

Cómo lograr una adecuada reducción de tamaño del mineral sin recurrir a procesos mecánicos de trituración.



Mine to pad en minería aurífera: estudio de caso (1996-2008) sobre fragmentación para lixiviación sin chancado en Perú

Mine-to-Pad in Gold Mining: A Case Study (1996-2008) on Fragmentation for Run-of-Mine (ROM) Leaching in Peru

RESUMEN

En el contexto de la minería a cielo abierto en el Perú, el presente estudio expone la experiencia de una operación aurífera que, desde 1994, implementa un proceso de lixiviación sin etapas de chancado ni molienda. El presente trabajo constituye un estudio de caso en una mina específica, cuyo objetivo principal es mostrar, con validación de planta metalúrgica, cómo una fragmentación promedio cercana a 4 pulgadas puede resultar adecuada para la lixiviación en este contexto particular, dadas las características geológicas del yacimiento.

El estudio abarca el periodo 1996-2008 y evalúa diversas técnicas aplicadas para optimizar el microfracturamiento del mineral, incluyendo sistemas de iniciación no eléctrica, electrónica, cámaras de aire y el uso de emulsión gasificada. La metodología se basa en el análisis operativo y granulométrico del P80 en pilas de lixiviación, así como en indicadores de costos asociados a perforación, voladura, carguío y tratamiento en planta.

La elección de una granulometría promedio cercana a 4 pulgadas se justifica porque ofrece un equilibrio entre la permeabilidad de las pilas, la exposición superficial del mineral y el control en la generación de finos. Este tamaño permitió mejorar la recuperación metalúrgica sin incrementar excesivamente los costos de perforación y voladura, validándose como el punto óptimo en este estudio de caso.

Entre los principales hallazgos, se evidencia que una adecuada secuencia de voladura incrementa la permeabilidad de las pilas y mejora la recuperación de oro, incluso en materiales de baja ley. Además, se observa que un aumento moderado del costo de perforación y voladura reduce los costos globales de minado.

Se concluye que el enfoque *mine to pad* es técnicamente viable, económicamente rentable y ambientalmente favorable al eliminar etapas de chancado, reducir el consumo energético y mantener un circuito cerrado en planta. Este modelo representa una alternativa eficiente para operaciones con mineralizaciones complejas o de baja ley.

ABSTRACT

In the context of open-pit mining in Peru, this study presents the experience of a gold operation that, since 1994, has implemented a leaching process without crushing or grinding stages (Run-of-Mine). The present work constitutes a case study of a specific mine, with the main objective of demonstrating, through metallurgical plant validation, how an optimal fragmentation near 4 inches can prove suitable for leaching in this particular context, given the geological characteristics of the deposit.

Covering the period from 1996 to 2008, the study evaluates various techniques aimed at optimizing ore microfracturing, including non-electric and electronic initiation systems, air decking, and the use of gassed emulsions. The methodology is based on operational analysis and P80 particle size distribution in leaching heaps, along with cost indicators related to drilling, blasting, loading, and plant processing.

The choice of an average particle size close to 4 inches is justified because it provides a balance between heap permeability, mineral surface exposure, and control of fines generation. This size improved metallurgical recovery without excessively increasing drilling and blasting costs, validating it as the optimal point in this case study.



Palabras Claves

Lixiviación, fragmentación de roca, voladura controlada, *mine to pad*, minería aurífera, perforación, recuperación.

Key words

Leaching, rock fragmentation, controlled blasting, Mine-to-Pad, gold mining, drilling, recovery.

The results evidence that an adequate blasting sequence increases heap permeability and improves gold recovery, even in low-grade materials. Furthermore, it is observed that a moderate increase in drilling and blasting costs results in a reduction of overall mining costs.

It is concluded that the "Mine-to-Pad" approach is technically feasible, economically profitable, and environmentally favorable, as it eliminates crushing stages, reduces energy consumption, and maintains a closed-loop process in the plant. This model represents an efficient alternative for operations with complex or low-grade mineralizations.

INTRODUCCIÓN

En las operaciones de minería aurífera a cielo abierto, los costos asociados a las etapas de chancado y molienda representan una parte significativa del gasto total de procesamiento, especialmente en yacimientos de baja ley. Este escenario plantea la necesidad de optimizar las primeras etapas del proceso de comminución, buscando alternativas más eficientes y rentables.

En este contexto, el presente estudio aborda el problema de cómo lograr una adecuada reducción de tamaño del mineral sin recurrir a procesos mecánicos de trituración. Específicamente, se investiga la aplicación de técnicas avanzadas de voladura para obtener una fragmentación óptima que permita la lixiviación directa del mineral, eliminando las etapas de chancado.

El objetivo principal del estudio es demostrar que, mediante un diseño adecuado de voladura orientado al microfracturamiento del mineral, es posible alcanzar resultados metalúrgicos favorables, reducir el costo total de minado y aumentar la eficiencia del proceso de recuperación de oro. Este enfoque, conocido como *mine to pad*, se presenta como una alternativa viable para ciertos contextos. Cabe señalar que existen antecedentes internacionales y latinoamericanos (Chile, México, Australia) que ya han explorado la lixiviación directa sin chancado, como los estudios de Morales y Riquelme [6] en Chile, Torres y Rojas [8] en Perú y México, y Kanchibotla [2] en Australia, lo que refuerza el sustento académico de este estudio de caso, lo que da mayor rigor académico a este estudio de caso.

La voladura es la primera etapa del proceso de comminución, compitiendo con las otras etapas de este proceso: chancado y molienda, preacondicionando la roca para su posterior tratamiento de la forma más económica para el costo total de minado, siendo el objetivo la calidad de fragmentación como producto final.

FUNDAMENTOS

Diversos estudios en minería a cielo abierto han demostrado que el microfracturamiento inducido por voladura mejora significativamente la eficiencia del proceso de lixiviación al aumentar tanto la superficie específica del mineral como la permeabilidad de las pilas. Investigaciones como las de [1] y [8] han resaltado la importancia de una adecuada fragmentación para optimizar el rendimiento metalúrgico y reducir los costos globales de procesamiento.

Basado en esta evidencia, entre 1996 y 2008 se implementaron en una operación minera aurífera distintas tecnologías orientadas a perfeccionar el control de la fragmentación a través de la voladura. Estas incluyeron el uso de sistemas de iniciación no eléctrica, secuencias de disparo con retardos optimizados, incorporación de cámaras de aire en zonas de roca blanda a media, iniciación electrónica en zonas duras y el uso progresivo de emulsión gasificada.

El trabajo de investigación parte de la premisa de que una fragmentación controlada mediante voladura puede sustituir eficazmente las etapas de chancado, siempre que se logre un tamaño de partícula adecuado para la lixiviación. No obstante, se reconocen limitaciones como la variabilidad geológica del macizo rocoso, la heterogeneidad de las leyes minerales y la necesidad de adaptar constantemente los diseños de malla de perforación para lograr resultados consistentes.

En los últimos años, la optimización del proceso de fragmentación con fines de lixiviación ha cobrado relevancia dentro de la minería metálica a cielo abierto. Yancachajlla Tito evidenciaba, desde 2008 [9], la eficacia del enfoque *mine to pad* aplicado a la lixiviación de oro sin chancado, destacando la importancia del microfracturamiento del macizo rocoso para alcanzar una granulometría adecuada sin requerir etapas de molienda. Posteriormente, la continuidad de este trabajo fue reconocida internacionalmente con la aceptación de una versión actualizada en la 52.^a Annual Conference on Explosives & Blasting Technique del International Society of Explosives Engineers (ISEE), donde se amplía la discusión sobre la eficiencia energética y el impacto en la recuperación metalúrgica en operaciones auríferas. Estos avances reflejan una evolución sostenida del concepto, reafirmando su potencial como alternativa técnica y económica en los procesos de lixiviación sin comminución.

METODOLOGÍA

Se adoptó un enfoque empírico aplicado directamente en faena, integrando observaciones de campo y análisis granulométrico mediante procesamiento de imágenes. El objetivo principal fue evaluar cómo diferentes diseños de malla de perforación influyen en la eficiencia del proceso de lixiviación sin chancado, característico del concepto *mine to pad*.

Se evaluaron distintas configuraciones de malla (5,50 m y 4,80 m) considerando variables críticas como el tamaño del fragmento (P80), los índices de recuperación metalúrgica y los costos operativos asociados (perforación y voladura, carguío, acarreo y lixiviación). Para caracterizar la distribución granulométrica y analizar su relación con la permeabilidad de las pilas y la recuperación de metales, se empleó tecnología de análisis fotogramétrico. No obstante, este método mostró la limitación de subestimar la fracción fina, por lo que se recomienda complementarlo con muestreos físicos y con el uso de softwares de simulación, como JK Simblast, que permiten validar y optimizar los diseños de malla. Adicionalmente, se propone integrar cuadros comparativos que evidencien la cinética de lixiviación en función de diferentes granulometrías, así como un cuadro consolidado que relacione los costos de perforación y voladura con el costo final de producción, en reemplazo de múltiples cuadros parciales.

La elección de los procedimientos técnicos respondió a la necesidad de lograr una comminución eficiente desde la voladura, evitando etapas posteriores de chancado o molienda. En este marco, se aplicaron progresivamente tecnologías de detonación avanzadas, como sistemas de iniciación no eléctrica y electrónica, modificación de retardos de superficie (de 800/25 ms a 800/17 ms), uso de cámaras de aire y, más recientemente, retenedores de energía y emulsión gasificada.

Estas técnicas permitieron mejorar la secuencia de salida y maximizar el microfracturamiento de la roca, lo que favoreció una mayor exposición del mineral al agente lixiviante. La aplicación práctica del estudio consistió en ajustar mallas de perforación y carga según la dureza del macizo rocoso, buscando siempre un equilibrio entre el costo de perforación y la eficiencia del proceso global, especialmente la recuperación metalúrgica.

Los resultados obtenidos permiten demostrar que un control preciso de la fragmentación inicial, alineado con un diseño técnico racional de la malla y el uso eficiente de la energía explosiva, reduce el costo total de minado y mejora significativamente la eficiencia del proceso metalúrgico sin chancado.

Inicialmente, se comenzó realizando voladuras sobredimensionando el explosivo para obtener una fragmentación mínima alrededor de 3 pulgadas; posteriormente se hicieron investigaciones acerca del tamaño ideal para el proceso óptimo en la lixiviación en pilas, logrando una fragmentación promedio que permitió la adecuada percolación de la solución hacia el fragmento poroso microfracturado.

En 2002 se modificaron las secuencias de salida para aprovechar el choque entre el fracturamiento producido entre pozo y pozo, realizando salidas de distintas maneras con doble y triple salida de taladros en el inicio para obtener una cara libre mucho mayor.

El análisis por imagen mostró el comportamiento de las variables granulométricas bajo un espaciamiento de malla de 5,50 m, sirviendo como base comparativa frente a diseños más densos (por ejemplo, 4,80 m o 4,50 m).

DESARROLLO

La voladura es la primera etapa del proceso de comminución, compitiendo con las otras etapas de este proceso (chancado y molienda), preacondicionando la roca para su posterior

tratamiento de la forma más económica para el costo total de minado, siendo el objetivo la calidad de fragmentación como producto final.

Al referirnos al producto final (fragmentación), no solo consideramos los procesos físicos como extracción, transporte, chancado y molienda. Ya se ha demostrado la importancia de la creación de microfracturas en el mineral para el tratamiento por parte de la planta metalúrgica, debido a la facilidad de molienda, a la disminución de su *work index*, al aumento de la eficiencia de la lixiviación y al incremento de la superficie específica.

Inicialmente, se comenzó realizando voladuras sobredimensionando el explosivo para obtener una fragmentación mínima alrededor de 3 pulgadas; posteriormente se hicieron investigaciones acerca del tamaño ideal para el proceso óptimo en la lixiviación en pilas, logrando una fragmentación promedio que permitió la adecuada percolación de la solución hacia el fragmento poroso microfracturado.

Proceso de lixiviación en pilas del mineral minado sin chancado en pad

La parte fundamental de las operaciones en esta mina a tajo abierto es la extracción de oro y plata a partir de la lixiviación del mineral en los pads, una vez almacenado en ellos el mineral extraído de los tajos y acondicionado con la cal necesaria para lograr un pH adecuado para la mejor recuperación de los metales. La lixiviación se realiza con una solución cianurada y alcalina que atrapa los metales al percolar por el pad.

La solución discurre por tuberías colocadas en el fondo del pad sobre una geomembrana de protección y es trasladada a la poza de solución rica (*pregnant*). Desde allí es bombeada a la planta, donde se encuentran las columnas de carbón activado que recolectan el oro y la plata contenidos en la solución. Luego, esta pasa a otra poza de solución pobre (*barren*), la cual es repotenciada y bombeada nuevamente hacia los pads para iniciar una nueva etapa de lixiviación. Como se observa, esto completa un circuito cerrado que no libera solución al medio ambiente.

Después de cargar con oro y plata las columnas con carbón activado, los carbones son trasladados a la planta de desorción a presión, donde se obtiene un cemento que contiene los metales. Dicho cemento se envía luego al horno de fundición, el cual, a 1100 °C de temperatura, permite obtener como producto final las barras doré con contenido de oro y plata.

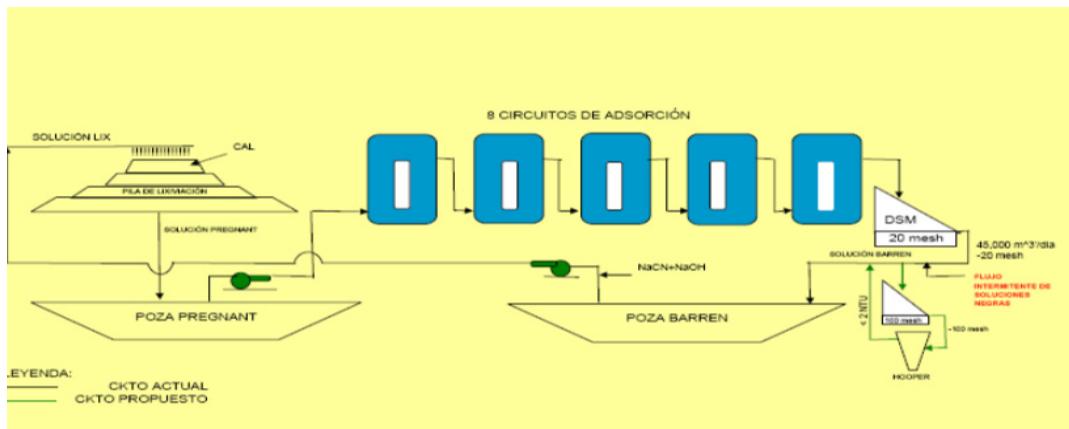


Figura 1. Flow sheet: resumen de operaciones de lixiviación y adsorción en planta

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

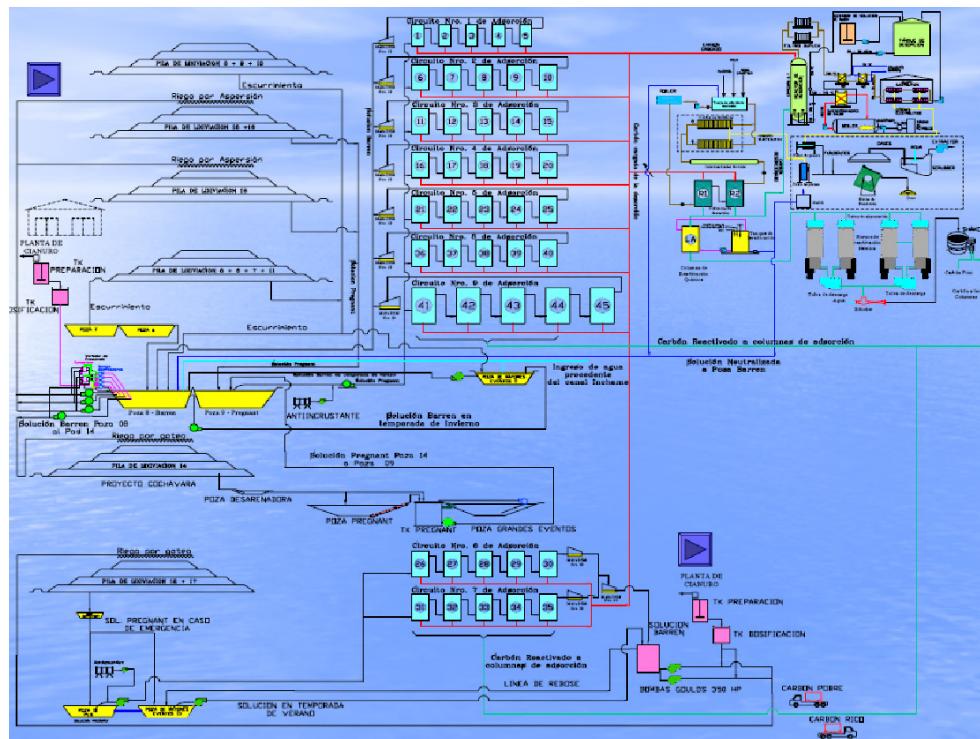


Figura 2. Diagrama de flujo de operación de la planta de beneficio

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Eficiencia de riego en las pilas de lixiviación

Es cierto que los problemas más comunes en este sistema de procesamiento son el taponamiento en las mangas causado por el gotero o por el mineral, que, debido a la cantidad de finos, se compacta y forma canalizaciones internas que segregan la solución, además de la reducción de la calidad de riego y de la distribución de mineral y solución en las pilas.

Esta operación de lixiviación será controlada a través de las ratios de riego, la eficiencia de las mangas de riego, los

taludes, el retiro de los taludes y el control horizontal de los pisos de descarga de mineral. Asimismo, la solución será controlada cada 12 horas para nivelar las concentraciones de cianuro y cal.

Sin embargo, las microfracturas del mineral volado depositado en las pilas de lixiviación constituyen un parámetro importante, puesto que de ello dependerán la velocidad de riego y el alcance para una buena lixiviación, siendo también una ventaja en la recuperación metalúrgica, al obtenerse mejores índices de rendimiento para la planta. Este es uno de los factores que influyen en la eficiencia de riego que a continuación mencionaremos.

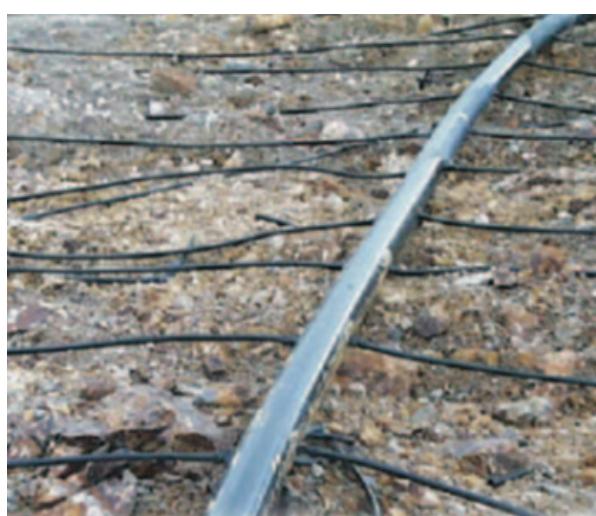


Figura 3. Sistema de riego y salida de solución

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA



Fragmentación óptima como único proceso de cominución (reducción de tamaño) para lixiviación

Debido a que los minerales se encuentran asociados a la ganga, se hace necesaria la reducción de tamaño por voladura, de manera que exista una liberación de los granos minerales desde la matriz mediante la microfracturación durante la detonación.

La reducción de tamaño es la etapa de mayor consumo energético, por lo que debe ser óptima para asegurar un buen regadío en las pilas de lixiviación y evitar problemas en la velocidad de riego y en la recuperación que provocaría la generación de partículas demasiado finas, las cuales perjudican la etapa global de concentración.

La cominución comienza y termina durante el proceso de detonación de los taladros mediante la interacción, en milisegundos, entre las fuerzas de compresión entre ellos y también por la interacción roca-roca como producto del primer proceso. Como el producto generado tiene un tamaño adecuado para el tratamiento metalúrgico de concentración, no se hacen necesarias etapas posteriores de molienda, siendo prioritario únicamente volar el mineral de la manera óptima y obtener una fragmentación sin chancado.

Los minerales a lixiviar son preparados mecánicamente con una reducción de tamaño adecuada, de modo que se exponga una gran superficie que permita un contacto íntimo entre la solución y la superficie del mineral, además de una etapa de aglomeración en la cual se consigue la adhesión de partículas finas a las más gruesas, permitiendo una distribución uniforme de tamaño en la alimentación a las pilas de lixiviación.

El microfracturamiento de la roca para la lixiviación tiene por objeto incrementar la permeabilidad natural mediante la creación de nuevas grietas o fisuras que sirvan de paso para la circulación del fluido. La fractura por voladura utiliza detonaciones que generan grietas y fracturas iniciales que permiten la exposición del mineral para ser atacado por el líquido que circula a través de él.

Tamaño de partícula

El oro grueso no podrá ser disuelto completamente en el tiempo disponible para llevar a cabo el proceso de cianuración. El tamaño de partícula condiciona el esquema de procesamiento del mineral. Oro fino y limpio: cianuración. Una partícula de oro de 45 micras no tarda más de 12 horas en disolverse y una de 150 micras no tarda más de 48 horas.

Permeabilidad de la pila

La permeabilidad de la pila durante la operación de lixiviación es el principal factor a considerar para obtener la máxima recuperación del mineral. La aglomeración de grandes cantidades de mineral con arcilla mejora la permeabilidad y hace el proceso más efectivo. El método para la aplicación de la solución de lixiviación, como se mencionó anteriormente, puede influir significativamente en la porosidad cerca de la superficie, en el movimiento de la solución a través de esta y en el resultado final al obtener el oro.

Mine to pad

Este nuevo concepto, también llamado *mine to leach*, consiste en fragmentar para lixiviar oro sin chancar ni moler; el material volado es depositado directamente en las pilas de lixiviación para su riego y posterior procesamiento hasta la obtención de la barra de oro. Esta es una de las primeras faenas que innova este concepto para un minado selectivo y errático en los proyectos de voladura.

Historial de las técnicas usadas en la voladura para el microfracturamiento (1996-2008)

2000: implementación del uso del sistema de iniciación no eléctrico.

2002: mejoramiento en las secuencias de salida en los disparos para el microfracturamiento de la roca.

2004: cambio de los retardos de superficie de 800/25 MS a 800/17 MS

2006: aplicación de cámaras de aire en zonas de roca suave y media.

2007: iniciación electrónica en zonas duras de los tajos.

2008: uso de retenedores de energía en todos los tipos de dureza.

2008: proyecto de reemplazo de Anfo Pesado a emulsión gasificada.

Implementación del uso del sistema de iniciación no eléctrico

A inicios de la operación minera de dicho tajo se realizaba la voladura con cordón detonante en todos los diseños. A consecuencia de disparos mal secuenciados, mala fragmentación, baja recuperación metalúrgica y efectos ambientales adversos, se implementó en 2000 el sistema de iniciación no eléctrica, obteniéndose buenos resultados: disminución de los niveles de vibración, mejoramiento de la fragmentación, ligero aumento de la recuperación metalúrgica y minimización de los tiros quedados. Si bien es cierto que se incrementó el costo de voladura, se redujo el costo total de minado.

Mejoramiento en la secuencia de salida mediante el microfracturamiento de la roca

En 2002, se modificaron las secuencias de salida para aprovechar el choque entre el fracturamiento producido entre pozo y pozo, realizando salidas de distintas maneras, con doble y triple salida de taladros en el inicio, para obtener una cara libre mucho mayor y con ángulos de cara libre superiores.

Se obtuvieron mejores resultados que los anteriores, reduciendo el costo total de minado con respecto a los años previos.

Cambio de los retardos de superficie de 800/25 ms a 800/17 ms

En 2004, al modificarse previamente las secuencias de salida, se hizo necesario reducir los retardos de superficie de 800/25 ms a 800/17 ms para aprovechar mejor el proceso de microfracturamiento de la roca entre pozo y pozo durante la voladura.

Ello permitió realizar diseños de salida más amplios, mejorando también el direccionamiento de los polvorazos.

Aplicación de cámaras de aire en zonas de roca suave y media

En 2006, al presentarse dificultades en las proyecciones y *fly rock*, se adicionaron las cámaras de aire únicamente para roca suave y roca media en todos los tajos de la mina. Se redujeron las proyecciones de roca, se disminuyó la carga por pozo y se ampliaron los espaciamientos de los diseños de malla de perforación en los tipos de roca mencionados.

Iniciación electrónica en zonas duras de los tajos

En 2007, ante el desafío de mejorar los diseños en tajos de roca dura y muy dura, se implementó la iniciación electrónica, obteniéndose excelentes resultados, ampliándose el espaciamiento hasta más de 0,40 cm en las mallas mencionadas para incrementar la recuperación metalúrgica del oro en los *pads*.

Se incrementó considerablemente el costo de voladura, pero se compensó con el costo total de minado; sin embargo, el

aumento del espaciamiento de la malla de perforación también contribuyó a reducir dicho incremento. El microfracturamiento en este sistema fue realmente notable en diversos aspectos: secuencia de salida, reducción del factor de potencia, disminución del costo de perforación y mayor seguridad proporcionada por el sistema electrónico, así como en el costo total de minado.

Uso de retenedores de energía en todos los tipos de dureza (año 2008)

Este tipo de accesorio está aún a prueba; al inicio se probó a 0,40 cm de la carga continua del taladro, para luego reducirlo a 0,30 cm de dicha columna de carga. Ello permitió aprovechar mejor la energía y mejorar la fragmentación en la parte superior del taladro.

Proyecto de reemplazo de Anfo Pesado a emulsión gasificada (año 2008)

Este proyecto recién se está iniciando y está programado para diciembre de este año, contando con diseños preliminares en tajos de dureza media.

Análisis del efecto de la fragmentación con respecto a la lixiviación

En el cuadro que se aprecia se observa claramente cómo los costos de carguío y remoción de mineral en un tajo modelo de una minera de oro disminuyen al aumentar ligeramente el costo de perforación y voladura:



Figura 4. Costo de perforación y voladura vs. costo de carguío y remoción

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

En el gráfico siguiente, se visualiza el costo de producción US\$/TM mineral puesto en pad:

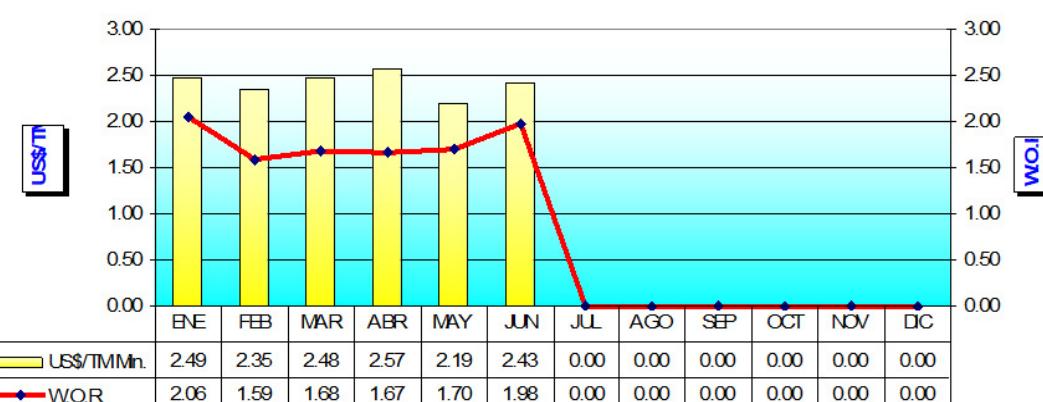


Figura 5. Costo de producción de US\$/TM en mineral puesto en pad

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Costos (consideraciones)

- Es rentable reducir el espaciamiento de perforación y voladura.
- Un mineral mejor fragmentado será mejor lixiviado.
- Comparar la fragmentación ROM del año 2001 a malla D&B triangular (4,80m x 4,80m) con la fragmentación que obtendríamos reduciendo la malla de perforación y voladura triangular (4,50m x 4,50m).

- Tomar en cuenta que lo importante es el incremento en extracción.

Granulometría por imagen

Realizando un análisis por imagen se muestra el comportamiento de las variables evaluadas para una malla de perforación y voladura de 5,50 m de espaciamiento:

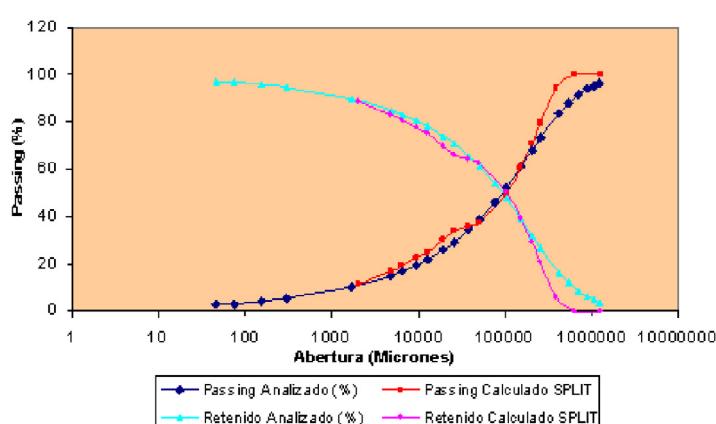


Figura 6. Proyecto 103 malla de voladura 5.50 m

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

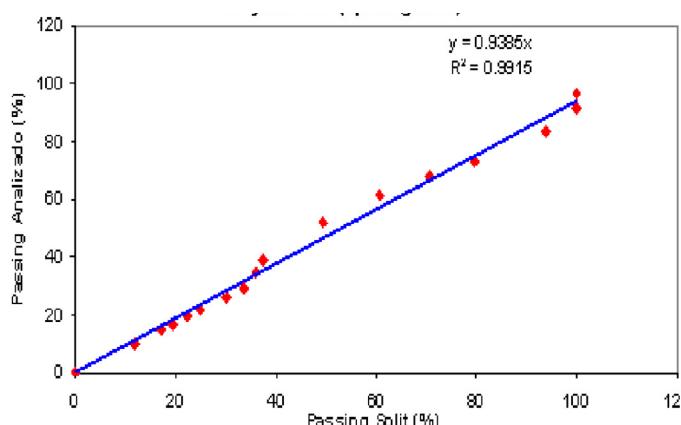


Figura 7. Proyecto 103 (espaciamiento 5.50 m)

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

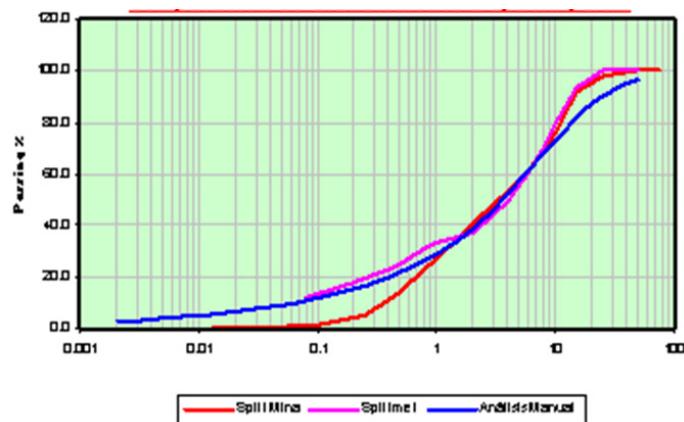


Figura 8. Comparación de granulometría a spacing 5.50 m

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Reducción del costo total de minado

A continuación, apreciamos cómo los costos tanto en carguío, transporte y planta se reducen a medida que el costo de

perforación y voladura aumenta en cierta medida, optimizando el costo total de minado.

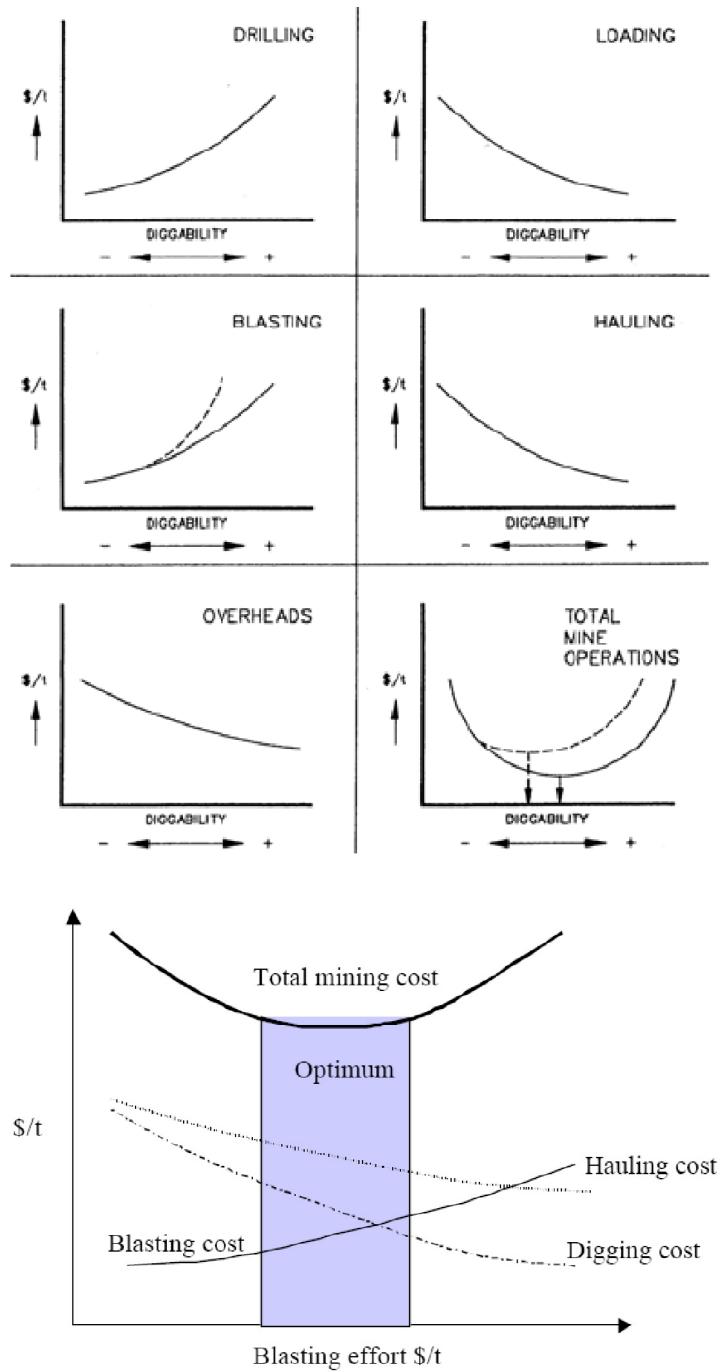


Figura 9. Costo de D&B vs. costo global de minado

Fuente: Departamento de Metalurgia - Compañía Minera Aurífera Santa Rosa SA

Índices de trabajo en los procesos de lixiviación de oro sin chancado

Los índices de trabajo y de gestión muestran el mejoramiento en todos los procesos y en el mencionado:

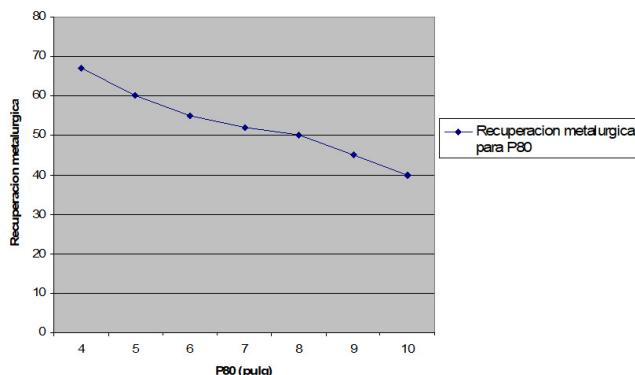


Figura 10. Recuperación metalúrgica de Au en función P80

Fuente: Elaboración Propia

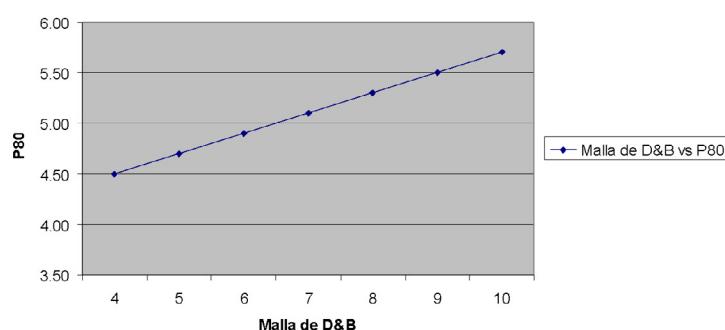


Figura 11. Influencia de la malla de D&B sobre el P80

Fuente: Elaboración Propia

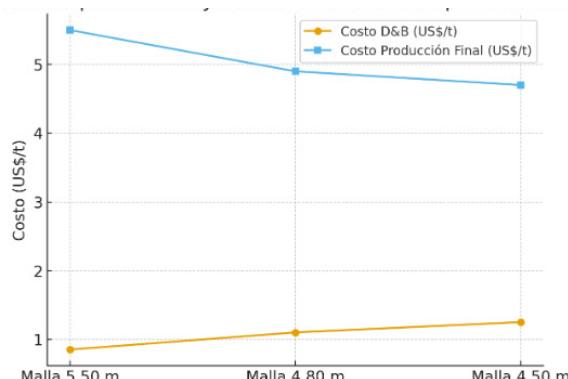


Figura 12. Costo de D&B vs. costo de producción final

Fuente: Elaboración Propia

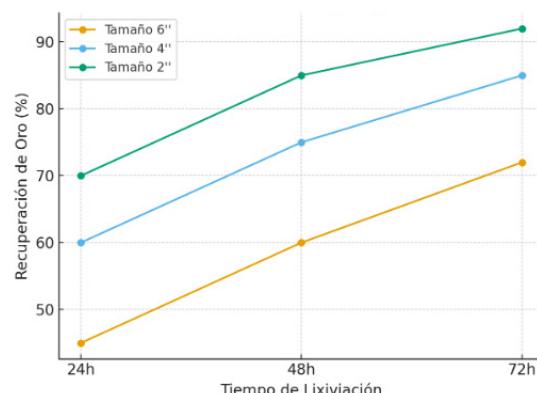


Figura 13. Costo de D&B vs. costo de carguío y remoción mineral

Fuente: Elaboración Propia

RESULTADOS

El estudio permitió demostrar que es posible optimizar el proceso de lixiviación de oro sin necesidad de etapas de chancado o molienda mediante un diseño adecuado de mallas de perforación y la aplicación de tecnologías de detonación orientadas al microfracturamiento de la roca.

En este estudio de caso en la mina Específica, los resultados muestran que la reducción del espaciamiento de la malla de perforación de 5,50 m a 4,80 m permitió obtener una fragmentación más adecuada, con un P_{80} más fino que favoreció la permeabilidad de las pilas y mejoró la eficiencia del riego, lo que se tradujo en un aumento de la recuperación metalúrgica. Esta mejora se evidenció en los análisis granulométricos por imagen, donde se observó una mayor proporción de partículas porosas y de tamaño cercano a 4 pulgadas, incrementando el área superficial disponible para el contacto con la solución lixiviante. Sin embargo, este hallazgo debe entenderse como propio de este caso particular, ya que su aplicabilidad depende de la geología y la mineralización del yacimiento. Es importante señalar que el método de análisis granulométrico por imagen subestimó la presencia de finos, por lo que futuras investigaciones deberían complementarse con técnicas de muestreo físico o métodos alternativos para obtener una caracterización más precisa.

A nivel económico, si bien se evidenció un aumento en los costos de perforación y voladura debido al uso de tecnologías como la iniciación electrónica y los retenedores de energía, estos fueron ampliamente compensados por la disminución de los costos en las etapas posteriores de carguío, acarreo y procesamiento. El análisis comparativo mostró que el costo total de minado se redujo, validando el enfoque de inversión inicial en la fase de voladura como una estrategia rentable.

Asimismo, se observaron beneficios colaterales importantes: reducción de tiros quedados, menor generación de proyecciones (*flyrock*) al aplicar cámaras de aire en zonas de roca media y suave, y una mejora en la seguridad operativa y en la estabilidad de los *pads*.

Contrario a la expectativa inicial, se identificó una limitación en el análisis granulométrico por imagen, ya que este método subestimó la proporción de finos presentes en algunos casos, lo que sugiere la necesidad de complementar este análisis con muestreo físico para obtener una curva granulométrica más precisa.

La implementación de sistemas de iniciación electrónica en zonas duras permitió ampliar el espaciamiento hasta más de 0,40 m en las mallas, incrementando la recuperación metalúrgica del oro en los *pads*.

A medida que el costo de perforación y voladura aumentaba moderadamente, se observó una disminución significativa en los costos de carguío, transporte y procesamiento en planta, optimizando el costo total de minado.

Finalmente, se confirmó que el microfracturamiento no solo mejora la disolución del oro, sino que también reduce el *work index* del mineral, contribuyendo indirectamente a la eficiencia global del sistema de procesamiento sin chancado.

Esto refuerza la validez del concepto *mine to pad* como una alternativa eficaz para operaciones de oro con leyes medias a bajas y condiciones geológicas favorables.

CONCLUSIONES

Es posible optimizar el proceso de lixiviación de oro sin necesidad de chancado ni molienda, siempre que la voladura se diseñe con criterios que prioricen una fragmentación adecuada y la generación de microfracturas en el mineral. Esto valida el enfoque *mine to pad* como técnica viable en minería aurífera a tajo abierto.

El microfracturamiento inducido por una voladura correctamente secuenciada y técnicamente diseñada mejora sustancialmente la recuperación metalúrgica, al facilitar la penetración de la solución cianurada en el mineral y aumentar su área de reacción. La calidad del riego y la velocidad de disolución están directamente vinculadas a esta condición.

La decisión de invertir más en la etapa de perforación y voladura se justifica plenamente, ya que los beneficios en términos de reducción del costo total de minado, mayor recuperación de oro y mejoras operativas superan el incremento inicial en costos. Este equilibrio económico se confirmó al comparar escenarios con distintas mallas de perforación.

La reducción de espaciamientos en la malla de perforación (de 5,50 m a 4,80 m) permitió mejorar la fragmentación sin generar un exceso perjudicial de finos, demostrando que un control técnico del diseño puede traducirse en mejores índices de recuperación sin penalizar la permeabilidad ni la estabilidad del *pad*.

La aplicación de tecnologías de detonación avanzadas (como iniciación electrónica, retardos ajustados y retenedores de energía) fue clave para alcanzar los objetivos del estudio, aportando precisión, seguridad y eficiencia al proceso de voladura.

Los resultados responden afirmativamente a las interrogantes iniciales: es técnica y económicamente viable fragmentar el mineral adecuadamente desde la voladura para prescindir del chancado, siempre que se apliquen criterios de diseño, control granulométrico y tecnologías apropiadas en campo.

El enfoque *mine to pad*, presentado inicialmente por Yancachajlla Tito en las Jornadas de Tronadura ASIEX 2008 [9], y posteriormente validado en la 52.^a Annual Conference on Explosives & Blasting Technique del ISEE 2026, demuestra su eficacia como alternativa sostenible en la lixiviación aurífera sin chancado, al integrar el control de fragmentación con la optimización metalúrgica y energética del proceso.

En conclusión, este estudio de caso en la mina Específica confirma la viabilidad técnica y económica del enfoque *mine to pad* bajo condiciones geológicas particulares que favorecen la exposición del oro en granulometrías gruesas. No obstante, los hallazgos no deben extrapolarse a toda la minería aurífera, ya que dependen de la mineralización y de las condiciones de cada yacimiento. Además, resulta importante reconocer que el análisis granulométrico por imagen subestimó la fracción fina, por lo que futuros estudios deberán complementarse con muestreos físicos o métodos alternativos.

REFERENCIAS

- [1] Chaves, A., & Peres, A. (2011). *Mineral liberation and the role of particle size in heap leaching kinetics*. Minerals Engineering, 24(12), 1328-1334. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2011.06.018>
- [2] Kanchibotla, S. (2003). *Optimum blasting? Is it minimum cost per broken rock or maximum value per tonne?* En The Australasian Institute of Mining and Metallurgy (AusIMM), *Proceedings*. Brisbane.
- [3] Morales, R., & Riquelme, R. (2017). Rock fragmentation and its effect on heap leaching recovery in open-pit gold mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 117(8), 765-774. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2017/v117n8a6>
- [4] Torres, C., & Rojas, J. (2019). *Innovaciones en lixiviación aurífera en pilas: Experiencias en Perú y México*. Congreso PERUMIN 34, Arequipa, Perú.
- [5] Yancachajlla Tito, D. (2008). *Mine to Pad: Fragmentación para lixiviación de oro sin chancado*. En *VIII Jornadas de Tronadura ASIEX 2008*. La Libertad, Perú. <https://www.asiex.cl/jornadas2008>
- [6] Yancachajlla Tito, D. (2026, enero 20-25). *Mine to Pad: Fragmentation for Gold Leaching without Crushing*. En *52.ª Annual Conference on Explosives & Blasting Technique (ISEE)*, Reno, Nevada, Estados Unidos. <https://www.isee.org>

ACERCA DEL AUTOR

Dino Yancachajlla Tito

Es ingeniero especializado en operaciones mineras con experiencia en perforación, voladura y optimización de procesos de conminución en minería a tajo abierto. Ha desarrollado estudios aplicados en fragmentación para lixiviación sin chancado y liderado iniciativas orientadas a la eficiencia operativa y reducción de costos en faena. Ha participado como expositor en congresos técnicos nacionales. Actualmente, continúa vinculado al sector minero como consultor y formador técnico.

 dyancachajlla@tecsup.edu.pe

Recibido: 03-06-2025

Revisado: 22-09-2025

Aceptado: 07-10-2025



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons AtribuciónNoComercial 4.0 Internacional.