso funciona con un pH inferior a dos y a presión ambiental, con tiempos de paso típicos de dos a cinco días (Metso Outotec, 2023). El proceso es simple y bien comprobado, sin embargo, resiste menos las variaciones en la alimentación comparado con otras soluciones de procesamiento. Se requiere una alimentación estable y cargas muy bajas a lo largo del proceso para una operación óptima.

El **Albion Process™**, implica la lixiviación de los minerales de sulfuros con metales preciosos y de baja ley o concentrados con oxígeno a altas temperaturas y presión atmosférica. La innovación combina dos operaciones de unidad simples: la trituration ultrafina de un concentrado de flotación seguida de una lixiviación oxidativa en las unidades del reactor OxiLeach con patente de Glencore Technology. La trituration ultrafina se lleva a cabo en el IsaMill™ para lograr un objetivo ultrafino de P80 y un concentrado de tamaño compacto con entrada de energía de trituration fina baja. La trituration ultrafina permite la completa lixiviación del mineral antes de que la capa pasivada sea lo suficientemente gruesa para inhibir la lixiviación más adelante. El producto finamente triturado se lixivia en tanques agitados con la adición de oxígeno. La combinación del formato del tanque, el diseño del agitador y el uso del sistema de rociado de oxígeno Hypersparge™ maximiza la transferencia de la masa del oxígeno, permitiendo un uso del 80% del oxígeno en términos conservadores. El grado de oxidación de sulfuros se gestiona mediante el control del tiempo de permanencia en lixiviación, y la oxidación mínima requerida para extracciones altas se puede especificar, lo que reduce las necesidades de neutralización de ácido y oxígeno y disminuye los costos de operación en comparación con otras alternativas. Adicionalmente, la sencillez del proceso y el equipo auxiliar reduce ~30% la inversión de capital en comparación con la oxidación a presión. El Albion Process™ está bien establecido, con ocho plantas funcionando alrededor del mundo para el tratamiento concentrados de oro, cobre y plomo-zinc (Bartsch, Hourn, y Rohner, 2005; Hourn y Turner, 2004; Voigt, Littleford, Stieper, y Hourn, 2019; Roche, Bishop, y McKechnie, 2022; Voigt, Walker, Kloiber-Deane, y Tsvetkov, 2018).

Para tratar concentrados polimetálicos o de metales base que contienen metales preciosos y de baja ley, se adoptó la AAL (lixiviación mediante Acid Albion Process™). El proceso es controlado mediante el monitoreo de niveles de ácido libre, que se mantienen con una combinación de adición de ácido fresco, retorno de refinado usado (donde el procesamiento aguas abajo involucra la extracción de solvente y electrodeposición SX-EW), y por medio de la generación de ácido durante el ciclo de reducción-oxidación de iones ferrosos y férricos. Al completar la lixiviación oxidativa, el lodo oxidado se descarga en un circuito de «neutralización» en el que un agente neutralizador como piedra caliza o ganga consumidora de ácido en el mineral, se agrega para neutralizar el ácido y eliminar el hierro y otras impurezas, formando yeso y goethita. Si hay arsénico presente, también se lixiviará durante la etapa de lixiviación oxidativa y se precipitará junto con el hierro durante la neutralización para formar una especie de ferroarseniato adecuada para su eliminación, típicamente en forma de scorodita. El lodo entonces se somete a una separación sólido-líquido con los metales base objetivos contenidos en la PLS para su procesamiento aguas abajo, mediante SX-EW o precipitación. Los metales preciosos no se lixivian y permanecen en el residuo sólido, creando una corriente separada que pasa al procesamiento aguas abajo como carbón en lixiviación. En la Figura 1 se puede ver un diagrama de flujo genérico de la lixiviación ácida Albion (AAL).

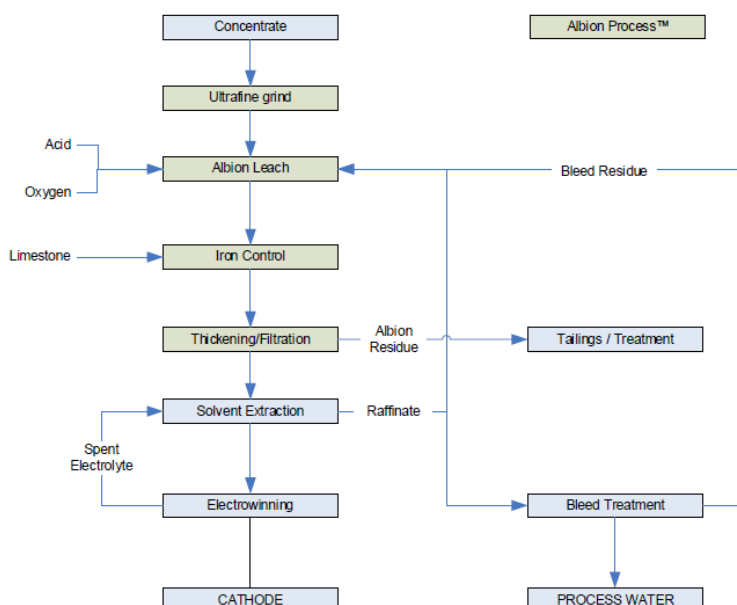


Figura 1 – Diagrama de flujo del Acid Albion Process™

Cuando se trata un concentrado de metal precioso en el que los metales están predominantemente alojados en pirita o arsenopirita, se adoptan las condiciones de lixiviación «neutra» favorables para la oxidación de pirita. En el proceso NAL (lixiviación Neutral Albion Process™) el pH se mantiene entre 5 – 5.5 mediante la dosificación de un agente neutralizador, como piedra caliza o ganga consumidora de ácido, hacia abajo del tren de lixiviación para neutralizar el ácido generado por las reacciones de oxidación. Esto genera yeso y goethita cuando el hierro lixiviado en la solución se precipita. El arsénico presente en los concentrados que contienen arsenopirita también se lixiviarán e inmediatamente se precipitarán junto con el hierro, formando una especie de ferroarseniato estable (típicamente, escorodita), adecuada para su eliminación. Los metales preciosos permanecen en el residuo sólido, liberados de la matriz de sulfuro. Tras la descarga desde el circuito de lixiviación, el lodo experimenta una separación sólido-líquido, con el flujo superior del depósito de sedimentación dirigido hacia el procesamiento de agua y el flujo inferior dirigido hacia el tratamiento aguas abajo como en la CIL. La Figura 2 ilustra un diagrama de flujo NAL genérico.

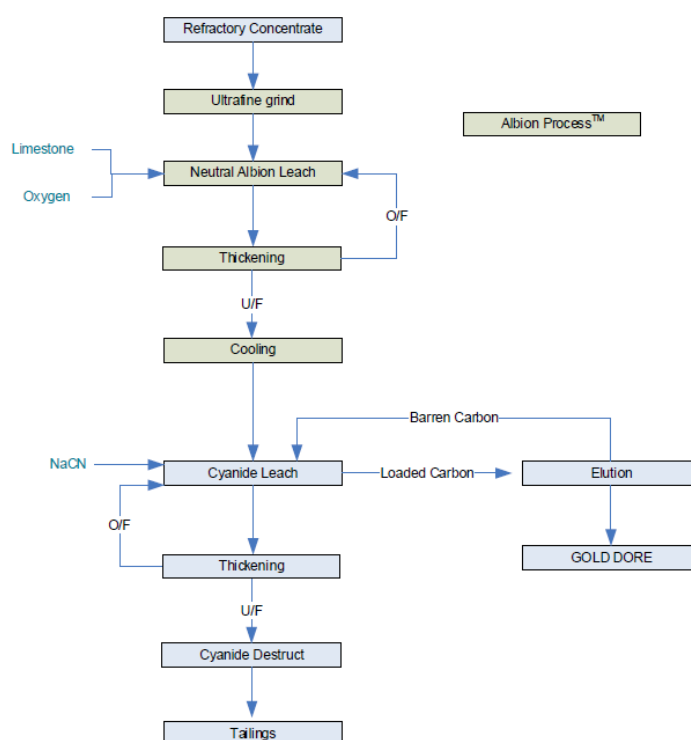


Figura 2 – Diagrama de flujo NAL (Albion Process™)

El objetivo de este documento es compartir los resultados de diversos proyectos recientes que compararon la POX y el Albion Process™ directamente mediante pruebas. Aunque esta información está disponible al público, no es de fácil acceso sin conocer realmente qué proyectos han hecho pruebas para la POX y el Albion Process™ como parte de sus investigaciones o estudios respectivos. Los siguientes estudios de caso presentan los resultados de las pruebas de Albion Process™ y POX desarrolladas con el mismo proyecto/concentrados, lo que permite comparaciones directas entre cada tecnología.

Aunque reconocemos la bien establecida naturaleza y efectividad de la BIOX, no hay información disponible en relación con pruebas de BIOX para los proyectos presentados en este documento, por lo que éste se limita solo a las comparaciones de las recuperaciones alcanzadas usando el Albion Process™ y la POX. Los autores recomiendan que el lector consulte las reseñas de tecnología establecidas completadas por otros para mayor información (Bartsch, Hourn y Rohner, 2005; Aylmore y Jaffer, 2012; McNeice, 2021).

MÉTODOS

Se llevó a cabo una revisión de la información disponible al público, en base a las bases de datos de Glencore Technology, en la que los clientes han ejecutado pruebas con POX y Albion Process™ para sus respectivos proyectos. Se buscó documentación relevante y se tomaron en cuenta resultados, condiciones de

prueba, mineralogía y especificaciones de concentrados con el fin de resumirlos como casos de estudio para esta reseña.

Para un caso de estudio, se obtuvo un estimado de alto nivel en orden de magnitud del costo de tratamiento de concentrados en una planta Albion Process™ con los volúmenes de producción especificados en sus respectivos comunicados de prensa. El costo estimado para el Albion Process™ se basó en el grado de azufre, tiempo de permanencia anticipado y oxidación de azufre objetivo, junto con la lista de equipo mecánico de alto nivel (equipo de procesamiento). Los parámetros estimados se usaron para calcular los costos del equipo en base a estándares de la industria (AACE International, 2020).

Luego se aplicó un factor a los estimados del Albion Process™, la CAPEX y OPEX para generar estimados con los que la planta de POX trataría el mismo volumen. Estos factores se obtuvieron usando precios generados previamente por Jacobs para paquetes según la AACE (Bartsch, Hourn y Rohner, 2005) y Bateman (Aylmore y Jaffer, 2012), así como datos de costos obtenidos de otros proyectos y apoyados por documentos de ingeniería.

Al obtener estos costos, las comparaciones se han limitado a las plantas de lixiviación oxidativa, asumiendo que las áreas de procesamiento aguas abajo y aguas arriba serían las mismas para el Albion Process™ y la POX.

ESTUDIOS DE CASO Y RESULTADOS

Metales base

Estudio de caso 1 – Coda Minerals, Elizabeth Creek - Emmie Bluff (concentrado de Cu, Co, Zn)

El proyecto Elizabeth Creek de Coda Mineral se ubica en el sur de Australia, 30 km al sureste de Woomera y 135 km al noroeste de Puerto Augusta. El depósito polimetálico de Co-Cu-Zn-Ag incluye el Emmie Bluff Resource que tiene los componentes indicados y estimados, proporcionando un total combinado de 560,000 toneladas de cobre y 20,000 toneladas de cobalto (Coda Minerals, Coda Minerals: Elizabeth Creek, 2023). Un concentrado del depósito Emmie Bluff se sujetó a pruebas para POX y Albion Process. Una descripción general de alto nivel de los porcentajes de concentración para los elementos claves de interés se resume en la Tabla 1.

Tabla 1 – Concentrado de la prueba en Emmie Bluff

	Unidades	Valor
Cu	%	18.0
Co	%	1.05
Ag	g/t	312.6
S	%	14.4

El concentrado muestra un porcentaje moderado de cobre de 18% y un porcentaje de cobalto de 1%, lo cual no entra en los grados típicos para un concentrado comercializable. El cobre está predominantemente alojado como bornita/calcocita o calcopirita, mientras que el cobalto se encuentra típicamente en la carrolita. El porcentaje de azufre del 14% permitiría una operación autotérmica en una operación de lixiviación a escala total (el porcentaje mínimo de azufre para la operación autotérmica es de 10% de azufre en forma de sulfuro en condiciones atmosféricas).

Las condiciones para cada prueba con Albion Process™ y POX se resumen en la Tabla 2. Estas condiciones reflejan las condiciones de prueba con susceptibilidad estándar y no sometidas a optimización de procesos.

Tabla 2 – Condiciones de prueba de lixiviación oxidativa

	Unidades	Albion	POX
Tiempo de permanencia	Horas	72	2
Densidad de la pulpa	%	10	9.5
Oxidación de azufre objetivo	%	75	~98
Tamaño del molido (P80)	Micras	10	15 ^l
pH objetivo		1.5	NS

Presión	kPa(g)	0	3018
Temperatura del proceso	°C	90 - 95	220

¹ P80 de retrituración en flotación

Los resultados de las pruebas de lixiviación oxidativa se resumen en la Tabla 3.

Tabla 3 - Resultados de la prueba de lixiviación oxidativa

	Recuperación de Cu (%)	Recuperación de Co (%)	Recuperación de Zn (%)
Albion Process™	99.6	99.4	99.8
POX	96.2	96.7	96.2

El Albion Process™ proporciona recuperaciones ligeramente mayores de cobre, cobalto y zinc, en comparación con la POX, con una extracción mayor de todos los metales de 99 % (Albion Process™) comparados con 96 a 97 % por medio de POX, evidenciando la idoneidad del proceso para el concentrado Emmie Bluff y estableciendo al Albion Process™ como una alternativa viable a la POX para este proyecto en particular (Coda Minerals, ASC Release: >99% Recoveries of Cu, Co from Emmie Bluff Concentrate Using Albion Process, 2022; Coda Minerals, ASX Release: Positive Scoping Study – Elizabeth Creek Copper-Cobalt Project, 2023).

Metales preciosos

Los siguientes proyectos se identificaron por tener resultados disponibles al público sobre pruebas con Albion Process™ y POX. Para mayor brevedad, se han proporcionado un resumen y un análisis relacionados con los resultados de cada proyecto junto con la descripción general de alto nivel de la operación. La Tabla 4 muestra un resumen de los porcentajes de concentración claves, la mineralogía (cuando esté disponible), las condiciones de la prueba con Albion Process™ y los resultados de la prueba de lixiviación oxidativa. Las condiciones de prueba de POX solo estuvieron disponibles para el proyecto Boumadine (Estudio de caso 4).

Estudio de caso 2 - Rox Resources – Youanmi: Ubicado a 480 km al noreste de Perth y 400 km al este de Geraldton en Australia Occidental, el estimado de Youanmi Resource es de 27.9 millones de toneladas con una proporción de oro promedio de 3.57 g/t, lo que produciría 3.2 millones de onzas de oro. El oro está asociado con ambos sulfuros (pirita y arsenopirita) y silicatos (Rox Resources, Youanmi Gold Project, n.d.).

Las pruebas con Albion Process™ en concentrados generados en dos zonas distintas (Upper Hanging Wall y Upper Main) y apilamientos en superficie tal como se extrajeron (acumulados ROM), La recuperación de oro después del lixiviado con Albion Process™ fue de 92 a 99%, mientras que la recuperación después de la POX fue de 98 a 99% (Rox Resources, ASX Announcement: Impressive Albion Process Results Received for Youanmi Ore, 2021; Rox Resources, ASX Announcement: Youanmi Gold Project Scoping Study, 2022).

Estudio de caso 3 - De Grey – Hemi: Ubicado a 1,300 km al norte de Perth y 85 km al sur de Puerto Hedland en Pilbara (Australia Occidental), los depósitos Mallina tienen un estimado de 251 millones de toneladas con una proporción de 1.3 g/t de oro, con 6.9 millones de onzas clasificadas. El oro está alojado predominantemente en pirita y, en menor grado en arsenopirita (De Grey Mining, n.d.).

Se llevaron a cabo pruebas con Albion Process™ y POX con los concentrados generados en tres diferentes depósitos (Brolga, Withnell y Mallina). De nuevo, después de la lixiviación oxidativa, el Albion Process™ produjo resultados que fueron comparables a la POX (94 a 98 % de recuperación de oro después de la lixiviación con Albion Process™ en comparación con el 91 a 97 % de recuperación de oro después de la POX), indicando la idoneidad del Albion Process™ para los concentrados Hemi y apoyando su efectividad como una solución de procesamiento alternativa a la POX (De Grey Mining Ltd, ASX Announcement: Further Metallurgical Testwork Confirms High Gold Recoveries at the Mallina Gold Project, 2021).

Estudio de caso 4 - Aya Gold & Silver – Boumadine: Ubicado en el oeste de Marruecos, la exploración está en curso, y el estimado de recursos se espera para 2024. El oro predominantemente está alojado en pirita y, en menor medida, en arsenopirita.

Las condiciones de las pruebas con Albion Process™ se resumen en la Tabla 4. La prueba con POX se ejecutó a 225°C durante 60 minutos, con 690 kPa (~100 psi) de oxígeno a presión y 5.5% de densidad de pulpa. La pulpa ha sido pre acidulada con ácido sulfúrico por 30 minutos con un pH de 1.5.

La recuperación del oro después del Albion Process™ está fuertemente correlacionada con las condiciones del azufre. Bajo condiciones de susceptibilidad más estándar (p80 10µm y 78 horas de tiempo de permanencia), se logró una oxidación del azufre de 75%, lo que correspondió a una recuperación de oro del 85%. Un tamaño de trituración más fino (6 µm) y un tiempo de permanencia mayor (96 horas) logró una oxidación de azufre de 96% correspondiente con una recuperación de oro del 94% (Aya Gold & Silver, 2023). La oxidación del azufre y las recuperaciones de oro subsecuentes usando condiciones más agresivas para el Albion Process™ fueron comparables con las logradas por medio de POX (99.8 % de oxidación de azufre alcanzada, correspondiendo a recuperaciones de oro del 97 al 98 %). Estos resultados resaltan la naturaleza altamente refractaria del oro y la extensiva oxidación que se requiere para la liberación del oro. La aplicación de condiciones de lixiviación más agresivas con el Albion Process™ produjo recuperaciones de oro comparables a la POX. Es necesaria una investigación posterior sobre el impacto económico en caso de que una planta adopte a escala total estas condiciones para compararla con los resultados económicos de una planca con POX.

Tabla 4 – Porcentajes de concentración del proyecto de metales preciosos, mineralogía, condiciones de prueba con Albion Process™ y resultados de la prueba de lixiviación oxidativa

		Estudio de caso 2	Estudio de caso 3	Estudio de caso 4	Estudio de caso 5
	Unidades	Rox Resources, Youanmi ¹ (Australia Occidental)	De Grey, Hemi (Australia Occidental)	Aya Gold & Silver, Boumadine (Marruecos)	Cliente anónimo (América del Norte)
Referencias		(Rox Resources, ASX Announcement: Impressive Albion Process Results Received for Youanmi Ore, 2021) (Rox Resources, ASX Announcement: Youanmi Gold Project Scoping Study, 2022)	(De Grey Mining Ltd, ASX Announcement: Further Metallurgical Testwork Confirms High Gold Recoveries at the Mallina Gold Project, 2021)	(Aya Gold & Silver, 2023)	
Grados de concentración					
Au	g/t	32 - 61	11.9	3.8	13
Ag	g/t	NA	NS	76.2	70
As	%	3.1	NS	1.7	0.3
S	%	28.0	10.6	41.4	9
Condiciones de prueba (Albion)					
Tiempo de permanencia	Horas	49 horas (acumulados ROM) 30 horas (Upper Hanging Wall) 21 horas (Upper Main)	72	78, 96*	72
Tamaño del molido (P80)	Micras	10	8	10, 6*	8
pH objetivo		5.5	5.5	5.5	5.5
Temperatura del proceso	°C	93	95	95	95
Densidad de la pulpa	%	10	10	10	10
Resultados de la prueba de lixiviación oxidativa					
Oxidación de azufre (Albion Process™)	%	75 – 78		75, 96*	90
Recuperación de oro (Albion Process™)	%	99.3 (acumulados ROM) 97.3 (Upper Hanging Wall) 92.0 (Upper Main)	98.0 (Brolga), 94.6 (Withnell) 94.4 (Mallina)	84.9 (91.3% recup de Ag), 94.4 (94.8% recup de Ag)*	85.0
Recuperación de oro (POX)	%	98.8 (acumulados ROM) 98.4 (Upper Hanging Wall) 99.0 (Upper Main)	96.9 (Brolga), 91.5 (Withnell) 97.0 (Mallina)	98.2 (96.6% recup de Ag)*	94.0

¹ Hanging Wall y Main combinados representan más del 30% de Youanmi Mineral Resource

* Segunda prueba del Albion Process™ para el proyecto Boumadine, aplicando más condiciones agresivas, incluyendo un mayor tiempo de permanencia y un tamaño de trituración más fino

Estudio de caso 5 – Proyecto anónimo: Ubicado en América del Norte con recursos estimados e indicados combinados de cerca de 40 millones de toneladas con un porcentaje de oro promedio de ~1.5 g/t. El oro se aloja principalmente en piritita. En este proyecto se han eliminado datos de identificación, pues los resultados todavía no están disponibles para el público, y con el propósito de desarrollar una descripción general financiera de alto nivel.

El Albion Process™ logró una recuperación de oro final de 85% después de una lixiviación oxidativa, en comparación con un 94% mediante POX. Como nota, este concentrado en particular contiene cantidades muy altas de cuarzo (40%), que también podría alojar un porcentaje sustancial de oro. Mientras que la POX es capaz de recuperar cierta cantidad de oro alojado en silicatos, cuando se adopta el Albion Process™, el único medio de recuperar el oro alojado en silicatos es triturar cada vez más finamente. Los resultados de esta prueba refuerzan la naturaleza altamente refractaria de los minerales, con un grado de oxidación alto (90%) requerido para lograr recuperaciones altas.

Análisis financiero de alto nivel (Estudio de caso 5)

Cuando las recuperaciones alcanzadas por un proceso no corresponden con las de otra, como la baja recuperación de oro lograda mediante el Albion Process™ en el Estudio de caso 5, se debe considerar la viabilidad económica de cada opción de procesamiento. El trabajo previo desarrollado por Jacobs y Bateman ha indicado que los CAPEX y OPEX asociados con la POX pueden ser de 30 a 40 % mayor en comparación con los de una planta con Albion Process™. Las bajas recuperaciones mostradas en el Estudio de Caso 5 se equiparan con una diferencia de 1.17 g/t de oro recuperado, lo que debería contextualizarse dentro de los diferentes datos económicos de cada solución de procesamiento. Un estimado de alto nivel para los CAPEX y OPEX asociados a una planta con Albion Process™ para el Estudio de caso 5 se generó usando los grados de concentrados y las condiciones de lixiviación del Albion Process™ especificados en la Tabla 4. Usando el trabajo independiente de Jacobs (Bartsch, Hourn y Rohner, 2005) y Bateman (Aylmore y Jaffer, 2012), se aplicaron factores de 1.35 y 1.3 al costo de una planta con Albion Process™ para estimar los CAPEX y OPEX de una planta con POX, respectivamente. Se asume que ambas plantas tratarían la misma cantidad de material. La cantidad asumida de la energía para la trituración de 150 kWh/t se funda en las bases de datos de Glencore Technology y al calcular el costo de de los ajustes a la planta POX que se hicieron para disminuir la implicación de la dureza de los minerales en los CAPEX y OPEX con POX.

Los resultados de los análisis económicos de alto nivel se muestran en la Tabla 5. A pesar de la baja recuperación de oro, los resultados económicos de una planta con Albion Process™ fueron de hecho comparables a una con POX. El menor gasto de operación y de inversión asociados con la planta de Albion Process™ resultaron en un periodo de retorno de capital ligeramente más corto. Sin embargo, el valor presente neto (NPV) de la planta con Albion Process™ fue menor en comparación con la de POX. Estas consideraciones pueden ser particularmente importantes para operaciones pequeñas cuya inversión inmediata puede ser una limitación particular.

Tabla 5 - Descripción financiera de alto nivel (Estudio de caso 5)

	Oro recuperado (g)	Ingresos totales (M USD)	Gastos de capital (M USD)	Gastos operativos (M USD/anuales)	Periodo de recuperación (Meses)	Valor actual neto (M USD)
Albion Process™	3,558,100	226.8	112.0	21.5	7	727.2
POX	3,934,840	250.8	135.5	24.7	8	818.3

Ingresos calculados usando el precio actual del oro de 63.75 USD por gramo y un volumen de producción de la planta de lixiviación de 40 tph (322,000 tpa).

Para el cálculo de OPEX, se consideró una energía de trituración estimada de 150 kWh/t, un costo de energía de \$0.12/kWh y un costo de piedra caliza de \$35/t.

CONCLUSIONES

El objetivo de este documento era proporcionar una comparación directa entre los resultados de las pruebas del Albion Process™ y la oxidación a presión. Usando datos disponibles al público, los estudios de caso mencionados evidencian que la combinación de trituración ultrafina y lixiviación oxidativa atmosférica que caracterizan al Albion Process™ son capaces de lograr resultados comparables a los de la POX.

Se lograron porcentajes altos de extracción de metales base (> 99 %) y de oro después de la lixiviación oxidativa con Albion Process™ (~ 95%) a lo largo de cada estudio de caso presentado aquí, con la excepción del

Estudio de caso 5. Por último, es probable que un porcentaje mayor al usual de cuarzo en el concentrado explique esta baja recuperación, en especial dado el alto nivel de oxidación logrado durante las pruebas del Albion Process™. En dichos casos, solo una trituración fina adicional serviría para liberar el oro encapsulado remanente. A pesar de los bajos niveles de recuperación, un análisis económico de alto nivel que comparó el Albion Process™ con la POX sugiere que la viabilidad económica de instalar una planta de Albion Process™ es comparable a un circuito con POX.

La selección de la ruta de procesamiento preferida debería considerarse según cada proyecto. Cuando sea posible, todas las opciones actuales de procesamiento deberían considerarse inicialmente, y el criterio de selección debería ir más allá de solo las recuperaciones logradas para incluir también los CAPEX y OPEX, la recuperación atribuible a cada solución de procesamiento única, el subsecuente periodo de recuperación de inversión y el NPV. El Albion Process™ permite que un proyecto reduzca el tiempo de implementación, es un proceso técnicamente simple y ofrece un desempeño metalúrgico confiable. Para muchos proyectos, esta solución puede ofrecer recuperaciones de metal comparables a las logradas por medio de la oxidación a presión. Cuando no es así, la diferencia en la recuperación debería contextualizarse mediante una investigación completa de los resultados económicos del proyecto. Los beneficios cuantificables y la simplicidad técnica asociados al Albion Process™ lo convierten en una alternativa efectiva y viable para el procesamiento de concentrados de sulfuros refractarios, garantizando su consideración en el desarrollo de diagramas de flujo para operaciones que buscan procesar minerales de sulfuros.

AGRADECIMIENTOS

Matthieu Girard, Aya Gold & Silver

REFERENCIAS

- AACE International. (2020, 08 7). Cost Estimate Classification System - As Applied in Engineering, Procurement, and Construction for the Process Industries. TCM Framework. *AACE International Recommended Practice No. 18R-97*. AACE International.
- Aya Gold & Silver. (2023, 11 9). *Aya Gold & Silver Reports Recoveries of 89% Silver and 85% Gold from Metallurgy Test Work on Boumadine*. Retrieved 12 1, 2023
- Aylmore, M., & Jaffer, A. (2012). Evaluating Process Options for Treating Some Refractory Ores. *ALTA International Gold Conference: Annual Gathering of the Global Gold Ore Processing Industry*. Perth.
- Bartsch, P., Hourn, M., & Rohner, P. (2005). Benefits of Using the Albion Process for a North Queensland project, and a Case Study of Capital and Operations Cost Benefits Versus Bacterial Oxidation and Pressure Oxidation. *Randol Gold Conference*. Perth.
- Coda Minerals. (2022). ASX Release: >99% Recoveries of Cu, Co from Emmie Bluff Concentrate Using Albion Process.
- Coda Minerals. (2023). ASX Release: Positive Scoping Study – Elizabeth Creek Copper-Cobalt Project.
- Coda Minerals. (2023). *Coda Minerals: Elizabeth Creek*. Retrieved 12 1, 2023, from <https://www.codaminerals.com/projects/>
- De Grey Mining. (n.d.). *Hemi Gold Deposit*. Retrieved 12 1, 2023, from <https://degreymining.com.au/hemi-gold-deposit/>
- De Grey Mining Ltd. (2021, 02 16). ASX Announcement: Further Metallurgical Testwork Confirms High Gold Recoveries at the Mallina Gold Project.
- De Grey Mining Ltd. (2022, 05 12). ASX Announcement: Hemi Pilot Testwork Confirms High Recoveries at Brolga.
- Hourn, M., & Turner, D. (2004). *Commercialisation of the Albion Project*. Brisbane: Glencore Technology.
- Lunt, D., & Weeks, T. (2016). Process Flowsheet Selection. In M. Adams, *Gold ore processing, project development and operations* (pp. 113 - 129). Great Britain: Elsevier Science & Technology.
- McDonald, R. G., & Muir, D. M. (2007). Pressure oxidation leaching of chalcopyrite. Part I. Comparison of high and low temperature reaction kinetics and products. *Hydrometallurgy*, 86(3-4), 191 - 205.
- McNeice, J. M. (2021). Gold Extraction from Refractory Sulfide Gold Concentrates: A Comparison of Bio-oxidation and Neutral Atmospheric Pre-treatment and Economic Implications . *Journal of Sustainable Metallurgy*, 1354 - 1367.
- Metso Outotec. (2023). BIOX Process.
- Roche, K., Bishop, F., & McKechnie, R. (2022). The Use of the Albion Process to Produce Copper Sulfate Reagent for Use in Zinc Flotation (Case Study). *Perumin*. Peru.
- Rox Resources. (2021, December 23). ASX Announcement: Impressive Albion Process Results Received for Youanmi Ore. Australia.
- Rox Resources. (2022). ASX Announcement: Youanmi Gold Project Scoping Study.

- Rox Resources. (n.d.). *Youanmi Gold Project*. (Rox Resources) Retrieved 12 1, 2023, from <https://www.roxresources.com.au/projects/youanmi-project/>
- Thomas, K. G., & Pearson, M. S. (2016). Pressure Oxidation Overview. In M. Adams, *Gold ore processing, project development and operations* (pp. 341 - 358). Great Britain: Elsevier Science & Technology.
- Voigt, P., Littleford, D., Stieper, G., & Hourn, M. (2019). First Commercialisation of the Albion Process for Copper. *ALTA*. Perth: Glencore Technology.
- Voigt, P., Walker, D., Kloiber-Deane, O., & Tsvetkov, A. (2018). Ramp-up and Long-term Performance of the Albion Process™ Plant at GeoProMining Gold Armenia. *14th AusIMM Mill Operators' Conference*, (pp. 339 - 350).