

Evaluation of the injection leaching method in the re-leaching of PADs to optimize gold in Shahuindo

Ramos Chunga, Luis Steven¹; Lobe López, Fabian Estefano²; Aguilar Julca, Paul Michael³

¹ Universidad Privada del Norte (UPN); N00361916@upn.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN); N00381011@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte (UPN); paul.aguilar@upn.pe

Abstract— Peruvian mining, crucial to the national economy, faces the challenge of optimizing gold recovery from depleted leach pads (DLPs), such as those at the Shahuindo mine in Cajamarca. This study evaluated the injection leaching method as an innovative solution to reactivate these residual resources. The research, conducted in two phases, began with a geophysical electrical resistivity tomography diagnosis that identified unleached areas in Pad 1A, followed by the design of 31 injection wells and metallurgical tests that established 350 ppm of cyanide as the optimal concentration. Phase II (2023) covered the operational implementation of the process, with cell assembly, filter cleaning and controlled well rinsing. During the pilot phase (Dec. 2021-June 2022), 2,110 ounces of gold were recovered, bringing the overall recovery from the pad from 77.3% to 79.2%. In the operational phase (Dec. 2022-Mar. 2023), an additional 1,317 ounces were obtained. Comparison with conventional methods demonstrated the superiority of Injection Leaching, achieving higher recovery with 15 times less cyanide consumption (350 ppm vs. >2,300 ppm). In addition, the re-leaching operation in 2023 generated a return of more than USD 2.4 million, albeit with lower metallurgical efficiency. The injection leaching method is a viable, sustainable, and profitable technology that maximizes the extraction of residual gold through controlled, three-dimensional injection, positioning itself as the optimal alternative for exploiting value in historic stockpiles.

Keywords— Injection leaching, re-leaching, PADs, recovery, gold, optimization.

Evaluación del método de Injection Leaching en la relixiviación de PADs para optimizar la recuperación de oro en Shahuindo

Ramos Chunga, Luis Steven¹; Lobe López, Fabian Estefano²; Aguilar Julca, Paul Michael³

¹ Universidad Privada del Norte (UPN); N00361916@upn.pe

² Universidad Privada del Norte (UPN); N00381011@upn.pe

³ Universidad Privada del Norte (UPN); paul.aguilar@upn.pe

Resumen– La minería peruana, crucial para la economía nacional, enfrenta el desafío de optimizar la recuperación de oro en pilas de lixiviación agotadas (PADs), como las de la mina Shahuindo en Cajamarca. Este estudio evaluó el método de Injection Leaching como una solución innovadora para reactivar estos recursos residuales. La investigación, realizada en dos fases la Fase I (2021–2022), comenzó con un diagnóstico geofísico de tomografía de resistividad eléctrica que identificó zonas no lixiviadas en el Pad 1A, seguido del diseño de 31 pozos de inyección y pruebas metalúrgicas que establecieron 350 ppm de cianuro como la concentración óptima. La Fase II (2023) abarcó la implementación operativa del proceso, con armado de celdas, limpieza de filtros y enjuague controlado de pozos. Durante la fase piloto (dic. 2021–jun. 2022), se recuperaron 2,110 onzas de oro, elevando la recuperación global del pad del 77.3% al 79.2%. En la fase operativa (dic. 2022–mar. 2023), se obtuvieron 1,317 onzas adicionales. La comparación con métodos convencionales demostró la superioridad del Injection Leaching, logrando una mayor recuperación con un consumo de cianuro 15 veces menor (350 ppm vs. >2,300 ppm). Además, la operación de relixiviación en 2023 generó una rentabilidad de más de 2.4 millones de USD, aunque con una eficiencia metalúrgica inferior. El método Injection Leaching es una tecnología viable, sostenible y rentable que maximiza la extracción de oro residual mediante una inyección controlada y tridimensional, posicionándose como la alternativa óptima para explotar valor en pilas históricas.

Palabras clave– Injection leaching, relixiviación, PADs, recuperación, oro, optimización.

I. INTRODUCCIÓN

El sector minero constituye la actividad económica de mayor impacto en el Producto Bruto Interno (PBI) del Perú y se consolida como el principal motor de inversión del país. En 2020, la inversión minera alcanzó los US\$ 4 333 millones, con proyecciones acumuladas entre el periodo 2021–2025 que superan los US\$ 56 156 millones. Estas cifras subrayan la relevancia del sector en la atracción de capital y su rol dinamizador de la economía nacional [1].

En este contexto, la unidad minera Shahuindo, operada por Pan American Silver en el distrito de Cachachi (Cajabamba, Cajamarca), se posiciona como una de las operaciones más importantes del país en la extracción de oro y plata. La concesión alberga importantes depósitos de

minerales auríferos y argentíferos de tipo óxido, los cuales son procesados mediante lixiviación en pilas. Este proceso hidrometalúrgico consiste en apilar el mineral, previamente chancado y/o aglomerado, sobre una superficie impermeabilizada para luego regarlo con una solución lixivante que disuelve selectivamente los metales de interés. La solución enriquecida, conocida como pregnant leach solution (PLS), se recolecta en la base de la pila y se dirige a las etapas de purificación y recuperación del metal [2].

Gracias a esta técnica, la operación procesa entre 1 000 y 50 000 toneladas diarias de mineral, consolidándose como un actor clave en la generación de divisas y el desarrollo del sector minero peruano [3]. No obstante, el agotamiento progresivo de los recursos minerales ha vuelto estratégica la optimización de la recuperación de oro residual en Pilas de Lixiviación Agotadas (PADs). En Shahuindo S. A., estas pilas aún albergan cantidades significativas de oro no recuperado, lo que representa un recurso valioso que requiere la implementación de tecnologías innovadoras, eficientes, de bajo costo y con menor impacto ambiental para su reactivación.

Ante esta situación, la lixiviación por inyección (Injection Leaching) emerge como una alternativa técnica prometedora. A diferencia del riego superficial convencional, este método consiste en la inyección controlada de soluciones lixiviantes directamente en el cuerpo de la pila mediante perforaciones verticales o inclinadas. Esta configuración permite una mayor penetración del reactivo, un contacto más homogéneo con el material residual y una distribución tridimensional de la solución, lo que incrementa la cinética de disolución del oro, mejora los índices de recuperación y reduce los tiempos de operación.

En el presente estudio, se plantea evaluar la aplicación del método Injection Leaching en la relixiviación de Pilas de Lixiviación Agotadas (PADs), con el fin de optimizar la recuperación de oro en la mina Shahuindo. Asimismo, se busca explicar su fundamento técnico y operativo, para comprender los principios que sustentan su implementación, y

evaluar la rentabilidad del proceso de relixiviación en función de la eficiencia de recuperación y los costos asociados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Enfoque y diseño de la investigación

La investigación se desarrolló bajo un enfoque investigativo comparativo, con un diseño no experimental y longitudinal, estructurado en dos fases complementarias y temporalmente diferenciadas (Fase I: 2021–2022 y Fase II: 2023).

El objetivo fue evaluar y comparar el desempeño técnico, metalúrgico y operativo del método de Injection Leaching frente a la relixiviación convencional aplicada en pilas de lixiviación agotadas (PADs) de la mina Shahuindo.

La Fase I (2021–2022) se centró en la aplicación de una metodología técnica orientada al diagnóstico geofísico, el diseño de pozos de inyección, la realización de pruebas metalúrgicas y la ejecución de una prueba piloto de inyección a presión, acompañada de un monitoreo geotécnico continuo.

La Fase II (2023) correspondió a la etapa operativa, enfocada en la implementación práctica del proceso, que incluyó la inyección a presión, la relixiviación y el enjuague controlado por zonas, así como el armado de celdas, la limpieza de filtros y la recuperación en pads antiguos, priorizando los protocolos de seguridad, mantenimiento y control de campo.

Fundamento técnico del método

La lixiviación por inyección (Injection Leaching) es una técnica hidrometalúrgica innovadora empleada en la minería para extraer metales preciosos de yacimientos mineralizados. Su uso se ha extendido gracias a su eficacia para procesar minerales de baja ley de forma rentable, rápida y eficiente, además de presentar un impacto ambiental manejable siempre que se aplique con las medidas adecuadas [4].

La lixiviación de oro con cianuro de sodio (NaCN) es un proceso esencial para extraer este metal de minerales de baja ley, debido a la capacidad del cianuro para formar complejos solubles y estables con el oro [5]. En presencia de oxígeno, se produce la reacción conocida como ecuación de Elsner: $4\text{Au} + 8\text{NaCN} + \text{O}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{Na} [\text{Au} (\text{CN})_2] + 4\text{NaOH}$, mediante la cual el oro se oxida y disuelve, generando el complejo $[\text{Au} (\text{CN})_2]^-$ que es transportado por la solución para su posterior recuperación [6].

El papel del oxígeno en esta reacción es crucial, ya que actúa como el agente oxidante que permite al cianuro disolver el oro. En procesos de lixiviación, es común utilizar sistemas de aireación para asegurar un suministro constante de oxígeno en la solución de cianuro. Sin suficiente oxígeno, la reacción

no se llevaría a cabo de manera eficiente, lo que afectaría negativamente la extracción de oro [7].

La relixiviación de pilas de lixiviación previamente utilizadas consiste en la extracción de metales valiosos que aún permanecen en dichas pilas. Este procedimiento se aplica cuando se identifica la presencia de metales recuperables y puede resultar más rentable que la construcción de nuevas pilas, ya que implica menores costos [3].

Materiales

La investigación se sustentó en información técnica proveniente de estudios previos desarrollados en el Pad 1A de la mina Shahuindo. En particular, se consideraron datos correspondientes a minerales auríferos residuales de tipo óxido, así como información operacional relacionada con el uso de soluciones de cianuro de sodio (NaCN), preparadas con agua industrial y controladas a un pH aproximado de 10.5 mediante lechada de cal. Asimismo, se empleó información técnica reportada sobre el uso de equipos de tomografía de resistividad eléctrica, perforación mediante circulación inversa Schramm T-130, sistemas de inyección a presión, tuberías, válvulas, filtros de carbón e instrumentación geotécnica, incluyendo piezómetros de cuerda vibrante y de tubo abierto. La cuantificación de la recuperación metálica se basó en registros documentados de flujometría y análisis químicos de Au y Ag fueron realizados en laboratorios certificados, complementados con datos de control de pH, concentración de cianuro y monitoreo de ácido cianhídrico (HCN), reportados en las fuentes consultadas, las cuales constituyeron la base comparativa para la evaluación de la eficiencia de los métodos analizados.

Métodos

Los procedimientos descritos a continuación corresponden a metodologías reportadas en estudios técnicos y tesis previas desarrolladas en la mina Shahuindo, las cuales fueron sistematizadas y comparadas en el presente estudio con fines de evaluación técnica y metalúrgica de los métodos utilizados.

Metodología Fase I (2021–2022)

1. Estudio Geofísico del pad (2021)

A finales de 2020, durante la segunda etapa de relixiviación del Pad 1A, la recuperación de oro cayó a 75.7 %, por debajo del 80 % esperado, lo que llevó a sospechar zonas no lixiviadas o con solución atrapada. Por ello, a inicios de 2021 la empresa Anddes realizó un estudio geofísico de tomografía de resistividad eléctrica con arreglo polo-dipolo, planificando 35 líneas (8.29 km totales), espaciamiento de 10 m entre electrodos y longitud máxima de 490 m por línea, alcanzando una profundidad de investigación de 33 m, suficiente para cubrir todo el espesor del pad [8].

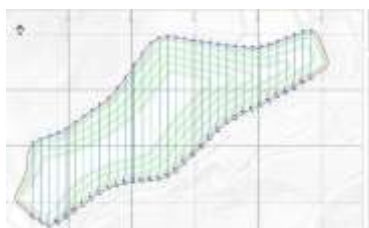


Fig. 1 Plano del estudio geofísico previo.

Del estudio realizado se encontraron varias áreas de oportunidad, tal como se menciona a continuación [8].

- Del estudio realizado se interpretó que las zonas con valores de resistividad entre $100 \Omega \text{ m}$ y $1\,000 \Omega \text{ m}$ corresponden a mineral lixiviado húmedo a seco, siendo zonas de oportunidad para realizar una lixiviación secundaria.
- Las zonas con resistividades bajas $40 \Omega \text{ m}$), corresponden a minerales finos/arcillosos húmedos o acumulación de lixiviados. Estas zonas identificadas probablemente se deban a la disminución de la porosidad por el peso del mineral subyacente.

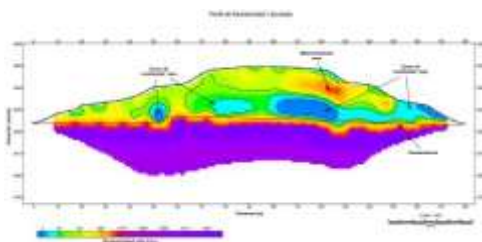


Fig. 2 Plano del perfil de Resistividad Calculada.

- Se observaron también zonas con valores de resistividad menores a $100 \Omega \text{ m}$, cuya interpretación es de un mineral apilado semisaturado
- También se observó que por debajo de la geomembrana se presentan valores de resistividad mayores a $1\,000 \Omega \text{ m}$ lo cual indica que no habría fugas.

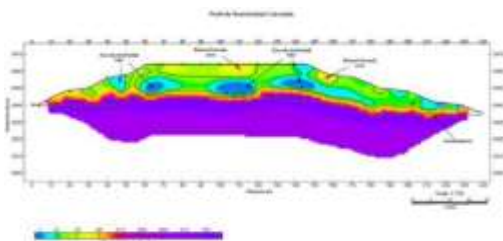


Fig. 3 Plano del perfil de Resistividad Calculada.

Este diagnóstico geofísico fue fundamental para guiar la ubicación estratégica de los pozos de inyección en la fase posterior de Injection Leaching.

2. Diseño e instalación del sistema de inyección y monitoreo

Con base en los resultados geofísicos, se diseñó una red de 31 pozos de inyección y 9 piezómetros de monitoreo, distribuidos sobre una superficie que representaba aproximadamente un tercio del Pad 1A. Cada pozo de inyección fue perforado mediante circulación inversa (equipo Schramm T-130) hasta profundidades entre 11.25 y 23.25 m, respetando un margen de seguridad de 10 m por encima de la geomembrana. Se instalaron casings de acero al carbono (SCH40, 6") con zonas ranuradas en profundidades específicas para permitir la inyección selectiva. Paralelamente, los piezómetros de monitoreo, construidos con tubería ranurada de PVC de 2", fueron instalados en puntos estratégicos entre los pozos de inyección con el fin de medir en tiempo real los niveles piezométricos y detectar posibles acumulaciones de solución o cambios en la presión intersticial durante las operaciones de inyección y enjuague, garantizando así la estabilidad geotécnica del pad [8].



Fig. 4 Diseño en la fase piloto con los 31 pozos de inyección. Los 9 círculos blancos son los piezómetros.



Fig. 5 Se muestra la perforadora SCHRAAM T-130 trabajando en el pad 1A.

3. Caracterización metalúrgica del mineral residual

Durante la perforación, se reportó la toma de muestras del mineral cada 2 metros de profundidad. Con estas muestras se prepararon 53 compósitos representativos, y a cada uno se le realizaron pruebas de botella utilizando tres concentraciones distintas de cianuro: 0 ppm (como control), 350 ppm y 1,000 ppm.

Los resultados mostraron que, al usar 350 ppm de cianuro de sodio (NaCN), se lograba la mejor recuperación de oro (41.81 %) con un consumo razonable de reactivos. En cambio, al aumentar la concentración a 1,000 ppm, el consumo de cianuro subía significativamente sin una ganancia proporcional en la recuperación, e incluso se activaba la disolución de cobre, lo que no era deseable. Por estas razones, se definió 350 ppm de NaCN como la condición química óptima para la inyección en el Pad 1A.

4. Procedimiento de inyección a presión y enjuague (Fase I: Dic 2021 – Jun 2022)

La inyección de solución cianurada en el Pad 1A se realizó en cuatro etapas: primero, una humectación previa sin presión durante 40 minutos para acondicionar el medio. Luego, la inyección se llevó a cabo por zonas, iniciando desde la parte más profunda hacia la superficie; según lo reportado en los estudios analizados, se utilizaron empaques inflables para aislar intervalos y aplicar una presión de 300 PSI, con un volumen promedio de 1,100 m³ por zona en 4.5 horas. Posteriormente, se efectuó una inyección superficial (zona 0) a baja presión durante 10 horas. Finalmente, se realizaron enjuagues sin presión, con flujos de 1,150–1,320 m³, hasta alcanzar una ley de corte de 0.035 ppm Au. En todas las etapas se empleó una solución con 350 ppm de NaCN y pH 10.5, mantenido con lechada de cal, es decir, una mezcla de cal hidratada y agua que actúa como agente alcalinizante para estabilizar el pH y evitar la volatilización del cianuro [8].

5. Monitoreo geotécnico y recolección de datos de recuperación

Para garantizar la estabilidad geotécnica del PAD 1A durante la inyección a presión y cuantificar con precisión la recuperación de oro, se describió la implementación de un sistema integral de monitoreo y recolección de datos. Este incluyó la instrumentación existente 4 piezómetros de cuerda vibrante y 1 inclinómetro complementada con 5 piezómetros de tubo abierto y 10 puntos topográficos adicionales, permitiendo un seguimiento continuo de los niveles freáticos y posibles desplazamientos del talud. Paralelamente, un equipo de supervisión realizó inspecciones diarias en campo, monitoreando visualmente los taludes y registrando lecturas de presión en los piezómetros para detectar cualquier anomalía.

La recuperación de oro se cuantificó mediante un flujómetro instalado en el drenaje del pad para medir el volumen de solución rica (PLS), combinado con muestreos diarios por turno, cuyos análisis químicos de Au y Ag fueron ejecutados en laboratorio certificado; las onzas recuperadas se calcularon multiplicando el volumen total drenado por la ley promedio de oro en la solución, lo que permitió evaluar tanto la eficiencia metalúrgica como el impacto geotécnico de la inyección.

Metodología Fase II: Procedimientos operativos 2023

Durante 2023, se describieron procedimientos operativos estandarizados orientados a garantizar la eficiencia, seguridad y continuidad del proceso de relixiviación en el Pad 1A. Estos procedimientos, descritos en detalle, se ejecutaron en el siguiente orden. Asimismo, en una fase posterior, se aplicó el método de Injection Leaching (inyección de solución cianurada a presión), complementando las operaciones de relixiviación y optimizando la recuperación de oro remanente.

1. Armado de celdas de lixiviación

TABLA I
HERRAMIENTAS, EQUIPOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA EL ARMADO DE CELDAS DE LIXIVIACIÓN

Herramientas, equipos y materiales necesarios
Llave Stanley de 11 mm
Tapones escameado de 6'' o 4''
Niples de HDPE de 2''
Manguera Matriz Lay Flat de 6'' y 4''
Manguera apéndices de 2''
Abrazaderas metálicas de 6'', 4'' y 2''
Rollos de manguera de riego de 16 mm
Filtro de carbón

El armado de las celdas de lixiviación es un proceso técnico que garantiza una correcta distribución de la solución cianurada sobre el mineral. Primero se despliegan las mangueras Lay Flat de 6'' y 4'' junto con las mangueras apéndices de 2''. Luego se colocan las mangueras de riego de 16 mm, que se desenrollan, templen y cortan hasta cubrir el área de lixiviación. Estas se conectan a la matriz Lay Flat mediante conectores y se alinean para asegurar un flujo uniforme. En los extremos se instalan tapones escameados (6'' o 4'') y válvulas de purga en los apéndices de 2'', ajustadas con abrazaderas y una llave Stanley de 11 mm. El tendido de mangueras se realiza en el talud con tres trabajadores: uno en la parte superior que lanza los rollos, otro que los recibe y un tercero que alinea y acomoda el sistema para garantizar una distribución homogénea de la solución en el pad [3].

2. Limpieza de filtros de carbón y purga de válvulas

TABLA 2
HERRAMIENTAS, EQUIPOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA LA LIMPIEZA DE FILTROS

Herramientas, equipos y materiales necesarios
Desarmador estrella
Llave Stanley de 11 mm
Medidor portátil de gas cianhídrico
Filtro de carbón
Válvulas de 2"

En la mina Shahuindo, la limpieza de filtros de carbón y purgas de válvulas comienza midiendo la concentración de cianhídrico con un detector portátil, asegurando que no supere 4.7 ppm. Luego se cierra la válvula de entrada de solución cianurada, se retira el cartucho del filtro y, si es necesario, se desmonta y limpia la válvula automática. En las mangueras sin conexión al péndulo, se quitan los terminales tipo 8 y se limpian las purgas con guantes de nitrilo hasta que el agua cambie de color oscuro a claro. Finalmente, se abren las válvulas de las mangueras de los péndulos para eliminar el carbón acumulado y se cierran nuevamente una vez que la solución fluye limpia [3].



Fig. 6 Sistema de filtros conectados en paralelo.

3. Enjuague de pozos por zonas de inyección

TABLA 3
HERRAMIENTAS, EQUIPOS Y MATERIALES NECESARIOS PARA EL ENJUAGUE DE POZOS POR ZONA DE INYECCIÓN

Herramientas, equipos y materiales necesarios
Pernos
Llaves mixtas
Dados
Llave pico de pato
Tubería T (accesorio de enjuague)
Tubería HDP
Radio portátil
Termómetro digital
Alcohol en gel de 120 ml (Uso personal)

El enjuague de pozos comienza registrando en el formulario estándar HJ el número de pozo, zona, hora, fecha y lectura inicial del medidor de flujo. Luego, se coordina con la planta para enviar la solución Esteral y se abre la válvula, manteniendo un caudal de 140 a 250 gpm (30 a 60 m³/h) durante 24 horas por zona, verificando al menos una vez la posición de la válvula para garantizar flujo estable. Al finalizar, se cierra la válvula, se desciende el tapón de enjuague a la siguiente zona y se fija con su abrazadera, repitiendo el proceso en todas las zonas. Finalmente, se retira el tapón desde la camiseta de enjuague, se desconecta del cable y se almacena para su próximo uso [3].

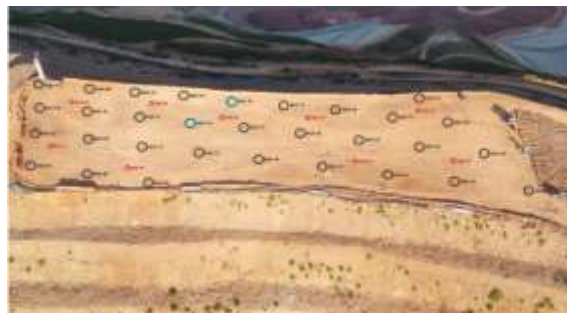


Fig. 7 Vista aérea de los pozos de inyección en el Pad 1A.

4. Inyección de solución cianurada a presión en PADs antiguos

Para aplicar la inyección de solución cianurada a presión, primero se realiza una prueba piloto durante la Fase I, con el fin de evaluar el comportamiento del pad y definir los parámetros óptimos del proceso. Una vez validada la prueba, se procede con la inyección y el enjuague controlado, estimando los tiempos necesarios para favorecer la recuperación del oro residual.

Este proceso se lleva a cabo identificando zonas con potencial de mejora en el pad antiguo, como canalizaciones internas, áreas con baja permeabilidad o humedad, y sectores con baja recuperación de oro, donde la solución cianurada puede penetrar y disolver el metal atrapado, incrementando así la eficiencia del proceso de relixiviación.

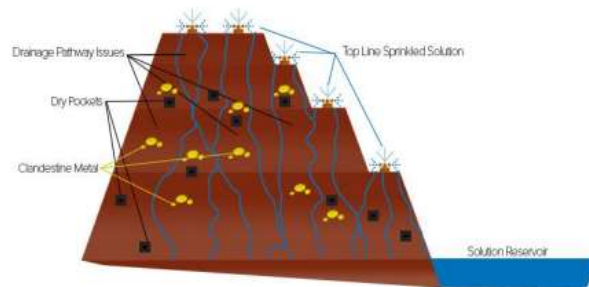


Fig. 8 Identificación de oportunidades en PADs antiguos.

Asimismo, se puede aplicar la tecnología de inyección a presión de solución cianurada, la cual permite una distribución tridimensional (3D) de la solución dentro del pad. Este método facilita la extracción de soluciones atrapadas, la lixiviación de taludes laterales mediante inyección directa, y el tratamiento puntual de zonas con baja recuperación o problemas de permeabilidad. Además, contribuye a mejorar la química interna del montón mediante soluciones ajustadas a las condiciones del mineral, e incorpora la inyección presurizada a diferentes profundidades para optimizar la recuperación del oro residual.

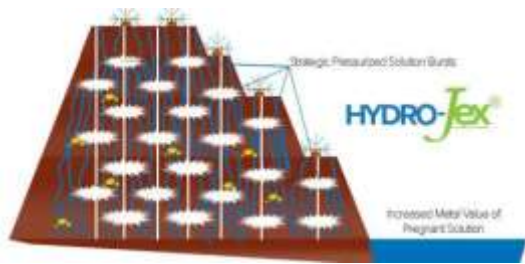


Fig. 9 Tecnología de inyección a presión de solución cianurada.



Fig. 10 Equipo de inyección.

III. RESULTADOS

Método: Inyección de cianuro a presión en Pad 1A — Fase piloto, Dic 2021–Jun 2022

TABLA 4
APORTES MENSUALES DE ONZAS DE AU/AG DESDE EL INICIO DE LA INYECCIÓN

Aporte de Oz de Au/Ag debido a la inyección de CN a presión en el pad 1A				
Mes	Etapas	Ley (prom). Drenaje Pad (ppm)	Oz Au	Oz Ag
Dic-2021	Inyección a presión	0.126	559	2,520
Ene-2022	1 etapa enjuague	0.058	344	2,031
Feb-2022	2 da etapa enjuague	0.094	239	1,084
Mar-2022	enjuague/ Zonas "0"	0.095	373	1,673
Abr-2022	3era etapa enjuague	0.095	303	1,460
May-2022	4 ta etapa enjuague	0.139	223	1,126
Jun-2022	5ta etapa enjuague	0.117	68	347
Total			2,110	10,241

La Tabla 4 presenta los resultados mensuales de la recuperación de oro y plata obtenidos durante la prueba piloto de inyección de cianuro a presión realizada en el Pad 1A de la mina Shahuindo, desde diciembre de 2021 hasta junio de 2022. Incluye el aporte de onzas de oro (Au) y plata (Ag) por mes, discriminado por etapas (inyección inicial y cinco enjuagues posteriores), junto con la ley promedio de drenaje en ppm de Au. Los datos muestran una producción total de 2,110 onzas de oro y 10,241 onzas de plata, evidenciando la eficacia del método para movilizar y recuperar metales remanentes en zonas previamente consideradas agotadas, lo que permitió incrementar la recuperación global del pad del 77.30 % al 79.20 %.



Fig. 11 Onzas recuperadas del pad 1A mediante la inyección de cianuro a presión.

Método: Inyección de cianuro en Pad 1A — operación 2022, Diciembre–Marzo 2023.

TABLA 5
INYECCIÓN DE CIANURO EN EL PAD 1A – 2022

Mes	CN (ppm)	PH
Diciembre	5486.00	10.49
Enero	4863.00	10.43
Febrero	3385.00	10.55
Marzo	2324.00	10.43

La Tabla 5 muestra los parámetros de operación de la inyección de solución cianurada en el Pad 1A de Shahuindo desde el 5 de diciembre de 2022 hasta marzo de 2023. Se observa una disminución progresiva de la concentración de cianuro, de 5,486 ppm en diciembre a 2,324 ppm en marzo, lo que indica una optimización en la dosificación del reactivo. El pH se mantuvo estable en un rango alcalino de 10.43 a 10.55, adecuado para una eficiente disolución del oro y un control óptimo del consumo de reactivos.



Fig. 12 Onzas recuperadas mediante la inyección de cianuro a presión.

La figura 12 muestra la recuperación acumulada de oro (en onzas), desde el 5 de diciembre de 2022 hasta el 13 de marzo de 2023. La curva ascendente refleja un incremento continuo y sostenido de la producción, alcanzando aproximadamente 1,390 onzas acumuladas de oro al cierre del periodo, lo que demuestra la efectividad del método para recuperar el metal remanente en el pad. En total, se logró una recuperación del 78.3 % en el Pad 1, con 1,390 onzas de Au recuperadas durante dicho intervalo.

Método: Relixiviación + enjuague de pozos en Pad 1A — operación 2023, Ene–Abr

TABLA 6
ONZAS DE ORO RECUPERADAS POR RELIXIVIACIÓN/ENJUAGUE

Año	Mes	Onzas de oro recuperadas	Ley promedio de oro (g/ton)
2023	Enero	568	0.118
	Febrero	320	0.058
	Marzo	277	0.094
	Abril	152	0.071
Total		1317	0.085

La Tabla 6 presenta las onzas de oro recuperadas mensualmente mediante la relixiviación de PADs antiguos y el enjuague de pozos de inyección en la mina Shahuindo durante el primer trimestre de 2023 (enero a abril). Además de la producción total de 1,317 onzas de oro, incluye la ley promedio de oro, expresada en gramos por tonelada (g/TM), que representa la concentración media del metal en el material procesado durante cada mes. Esta ley promedio se obtiene dividiendo el contenido metálico total (en gramos) entre el tonelaje procesado, y refleja la riqueza del mineral sometido a relixiviación; en este caso, varió entre 0.058 g/TM (febrero) y 0.118 g/TM (enero), con un promedio global de 0.085 g/TM, lo que indica la baja ley típica de operaciones de recuperación en pads agotados.

TABLA 7
RENTABILIDAD DE LA RECUPERACIÓN DEL ORO

Año	Mes	Onzas de oro recuperadas	Precio del oro (USD/oz)	Rentabilidad (USD)
2023	Enero	568	1831.35	1040206.8
	Febrero	320	1929.06	617299.2
	Marzo	277	1826.72	506001.44
	Abril	152	1968.76	299251.52
Total		1317		2462758.96

La tabla 7 presenta un resumen mensual de la recuperación de oro y su rentabilidad económica en el Pad 1A durante el primer trimestre del año 2023, correspondiente a la operación de relixiviación y enjuague de pozos. En enero se recuperaron 568 onzas de oro a un precio promedio de 1,831.35 USD/oz, generando una rentabilidad de 1,040,206.8 USD; en febrero, la producción bajó a 320 onzas con un precio de 1,929.06 USD/oz, lo que resultó en 617,299.2 USD de rentabilidad; en marzo, se obtuvieron 277 onzas a 1,826.72 USD/oz, con una rentabilidad de 506,001.44 USD; y en abril, la recuperación fue de 152 onzas a 1,968.76 USD/oz, alcanzando 299,251.52 USD. El total acumulado para el periodo de enero a abril fue de 1,317 onzas de oro, con una rentabilidad total de 2,462,758.96 USD, evidenciando que, aunque la producción disminuyó progresivamente mes a mes, el valor del oro en el mercado compensó parcialmente esta caída, manteniendo un rendimiento económico significativo incluso al trabajar con mineral de baja ley residual.

TABLA 8
COMPARACIÓN DE RESULTADOS ENTRE LA FASE I Y LA FASE II EN EL PAD 1A DE SHAHUINDO

Criterio	Fase I (Gonzalez et al.)	Fase II (Medina Cerna)
Periodo	Dic 2021 – Jun 2022	Ene – Abr 2023
Onzas Au recuperadas	2,110 oz	1,317 oz
Recuperación global alcanzada	79.20%	78.30%
Concentración de CN ⁻ óptima	350 ppm	2,324–5,486 ppm
Costo/eficiencia	~600 USD/oz	Rentabilidad positiva: 2.46 M USD
Tipo de intervención	Técnica avanzada (inyección 3D presurizada)	Operación estándar (enjuague por zonas)

Comparación del desempeño técnico-económico del método Injection Leaching entre la fase piloto (2021–2022) y la fase operativa (2023) en el Pad 1A. La tabla contrasta la máxima eficiencia metalúrgica de la Fase I (2,110 oz Au, 350 ppm NaCN, recuperación global 79,2%) frente a la validación de escalabilidad y rentabilidad de la Fase II (1,317 oz Au, >2,4 M USD, pero con 2.324–5.486 ppm NaCN por protocolos

conservadores). Esto evidencia la superioridad técnica del piloto y la necesidad de optimizar los parámetros operativos para alinear el consumo de reactivos con la sostenibilidad ambiental demostrada inicialmente.

La tabla 8 contrasta los indicadores clave de ambas etapas de implementación de la misma tecnología. La Fase I (piloto) demostró la máxima eficiencia metalúrgica al recuperar 2.110 onzas de oro en seis meses utilizando la concentración óptima de 350 ppm de NaCN determinada experimentalmente, logrando elevar la recuperación global del pad al 79,2% con un mínimo impacto ambiental. Por su parte, la Fase II (operativa 2023) validó la escalabilidad y rentabilidad del proceso, generando más de 2,4 millones de USD con la recuperación de 1.317 onzas en cuatro meses; sin embargo, operó con concentraciones de cianuro significativamente mayores (2.324–5.486 ppm) debido a protocolos conservadores de arranque operativo. Esta comparación evidencia que, si bien el Injection Leaching es consistentemente superior a los métodos convencionales de riego superficial, existe una oportunidad crítica de optimización en la fase operativa para alinear el consumo de reactivos con la eficiencia demostrada en la etapa piloto, maximizando así la sostenibilidad económica y ambiental del proceso.

IV. DISCUSIÓN

La fase piloto de inyección a presión en el Pad 1A demostró ser altamente efectiva desde el punto de vista metalúrgico y operativo. Durante los siete meses de implementación, se recuperaron 2,110 onzas de oro y 10,241 onzas de plata, incrementando la recuperación global del pad del 77.30% al 79.20% (Tabla 4). Este resultado cobra relevancia al considerar que el pad ya había sido declarado “agotado” bajo operaciones convencionales. La estrategia se basó en una caracterización geofísica previa mediante tomografía de resistividad, que permitió identificar zonas secas o mal lixiviadas, y en pruebas metalúrgicas que establecieron 350 ppm de NaCN como la concentración óptima, logrando una recuperación de 41.81% en pruebas de botella sin activar la disolución de cobre. El uso de empaques inflables para inyección por zonas y el monitoreo geotécnico riguroso aseguraron una distribución controlada de la solución lixivante y la estabilidad del talud. Este enfoque integrado no solo validó la viabilidad técnica del Injection Leaching, sino que sentó las bases para su escalabilidad con bajo impacto ambiental y alto retorno económico.

Durante la operación a mayor escala de diciembre de 2022 a marzo de 2023, se recuperaron 1,390 onzas de oro, alcanzando una recuperación acumulada del 78.3% en el Pad 1A (Figura 12). No obstante, los datos operativos revelan una sobreutilización inicial de cianuro, con concentraciones que partieron de 5,486 ppm en diciembre y se redujeron progresivamente a 2,324 ppm en marzo (Tabla 5), muy por

encima de los 350 ppm óptimos determinados en la fase piloto. Este comportamiento sugiere una implementación conservadora durante la transición a operaciones rutinarias, priorizando la seguridad metalúrgica sobre la eficiencia química. Aunque se mantuvo un pH estable (10.43–10.55), adecuado para la disolución de oro, el elevado consumo de reactivos indica una oportunidad clara de mejora en la estandarización de protocolos. La tasa de recuperación (~397 oz/mes) fue ligeramente superior a la fase piloto, pero probablemente refleja la explotación de zonas residuales aún más concentradas, más que una mejora del método en sí. Esto subraya la necesidad de alinear estrictamente las operaciones a escala con los parámetros metalúrgicos validados en pruebas previas.

La estrategia de relxivación convencional combinada con enjuague de pozos de inyección, implementada en el Pad 1A de la mina Shahuindo entre enero y abril de 2023, permitió recuperar un total de 1,317 onzas de oro a partir de un mineral residual de ley extremadamente baja (0.085 g Au/ton en promedio), con fluctuaciones mensuales entre 0.058 y 0.118 g/ton (Tabla 6), lo que subraya el carácter marginal del recurso procesado. Aunque esta operación logró generar una rentabilidad económica acumulada de 2,462,758.96 USD con valores mensuales que oscilaron desde 1,040,206.80 USD en enero hasta 299,251.52 USD en abril, en función tanto de la producción decreciente como de la volatilidad del precio del oro (entre 1,826.72 y 1,968.76 USD/oz), su eficiencia metalúrgica fue claramente limitada en comparación con el método de Injection Leaching.

El enjuague de pozos, si bien resultó efectivo para movilizar soluciones ricas atrapadas en la infraestructura ya instalada, funcionó predominantemente como una medida de “limpieza final”, sin lograr una lixiviación activa y penetrante del mineral residual. Esta limitación estructural evidencia que, en contextos de PADs agotados, las técnicas basadas en riego convencional incluso cuando se complementan con pozos de inyección no replican la distribución tridimensional, el control zonal ni la eficiencia química del Injection Leaching, el cual, operando con solo 350 ppm de cianuro, logró en la fase piloto una recuperación superior (2,110 onzas en 6 meses) y un incremento real en la recuperación global del pad (+1.9 puntos porcentuales). Por tanto, si bien la operación de 2023 demostró viabilidad económica en el corto plazo gracias al alto valor del oro en el mercado, su sostenibilidad técnica y rentabilidad a largo plazo resultan inferiores frente a enfoques innovadores como la inyección a presión, que optimizan tanto la extracción metalúrgica como el uso de reactivos.

V. CONCLUSIONES

- El análisis de los resultados obtenidos en las operaciones de Injection Leaching en el PAD 1A de Shahuindo demuestra que este método es efectivo

para la recuperación de oro en pilas agotadas. La capacidad del proceso para movilizar y extraer metales remanentes, alcanzando reciclamientos aproximados del 78%, evidencia que el Injection Leaching, aplicado de manera controlada y optimizada, puede incrementar significativamente la recuperación total de oro. Además, sus ventajas en menor uso de reactivos y reducción en los tiempos de operación confirman su valor como una alternativa eficiente y sostenible que potencialmente puede ser extendida a otros pad y contextos mineros.

- El fundamento técnico del Injection Leaching radica en su capacidad para lograr una distribución tridimensional controlada de la solución lixivante mediante perforaciones estratégicas, empaques inflables y monitoreo geotécnico en tiempo real, superando las limitaciones del riego convencional asociadas a canalizaciones y zonas secas. Operativamente, su éxito depende de una integración previa de diagnóstico geofísico (tomografía de resistividad), caracterización metalúrgica (pruebas de botella con 350 ppm de NaCN como óptimo) y diseño de infraestructura (pozos ranurados por zonas), lo que permite una lixiviación selectiva, segura y altamente dirigida en el cuerpo del pad.
- La rentabilidad de la relixiviación de PADs se confirma tanto en términos técnicos como económicos: solo en el primer trimestre de 2023, la operación de relixiviación + enjuague generó una rentabilidad de 2,462,759 USD al recuperar 1,317 onzas de oro de un material de ley extremadamente baja (0.085 g Au/ton). No obstante, el análisis comparativo revela que el Injection Leaching es significativamente más rentable a largo plazo, ya que logra mayor recuperación con un consumo de cianuro 15 veces menor (350 ppm vs. >2,300 ppm), reduciendo costos operativos, riesgos ambientales y carga metalúrgica en etapas posteriores de recuperación, lo que lo posiciona como la alternativa más sostenible y económicamente viable para explotar valor residual en pilas históricas.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro trabajo de investigación ha sido posible gracias al apoyo y esfuerzo de nuestras familias, con su perseverancia son una fuente de inspiración.

Extendemos nuestro agradecimiento al MsC. Paul Michael Aguilar Julca por su guía, compromiso y valiosa paciencia como docente, siendo su acompañamiento y aporte un factor determinante en la culminación de nuestra investigación y en nuestra formación profesional. Para

finalizar, reconocemos y agradecemos a todas las personas que contribuyeron con este proyecto.

Del mismo modo a Nuestra Casa de Estudios la Universidad Privada del Norte (UPN) por brindarnos la formación académica de alta calidad y proporcionarnos los recursos e infraestructura necesarios para desarrollar y finalizar esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] Leo Rossi, E. A., Espinoza Vidaurre, S. M., Tejerina Arias, I. C., Vargas Fuentes, J. A., & Delgado Rospigliosi, M. G. (2023). Factores Críticos de Éxito en la Gestión de Proyectos en el Sector Minero del Perú, 2022. CISTI (Iberian Conference on Information Systems & Technologies / Conferência Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação) Proceedings, 18, 1–5.
- [2] Vásquez Palacios, J. R., & Poma Jamanca, M. A. (2022). Las Lixivaciones son procesos utilizados en la Hidromineralurgia y consisten en la extracción, preferencialmente selectiva.
- [3] Medina Cerna, J. J. Relixiviación de PADs antiguos y enjuague de pozos de inyección para mejorar la recuperación de oro en unidad minera Shahuindo.
- [4] Roncal Ramos, M. (2025). “Aplicación del RCM para mejorar la confiabilidad de motobombas en el proceso de Injection Leaching, minera Newmont Yanacocha-2024”. Universidad Nacional de Trujillo.
- [5] Galvan Lira, J. M., Soria Aguilar, Ma. de J., Carrillo Pedroza, F. R., & Aguilera González, E. N. (2023). Una Comparación de Reactivos Alternos al Cianuro como Lixivantes del Oro: Una revisión. Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, 7(6), 2410–2434.
- [6] Adams, M. (2016). Gold Ore Processing: Project Development and Operations. Elsevier.
- [7] Milena, L., Torres, L., Daniela, A., Morales, S., & Correa Mahecha, F. (2018). Variables Influyentes En El Proceso De Lixiviación Para La Recuperación De Metales Contenidos En Lodos Galvánicos. Revista Semilleros: Formación Investigativa, 4.
- [8] Gonzalez Olivares, M. A., Corsino Guerrero, R., Casas Montes, J., Baylon de la Cruz, M., & Perumin 35 Convención Minera. (2022).