

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Industrial

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
RIEGO DIFERENCIADO BASADO EN EL
CONTROL DE PROCESOS EN LA LIXIVIACIÓN
CON CIANURO DE SODIO Y SU IMPACTO EN
LA PRODUCTIVIDAD DE LA RECUPERACIÓN
DEL ORO, LA LIBERTAD, 2024”**

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniero Industrial

Autor:

Pedro Luis Gonzales Andia

Asesor:

Mg. Enrique Martin Avendaño Delgado

<https://orcid.org/0000-0003-4403-0044>

Trujillo - Perú

2024

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	Sol Angel Rodriguez Carrillo
	Nombre y Apellidos

Jurado 2	Joel Diogenes Zambrano Falcon
	Nombre y Apellidos

Jurado 3	Enrique Martin Avendaño Delgado
	Nombre y Apellidos

Informe de Similitud

(Copie y pegue como imagen la hoja del reporte global)






12% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

- Bibliografía
- Texto citado
- Texto mencionado
- Coincidencias menores (menos de 8 palabras)

Fuentes principales

- 12%  Fuentes de Internet
- 5%  Publicaciones
- 3%  Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

N.º de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema analizan un documento en profundidad para buscar inconsistencias que permitirían distinguirlo de una entrega normal. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que pueda revisarlo.

Una marca de alerta no es necesariamente un indicador de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis padres, quienes han sido el pilar fundamental de mi vida. A mi madre, por su amor incondicional y su capacidad de encontrar soluciones creativas a los problemas, y a mi padre, por su disciplina y ética de trabajo que me han enseñado el valor del esfuerzo. Gracias por ser mi guía y por inculcarme la importancia de perseguir mis sueños, incluso cuando el camino se torna difícil. Este logro es tanto suyo como mío.

Agradecimiento

En primer lugar, agradezco a Dios por la bendición de haber compartido tantos años junto a mi padre, así como por la salud y el amor que disfruto junto a mi madre y mis hijos. Mi sincero agradecimiento a mi asesor Enrique Avendaño Delgado, por su valiosa orientación, por compartir su conocimiento y observaciones, que han sido fundamentales para alcanzar el objetivo de completar esta tesis.

Tabla de contenidos

JURADO EVALUADOR.....	2
Informe de Similitud.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento.....	5
Índice de tablas	7
Índice de Figuras.....	8
Resumen	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	10
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA	35
CAPÍTULO III: RESULTADOS	43
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....	84
REFERENCIAS	91
ANEXOS	97

Índice de tablas

Tabla 1. Infraestructura de control.....	44
Tabla 2. Capacidades de control.....	48
Tabla 3. Componentes del sistema de riego diferenciado.....	58
Tabla 4. Flujo de caja del proyecto.....	68
Tabla 5. Indicadores económicos.....	68
Tabla 6. Diferencia de media del porcentaje de extracción del Au según los niveles de concentración de 60 ppm y 100 ppm a 60 días.....	70
Tabla 7. Estadígrafos de las concentraciones de Au en solución rica y barren en ppm.....	72
Tabla 8. Diferencia de media de la producción de oro en oz por kilogramo de NaCN antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado.....	74
Tabla 9. Diferencia de media de la producción de oro en oz por dólar de NaCN antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado.....	76
Tabla 10. Diferencia de media del consumo de NaCN en kg por TMS antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado.....	78
Tabla 11. Estadígrafos de las concentraciones de cianuro.....	81
Tabla 12. Correlación entre las concentración de NaCN en riego y las concentraciones de Cu y Hg en solución rica, en el pre y post test.....	82
Tabla 13. Diferencia de media de la producción de Au en oz por TMS antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado.....	84

Índice de Figuras

Figura 1. Vista desde lo alto del campamento minero.....	50
Figura 2. Flujograma actual del sistema de riego de celdas de lixiviación.....	53
Figura 3. Diseño del proyecto.....	56
Figura 4. Diagrama de sistemas de dilución e impulsión.....	63
Figura 5. Diagrama del sistema de inyección.....	66
Figura 6. Curva de extracción del Au a distintas concentraciones en función del tiempo...70	
Figura 7. Concentraciones del oro en solución rica vs concentraciones del oro en solución barren.....	72
Figura 8. Onzas de oro recuperado por kilogramo de cianuro consumido (oz Au / kg NaCN).....	74
Figura 9. Onzas de oro recuperado por costo del cianuro (oz Au / \$).....	76
Figura 10. Consumo del cianuro de sodio por TMS (kg NaCN / TMS).....	78
Figura 11. Curva del consumo de cianuro vs flujo de inyección (kg / m ³ /h).....	80
Figura 12. Concentración de Cu y Hg en solución rica (ppm) en correlación con la concentraciones de cianuro de sodio en riego.....	82
Figura 13. Producción de oro por TMS (oz Au / TMS).....	84

Resumen

Esta investigación tuvo como objetivo determinar el impacto de un sistema de riego diferenciado (SRD) basado en el control de procesos en la productividad de la recuperación de oro durante la lixiviación con cianuro de sodio. Para ello, se realizó una investigación aplicada, cuantitativa y explicativa, con diseño pre-experimental, evaluando los indicadores de productividad antes (febrero 2021-febrero 2022) y después (marzo 2022-octubre 2024) de implementar el SRD, que integró sistemas de dilución, impulsión e inyección controlada de solución cianurada. Los resultados mostraron que el SRD permitió reducir el consumo específico de cianuro en 41,2% (de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN / TMS) mientras mantenía la recuperación de oro, logrando un incremento significativo ($p < 0,001$) en la producción de oro por kilogramo de NaCN de 0,0348 a 0,0565 oz Au/kg NaCN (mejora del 62,4%). El sistema también debilitó significativamente la correlación entre concentración de cianuro y metales interferentes como Cu y Hg (de $r=0,582$ a $r=0,281$ para Cu), optimizando la selectividad del proceso. Se concluyó que el SRD tiene un impacto significativo en la productividad al permitir el control preciso de concentraciones según la madurez de las celdas, aplicando concentraciones más altas (70-100 ppm) solo donde la cinética lo requiere y concentraciones menores (40 ppm) en celdas maduras, logrando una gestión más eficiente del reactivo sin comprometer la recuperación. Se recomienda implementar el monitoreo continuo de la vida útil del *pad* para evaluar los impactos a largo plazo del sistema.

Palabras Clave: lixiviación de oro, sistema de riego diferenciado, control de procesos, productividad minera, y optimización de cianuro.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La optimización de la dosificación de cianuro de sodio en la lixiviación del oro es crucial para la industria minera, buscando maximizar la extracción del metal precioso mientras se minimizan costos operativos e impacto ambiental. Si bien, concentraciones elevadas de cianuro aceleran la lixiviación, también provocan la disolución indeseada de metales como cobre, mercurio y hierro, aumentando costos de procesamiento; ante esto, resulta fundamental comprender el ciclo de lixiviación, en particular la cinética de lixiviación; por lo que, es clave la implementación de sistemas avanzados de dilución, impulsión e inyección de solución cianurada, puesto que permite un control o equilibrio entre la concentración y el flujo de inyección del reactivo en el *pad*. Esta estrategia no solo incrementa la recuperación de oro por unidad de cianuro utilizado, sino que también optimiza el uso de recursos hídricos y energéticos; además, reduce la cantidad de cianuro residual en las soluciones de drenaje, disminuyendo así los requerimientos de reactivos para la destrucción del cianuro en el proceso de tratamiento de efluentes; en consecuencia, mejora la eficiencia global y productividad del proceso, extiende la vida útil de la mina al permitir la explotación económica de minerales de baja ley, y contribuye a la sostenibilidad ambiental de las operaciones mineras, especialmente crítico cuando las leyes de mineral decrecen con el tiempo.

El cianuro mantiene su posición como el reactivo de lixiviación de oro más utilizado industrialmente debido a su eficacia, costo-efectividad y versatilidad. Birich et al. (2019) demostraron que el cianuro exhibe una disolución de oro continua y constante, con una tasa

promedio de $1,032 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ a 25°C , superando a varios reactivos alternativos, como tiosulfato ($0,295$ a $1,179 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, cuyo “pico” se da solo para las primeras tres horas, luego se detiene) y tiourea ($0,516 \text{ mg}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$); esto, además es concordante con el estudio de Galván et al. (2023), quienes resaltan que el cianuro permite una alta eficiencia de extracción (típicamente entre 85% al 95%), es relativamente selectivo y aplicable a diversos tipos de depósitos auríferos. Aunque existen preocupaciones ambientales, Li et al. (2021) señalan que las tecnologías modernas de tratamiento de efluentes y las prácticas de gestión mejoradas han reducido significativamente los riesgos asociados al uso del cianuro.

Por otro lado, la implementación de un Sistema de Riego Diferenciado (SRD) emerge como un enfoque innovador para optimizar el uso de cianuro y mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación. Xie et al. (2021) destacan que un control preciso de la dosificación de cianuro permite minimizar la disolución de metales no deseados y mejorar la cinética de lixiviación. Este enfoque no solo optimiza el proceso desde el punto de vista técnico y económico, sino que también contribuye a reducir el impacto ambiental. Oraby et al. (2019) demostraron que ajustar la concentración de lixivante según las necesidades específicas de cada celda puede reducir significativamente el consumo de reactivos sin comprometer la recuperación de oro. Además, Soltani et al. (2020) encontraron que la adición controlada de nitrato de plomo puede mejorar significativamente la cinética de lixiviación y la recuperación de oro en minerales refractarios, ilustrando el potencial de este enfoque para optimizar procesos complejos de extracción.

La industria minera global enfrenta desafíos significativos debido a la disminución de las leyes de mineral aurífero y la necesidad de incrementar la eficiencia en la lixiviación del oro mientras se minimizan los impactos ambientales. Según el informe de Gold Fields Limited (2021), con operaciones en Australia, Perú, Sudáfrica y África Occidental, produjo

2,34 millones de onzas de oro equivalente en 2021, enfrentando desafíos en eficiencia operativa y costos, habiendo invertido US\$61 millones en exploración cercana a la mina para extender la vida útil de sus activos. Esta tendencia se observa en múltiples operaciones a nivel mundial, como lo evidencia el portal de Ey Canada National (2021), precisando que, la disminución de las leyes de mineral está conllevando a las principales compañías mineras de oro, a optar por las fusiones o adquisiciones; habiendo gastado entre el 2010 y 2019, de 69,5 mil millones de dólares, un 76% en adquisiciones para reemplazar el 53% de las reservas; el portal además precisa que, el promedio de vida de la mina de los principales mineros fue de 12 años en 2020, y solo el 10% de las minas tiene una vida mayor a 20 años. Así mismo; en el caso de las minas de oro australianas, un estudio revela que, las leyes de oro están en declive, y se espera que continúen en la próxima década, conduciendo a mayores intensidades de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) en ausencia de otras intervenciones de reducción (Ulrich et al., 2020). Esto subraya la importancia de mejorar la eficiencia en los procesos de extracción y lixiviación para mitigar el impacto ambiental.

Frente a estos desafíos, la optimización de los procesos de lixiviación se ha vuelto crucial. Un estudio realizado por Breuer et al. (2021), publicado en Hydrometallurgy, demuestra que la implementación de sistemas de riego diferenciado en una mina de oro en Australia logró reducir el consumo de cianuro en un 15% y aumentar la recuperación de oro en un 3%, mientras disminuía la disolución de cobre en un 20%. Este enfoque se alinea con las observaciones de Eksteen y Oraby (2015), quienes en su investigación publicada en Minerals Engineering, destacan la importancia de controlar la concentración de cianuro para minimizar la disolución de metales no deseados y optimizar la recuperación de oro en minerales de baja ley.

En el contexto peruano, la problemática de la disminución de leyes de mineral

aurífero y la necesidad de optimizar los procesos de lixiviación es igualmente apremiante. Según el Ministerio de Energía y Minas del Perú (2021), la producción global de oro en el país disminuyó un 13,5% entre 2016 y 2021, en parte debido a la reducción de leyes en yacimientos maduros. Un caso emblemático es el de Minera Yanacocha, que según su reporte de sostenibilidad (2021), experimentó una disminución en la ley promedio de 0,7 g/t en 2015 a 0,4 g/t en 2020, obligando a la compañía a implementar estrategias de optimización en sus procesos de lixiviación. Esta tendencia se observa en otras operaciones peruanas, como lo evidencia el estudio de Quispe-Aquino et al. (2019), publicado en la Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, que analiza la optimización de procesos de lixiviación en minas de oro peruanas. Los autores destacan que la implementación de sistemas de riego controlado y la optimización de la concentración de cianuro pueden mejorar la recuperación de oro entre un 2% y 5%, mientras se reduce el consumo de cianuro hasta en un 20%. Estos hallazgos son consistentes con las investigaciones de Navarro et al. (2018), publicadas en Hydrometallurgy, que subrayan la importancia de adaptar los parámetros de lixiviación a las características específicas de cada yacimiento para maximizar la eficiencia y minimizar los impactos ambientales en operaciones mineras peruanas.

En la compañía minera objeto de estudio, de la región La Libertad, ubicada a una altitud media de 3,400 msnm, es una operación minera aurífera que utiliza el método de lixiviación en pilas para la extracción de oro. El yacimiento se caracteriza por ser un depósito epitermal de alta sulfuración, emplazado en areniscas cuarzosas de la Formación Chimú, en contacto con un stock intrusivo subvolcánico de composición Pórfido Andesítico. La mineralización, principalmente asociada a óxidos de hierro, se presenta en horizontes de areniscas y en vetas delgadas. La mina ha estado en operación desde 2011, combinando

actividades de producción con la continua expansión y optimización de sus instalaciones.

A medida que la compañía minera se acercaba al proceso de cierre de operaciones, enfrentaba múltiples desafíos críticos. La disminución de las leyes de mineral, evidenciada por la reducción gradual de 0,455 g/t en 2018 a 0,364 g/t en 2021 (Anexo 1.a), amenazaba la viabilidad económica de la extracción. Esta situación se agravaba por el alto consumo de cianuro, que en 2018 alcanzaba los 154 ppm en la solución de riego, representando un costo significativo de aproximadamente 0,25 kg NaCN/oz Au producida; aunque se logró reducir la concentración a alrededor de 80 ppm en 2021, el consumo seguía siendo considerable (Anexo 1.a). El costo del cianuro, que fluctuaba entre \$2.500,00 y \$3.000,00 por tonelada, implicaba un gasto anual de varios millones de dólares en reactivos. Adicionalmente, la disolución de metales no deseados como cobre y mercurio en la solución rica (con concentraciones que llegaban hasta 16 ppm y 3 ppm respectivamente, Anexo 1.b) no solo complicaba el proceso de recuperación, sino que también aumentaba los costos de tratamiento de efluentes y gestión ambiental. La necesidad de mantener una recuperación de oro estable (alrededor del 86%) mientras se enfrentaban estos desafíos, ponía de manifiesto la urgencia de optimizar el proceso de lixiviación.

Los resultados desfavorables mencionados, en gran medida, eran consecuencia de las limitaciones del sistema convencional de riego utilizado en las celdas de lixiviación; el cual se caracterizaba por una aplicación uniforme de la solución cianurada en todo el pad, sin distinción entre celdas frescas y agotadas, operando con un flujo constante de aproximadamente 1950 m³/h, distribuido equitativamente entre todas las celdas, independientemente de su estado de lixiviación. El sistema constaba de bombas barren para el envío de solución desde la planta ADR, un proceso de make-up de cianuro en los tanques barren para todo el flujo de procesamiento, y bombas de refuerzo en la plataforma de re-

bombeo para la distribución final (Anexo 1.c). Esta configuración carecía de la flexibilidad necesaria para adaptar la concentración y el flujo de cianuro a las necesidades específicas de cada zona del pad, lo que contribuía al consumo excesivo de reactivo, la disolución innecesaria de metales no deseados en celdas agotadas, y una recuperación de oro subóptima en celdas con mineral fresco.

Ante esta problemática, la implementación de un SRD con dilución e inyección controlada, se presentaba como una solución integral; el cual estará compuesto por sistemas de dilución, impulsión e inyección de solución cianurada, posibilitaría aplicar concentraciones más altas (entre 70 y 100 ppm) a las celdas con mineral fresco, mientras se reducía la concentración a 40 ppm en las celdas agotadas. Este sistema permitiría ajustar dinámicamente la concentración de cianuro según las necesidades específicas de cada celda del pad de lixiviación, optimizando el consumo del reactivo sin comprometer la recuperación de oro.

En consideración de la problemática expuesta, la investigación se justifica por las siguientes razones:

Bajo el criterio de conveniencia, la implementación del SRD, permitirá reducir el consumo global de cianuro, así también minimizar la disolución de metales no deseados, mejorando así la calidad de la solución rica y reduciendo los costos de tratamiento posterior. Además, el sistema permitiría un mejor control del flujo y la distribución de la solución, optimizando la cinética de lixiviación y potencialmente mejorando la recuperación de oro en minerales de baja ley. Esto se constituirá en una estrategia clave para extender la vida útil de la mina, incrementar la productividad, la consecuente rentabilidad y reducir el impacto ambiental.

En respuesta a su relevancia social, en primer lugar, al optimizar el proceso de lixiviación y extender la vida útil de la mina, se contribuye a la estabilidad laboral de los trabajadores y al sostenimiento económico de la comunidad local de Huamachuco. La minería es una fuente importante de empleo y desarrollo en la región, y la prolongación de las operaciones mineras de manera eficiente y sostenible beneficia directamente a la población. Además, la reducción en el consumo de cianuro y la mejora en la gestión de efluentes disminuyen los riesgos ambientales asociados con la operación minera. Esto se traduce en una mejor calidad de vida para las comunidades aledañas, al minimizar los potenciales impactos negativos sobre los recursos hídricos y el ecosistema local. La optimización del uso de recursos, como el agua y la energía, también contribuye a la sostenibilidad ambiental de la región. Por último, al mejorar la eficiencia y rentabilidad de la operación minera, se asegura una mayor contribución económica a través de impuestos y regalías, lo cual puede traducirse en mejores servicios públicos e infraestructura para la comunidad.

A nivel de aporte teórico, esta investigación contribuye significativamente al cuerpo de conocimientos en el campo de la hidrometalurgia y, específicamente, en la optimización de procesos de lixiviación de oro. El estudio proporciona evidencia empírica sobre la eficacia de un enfoque de riego diferenciado en la lixiviación de oro, un área donde la literatura actual es limitada. Así mismo, se explora la relación entre la concentración de cianuro, el flujo de solución y la eficiencia de lixiviación en diferentes etapas del ciclo de vida de las celdas de lixiviación. Esto aporta nuevos conocimientos sobre la cinética de lixiviación del oro en condiciones variables, lo cual es valioso para el desarrollo de modelos predictivos más precisos en la industria minera. Además, el estudio aborda la problemática de la extracción de oro en yacimientos con leyes decrecientes, un desafío cada vez más común en la industria

minera global. Los resultados de esta investigación pueden servir como base para futuras investigaciones sobre la optimización de procesos mineros en condiciones similares.

Así también la investigación tiene un aporte metodológico; al respecto, el diseño pre-experimental, con mediciones antes y después de la implementación del SRD, ofrece un enfoque claro para determinar la causalidad entre la intervención y los cambios en eficiencia y productividad. La operacionalización detallada de las variables de eficiencia de lixiviación y productividad de recuperación de oro, junto con la selección de indicadores específicos, proporciona un marco conceptual y operativo integral. El análisis de múltiples ciclos de lixiviación permite capturar tendencias a largo plazo y variaciones estacionales, crucial para distinguir entre efectos inmediatos y sostenidos. La integración de datos operativos de campo con análisis de laboratorio ofrece una visión holística del proceso. Además, la inclusión de indicadores económicos y ambientales en el análisis aporta una perspectiva práctica orientada a la toma de decisiones. Esta metodología no solo es válida para el caso específico de la minera, sino que establece un modelo adaptable y replicable para la evaluación de mejoras tecnológicas en diversas operaciones mineras, contribuyendo así al avance de las prácticas de investigación en el campo de la hidrometalurgia y la optimización de procesos mineros.

1.2. Formulación del problema

¿En qué medida un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio impacta en la productividad de la recuperación del oro, La Libertad, 2024?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la medida en que un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio impacta en la productividad de la recuperación del oro, La Libertad, 2024.

1.3.2. Objetivos específicos

- ✓ Diagnosticar el nivel de un SRD basado en el control de procesos, según la infraestructura de control, y las capacidades de control, antes de la implementación del SRD.
- ✓ Implementar un SRD basado en el control de procesos con dilución e inyección controlada para optimizar la eficiencia de lixiviación del oro, mediante el ajuste dinámico de la concentración de cianuro y el flujo de solución según las necesidades específicas de cada celda.
- ✓ Evaluar los resultados de la implementación del SRD basada en el control de procesos, al comparar la productividad en la recuperación del oro del pre test y post test, según la cinética de lixiviación, la eficiencia en el consumo de los recursos y el rendimiento de recuperación del oro.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

H_i: Un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio tiene un impacto significativo en la productividad de la

recuperación del oro.

H_0 : Un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio no tiene un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro.

1.4.2. Hipótesis específicas

✓ H_{i1} : Un SRD basado en el control de procesos tiene un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro según la cinética de lixiviación.

✓ H_{i2} : Un SRD basado en el control de procesos tiene un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro según la eficiencia en el consumo de los recursos.

✓ H_{i3} : Un SRD basado en el control de procesos tiene un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro según el rendimiento de recuperación del oro.

1.5. Antecedentes

A continuación, se presenta un conjunto de análisis de antecedentes que contribuyen en el proceso de abstracción de la problemática objeto de estudio:

Petersen (2016) en su artículo "Heap Leaching as a Key Technology for Recovery of Values from Low-grade Ores – A Brief Overview" publicado en *Hydrometallurgy*, examina la tecnología de lixiviación en pilas como método clave para recuperar metales valiosos de minerales de baja ley. El objetivo principal del estudio es proporcionar una visión general de los principios, ventajas económicas y desafíos técnicos de la lixiviación en pilas. La metodología empleada es de tipo descriptivo y analítico, basándose en una revisión exhaustiva de la literatura y datos de operaciones industriales; el autor utiliza un enfoque multidisciplinario que combina principios de ingeniería química, geología y economía para

analizar los procesos de lixiviación en pilas a diferentes escalas, empleando modelos matemáticos y simulaciones computacionales para describir los fenómenos de transporte y reacción. Para el análisis económico comparativo, se utilizó un caso de estudio de un yacimiento de zinc, evaluando tres opciones de procesamiento mediante un modelo de flujo de caja descontado, considerando variables como inversión de capital, costos operativos, precios de los metales y tasas de recuperación. Los resultados mostraron que la lixiviación en pilas puede ser económicamente competitiva para minerales de baja ley, con un Valor Presente Neto (VPN) de 1,71 mil millones de ZAR para la opción de lixiviación en pilas, comparado con 1,17 y 0,82 mil millones de ZAR para las opciones de concentración y concentración más refinación, respectivamente. Sin embargo, el proceso enfrenta desafíos significativos, como la lenta cinética de lixiviación, con tiempos de extracción de hasta 300 días para alcanzar una recuperación del 73% en el caso del zinc. Se identificaron problemas de permeabilidad en las pilas, con la formación de canales preferenciales de flujo que pueden reducir la eficiencia de contacto entre la solución lixivante y el mineral en hasta un 30%. El estudio también reveló que la lixiviación en pilas es particularmente sensible a las fluctuaciones en los precios de los metales y los costos de capital de trabajo, destacando la importancia de optimizar la distribución de la solución lixivante y mejorar la permeabilidad de las pilas para maximizar la eficiencia y viabilidad económica del proceso.

Este antecedente es particularmente relevante, ya que proporciona evidencia cuantitativa sobre la importancia crítica de la distribución de la solución lixivante y la permeabilidad de las pilas en la eficiencia del proceso. Los datos sobre tiempos de lixiviación y tasas de recuperación ofrecen puntos de referencia valiosos para evaluar los potenciales beneficios de un sistema de riego diferenciado en la lixiviación de oro, permitiendo una evaluación más precisa de su impacto en la eficiencia del proceso y la viabilidad económica de la operación.

Medina y Anderson (2020) en su artículo "A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates" publicado en *Metals*, examinan los procesos hidrometalúrgicos existentes para el tratamiento de minerales y concentrados de plata, cobre y oro mediante cianuración. El estudio emplea una metodología descriptiva y analítica, basada en una revisión exhaustiva de literatura y datos operativos industriales, analizando en detalle los mecanismos químicos de lixiviación con cianuro, factores que afectan su consumo, y técnicas de recuperación de oro como la adsorción en carbón activado. Los autores evalúan diversas opciones de procesamiento para minerales de oro-cobre, con énfasis en el proceso SART. Los resultados mostraron que la presencia de cobre en minerales auríferos aumenta significativamente el consumo de cianuro, pudiendo alcanzar hasta 30 kg/t de mineral cuando la concentración de cobre en solución llega a 1000 ppm. El proceso SART demostró ser una solución efectiva, capaz de recuperar hasta el 90% del cobre disuelto como Cu_2S comercializable y reciclar el cianuro, reduciendo su consumo hasta en un 50% y disminuyendo los costos operativos. Los autores concluyen que la implementación de tecnologías como el SART, junto con un control preciso del pH y la concentración de cianuro durante la lixiviación, son cruciales para optimizar la recuperación de oro en minerales complejos de oro-cobre, mientras se minimizan los impactos ambientales y se mejora la eficiencia económica del proceso.

Este antecedente es altamente relevante para la investigación, puesto que proporciona conocimiento valioso respecto de los desafíos de lixiviar minerales complejos de oro-cobre y las estrategias para superarlos. La discusión detallada sobre el control de la concentración de cianuro y pH durante la lixiviación ofrece una base sólida para el diseño de un sistema de riego diferenciado que podría optimizar estos parámetros en tiempo real, mejorando la eficiencia de lixiviación y reduciendo costos. Además, la integración de conceptos del proceso SART en un sistema de riego diferenciado podría proporcionar una solución

innovadora para manejar los complejos de cobre-cianuro, potencialmente revolucionando la eficiencia y sostenibilidad de la lixiviación de oro en minerales complejos.

Altinkaya et al. (2020) en su artículo "Leaching and recovery of gold from ore in cyanide-free glycine media" publicado en *Minerals Engineering*, investigaron la lixiviación alcalina con glicina como alternativa a la cianuración convencional para la recuperación de oro de minerales de origen epitermal. El estudio empleó una metodología experimental combinada con análisis estadístico, utilizando un diseño central compuesto de cara centrada (CCF) para optimizar los parámetros de lixiviación. Se utilizó una muestra de mineral de oro con 5,4 ppm Au, caracterizada mediante XRF, ICP-OES y análisis mineralógico. Los experimentos de lixiviación se realizaron en un reactor de vidrio de 1 L, variando la concentración de glicina (0,5-2 M), temperatura (20-60°C) y pH (10-12), con un tiempo de lixiviación fijo de 24 horas y una relación sólido/líquido de 100 g/L. El análisis estadístico se realizó mediante el software MODDE 12,0, evaluando la significancia de los parámetros con valores P y coeficientes de determinación múltiple. Los resultados mostraron que la temperatura y el pH tienen un impacto significativo en la disolución del oro, mientras que la concentración de glicina no tuvo un efecto estadísticamente significativo en el rango estudiado. Bajo las condiciones óptimas identificadas (1,25 M de glicina, 60°C, pH 12), se logró una extracción de oro del 90% en 24 horas, superando el 80% obtenido con cianuración convencional (0,75 g/L NaCN). Además, se evaluaron dos métodos de recuperación de oro de la solución: adsorción con carbón activado, logrando una recuperación del 100% en 4 horas, y electrodeposición-reemplazo redox (EDRR), alcanzando un 88% de recuperación en solución sintética pero solo 35% en la solución real de lixiviación.

El antecedente proporciona evidencia sólida de que un lixivante alternativo como la glicina puede superar la eficiencia de la cianuración convencional en ciertos tipos de minerales. El estudio destaca la importancia crítica de la temperatura y el pH en el proceso

de lixiviación, factores que podrían optimizarse mediante un sistema de riego diferenciado. Además, la metodología de diseño experimental y análisis estadístico utilizada ofrece un modelo valioso para la optimización de parámetros en sistemas de lixiviación complejos. La comparación directa con la cianuración convencional proporciona un punto de referencia útil para evaluar la eficacia de nuevos enfoques en la lixiviación de oro. Aunque el estudio se centra en la glicina, los principios de optimización y control de parámetros son aplicables al desarrollo de sistemas de riego diferenciado con cianuro, potencialmente mejorando la eficiencia y reduciendo el consumo de reactivos.

Surimbayev et al. (2024) en su artículo "Effect of sodium acetate additive on gold leaching with cyanide solution: Laboratory and semi-pilot leaching tests" publicado en Heliyon, investigaron el efecto de la adición de acetato de sodio en la extracción de oro mediante lixiviación con cianuro. El estudio empleó una metodología experimental a escala de laboratorio y semi-piloto, utilizando muestras de mineral de oro del yacimiento Akshoky con un contenido promedio de 1,32 g/t Au y 3,27 g/t Ag. Se realizaron pruebas de lixiviación en botellas con diferentes concentraciones de acetato de sodio (0,1, 0,5 y 1,0 kg/t) y pruebas de lixiviación en columnas simulando condiciones de lixiviación en pilas. El análisis mineralógico reveló que el 82% del oro estaba en forma libre/nativa. Los experimentos de laboratorio se realizaron por triplicado para asegurar la reproducibilidad, mientras que las pruebas semi-piloto se realizaron por duplicado. El análisis de los resultados se basó en la cuantificación del oro extraído mediante ensayo al fuego y espectroscopía de absorción atómica. Los resultados mostraron que la adición de acetato de sodio aumentó la extracción de oro del 83,08% al 86,61% en las pruebas de laboratorio, y del 55,30% al 62,9% en las pruebas semi-piloto de lixiviación en columnas. Los autores proponen un mecanismo donde el acetato de sodio interactúa con los minerales sulfurados y los compuestos metálicos que bloquean la superficie del oro, formando acetatos metálicos que permiten un mejor acceso

de la solución lixivante a las partículas de oro.

Este antecedente demuestra que la adición de un reactivo auxiliar como el acetato de sodio puede mejorar significativamente la extracción de oro en condiciones de lixiviación en pilas. El estudio proporciona evidencia experimental tanto a escala de laboratorio como semi-piloto, lo que aumenta su aplicabilidad práctica. La mejora en la extracción de oro observada (7,6% en las pruebas semi-piloto) sugiere que la incorporación de acetato de sodio en un sistema de riego diferenciado podría optimizar aún más la eficiencia del proceso de lixiviación. Además, el mecanismo propuesto de interacción entre el acetato de sodio y los minerales sulfurados ofrece una base teórica para entender cómo se podría mejorar el acceso del cianuro a las partículas de oro en diferentes zonas del mineral, lo cual es un concepto clave en el diseño de sistemas de riego diferenciado.

Choque y Morales (2018) realizaron la investigación "Optimización del proceso de lixiviación en la recuperación de oro" en la Unidad Corihuarmi de Minera IRL S.A. en Huamachuco, Perú, a 4,800 msnm. El objetivo fue optimizar el proceso de lixiviación para mejorar la recuperación de oro en un yacimiento epitermal de alta sulfuración. La metodología siguió un diseño experimental factorial completo 2^3 con 3 variables (X1: concentración de NaCN en curado, X2: tiempo de reposo y X3: concentración de NaCN en riego) a 2 niveles cada una (X1: 500-1500 ppm, X2: 24-72 horas, X3: 40-120 ppm), más 2 réplicas centrales, totalizando 10 pruebas. Se utilizaron muestras compuestas de 120 kg de mineral de los tajos Susan y Scree Slope en proporción 2:1, preparadas a malla -2", con una ley de cabeza calculada entre 0,549-0,627 g/t Au. Las pruebas se realizaron en columnas de lixiviación de 8,27 pulgadas de diámetro y 2,3 m de altura, por 29 días, con un flujo de riego de 10 L/h-m². Se monitoreó la recuperación de oro mediante análisis químicos diarios de las soluciones pregnant y ripios finales. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) y se obtuvo un modelo matemático por regresión múltiple, utilizando el software

Excel. Los resultados del ANOVA mostraron que la variable más significativa fue X1 ($F=272,57 > F \text{ crítico}=199,5$), seguida por X3 ($F=62,12$) y la interacción X1X3 ($F=30,60$). Se logró una recuperación máxima de 71,86% con X1=1500 ppm, X2=24 h y X3=120 ppm. Se concluyó que para optimizar el proceso se debe trabajar con concentraciones de curado entre 1000-1500 ppm, tiempos de reposo de 24-48 horas y concentraciones de riego de 40-80 ppm de NaCN, lo que permitiría reducir el consumo de reactivos de 0,092 a 0,065 kg NaCN/t y mantener recuperaciones superiores al 70%.

Este antecedente proporciona una metodología experimental robusta y resultados cuantitativos específicos para evaluar los parámetros clave del proceso y su impacto en la recuperación de oro. El uso de un diseño factorial y análisis estadístico permitió identificar las variables más influyentes y sus rangos óptimos de operación, lo cual es directamente aplicable al diseño de un sistema de riego diferenciado. Los hallazgos sobre la concentración de cianuro en el curado (X1) y su interacción con la concentración en el riego (X3) son particularmente valiosos, ya que sugieren que un sistema de riego diferenciado que permita variar estas concentraciones según la etapa de lixiviación podría lograr mejoras significativas en la eficiencia del proceso. Además, los rangos recomendados para las variables del proceso y las ecuaciones matemáticas desarrolladas proporcionan un punto de partida sólido para la optimización del sistema propuesto, permitiendo potencialmente reducir el consumo de reactivos mientras se mantienen altas tasas de recuperación.

1.6. Marco teórico

A continuación, es preciso presentar los argumentos esenciales como respaldo a la presente investigación:

1.6.1. Fundamentos de la Lixiviación de Oro

1.6.1.1. Proceso de Cianuración

La cianuración constituye el método hidrometalúrgico más importante para la extracción de oro, fundamentado en la capacidad del oro para formar complejos estables en soluciones alcalinas de cianuro (Marsden & House, 2019). Este proceso involucra principios termodinámicos y cinéticos específicos que determinan su eficacia.

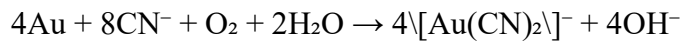
Termodinámica y cinética de la disolución del oro

La disolución del oro en soluciones cianuradas se fundamenta en principios termodinámicos que establecen la factibilidad de las reacciones químicas. Según Gökelman et al. (2019), la reacción de disolución del oro requiere la presencia simultánea de un agente complejante (CN^-) y un agente oxidante (O_2), operando en condiciones alcalinas específicas para mantener la estabilidad del cianuro.

El proceso termodinámico se representa mediante el diagrama Eh-pH (Pourbaix), donde se identifican las zonas de estabilidad del complejo aurocianuro $[\text{Au}(\text{CN})_2]^-$. La ventana operativa óptima se establece en rangos de pH entre 10-11 y potenciales de oxidación entre -0,4 y 0,8V (Adams & Lloyd, 2020).

Reacciones principales

La formación del complejo oro-cianuro sigue la ecuación de Elsner:



Esta reacción global involucra múltiples etapas intermedias, incluyendo: Difusión del oxígeno y cianuro hacia la superficie del oro; adsorción de los reactantes en sitios activos; transferencia de electrones; formación del complejo aurocianuro; y desorción y difusión de productos (Zhang et al., 2021).

1.6.1.2. Cinética de Lixiviación

La velocidad de lixiviación del oro depende de varios factores, incluyendo la concentración del agente lixivante, la temperatura, el pH, la presencia de oxidantes, y las características físicas del mineral. Liu et al. (2022), señalan que la cinética de lixiviación puede ser descrita por modelos como el de núcleo sin reaccionar, que considera la difusión del reactivo a través de una capa de producto formada alrededor de las partículas de oro.

En el caso específico de la lixiviación con cianuro, la cinética se ve afectada por la concentración de cianuro, oxígeno disuelto, y la presencia de iones metálicos que pueden formar complejos competitivos. Yu et al. (2020), citado en Galván et al. (2023), destaca que, la optimización de estos parámetros es crucial para mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación, reduciendo el tiempo de reacción y aumentando la recuperación de oro

Factores que controlan la velocidad de disolución:

La velocidad de disolución del oro está controlada por diversos factores fisico-químicos. De acuerdo con Eksteen y Oraby (2022), los principales factores incluyen: Concentración de cianuro libre; concentración de oxígeno disuelto; temperatura de la solución; pH del medio; grado de agitación o velocidad de flujo; tamaño de partícula del oro; y presencia de iones interferentes.

Curvas típicas de extracción:

Las curvas de extracción representan el comportamiento cinético del proceso,

mostrando la recuperación de oro en función del tiempo. Típicamente siguen un patrón logarítmico, con una fase inicial rápida seguida de una etapa más lenta (Li & Miller, 2020).

Efecto de la concentración de cianuro:

La concentración de cianuro libre es un factor crítico que influye directamente en la velocidad de disolución. Estudios realizados por Velásquez-Yévenes et al. (2018) demuestran que:

- Existe una concentración óptima de cianuro para cada tipo de mineral
- El exceso de cianuro no necesariamente mejora la cinética
- La concentración debe mantenerse por encima de un nivel mínimo para sostener la reacción.

Así mismo, Velásquez-Yévenes y Meza-García (2022) demostraron que la concentración óptima varía según: Mineralogía del depósito; granulometría del mineral; presencia de especies interferentes; y condiciones operativas específicas.

Impacto del flujo y tiempo de lixiviación:

El flujo de solución y el tiempo de contacto son variables operativas fundamentales.

Wang y Forssberg (2021) establecen que:

- La velocidad de flujo afecta la transferencia de masa
- Existe una relación directa entre el tiempo de contacto y la recuperación final
- El flujo óptimo depende de las características del mineral y la configuración del sistema

1.6.1.3. Interferencias en la Lixiviación

Reacciones competitivas del cianuro:

Las reacciones competitivas constituyen uno de los principales desafíos en la cianuración. Según Breuer y Jeffrey (2019), las principales interferencias incluyen: Oxidación del cianuro; formación de tiocianato; precipitación de sales básicas; complejos con metales base.

Formación de complejos metálicos y consumo de reactivos:

La presencia de minerales de cobre y mercurio afecta significativamente el proceso de cianuración. Los complejos formados pueden: Competir por el cianuro disponible; afectar la cinética de disolución del oro; incrementar el consumo de reactivos; incluso contaminar el carbón activado en el proceso de adsorción.

Eksteen et al. (2021) identificaron que: La formación de $\text{Cu}(\text{CN})_3^{2-}$ predomina a $\text{pH} > 10$; el consumo de cianuro puede alcanzar 4 moles por mol de cobre; y la presencia de cobre puede incrementar el consumo de cianuro hasta en un 300%; por su parte, Breuer y Jeffrey (2024) establecieron que, la formación de $\text{Hg}(\text{CN})_4^{2-}$ es termodinámicamente favorable; el mercurio puede incrementar el consumo de cianuro hasta en un 200%; y la presencia de mercurio afecta la posterior recuperación con carbón activado.

Estrategias de Mitigación y Control:

Adams y Lloyd (2023) proponen un enfoque integrado para el manejo de interferentes:

Control de pH: Mantener $\text{pH} > 10,5$ para minimizar la formación de HCN; y optimizar la alcalinidad para estabilizar complejos.

Dosificación selectiva: Ajuste dinámico de la concentración de cianuro; e implementación de sistemas de control en tiempo real.

1.6.2. Sistema de Riego Diferenciado (SRD)

1.6.2.1. Definición:

El sistema de riego diferenciado en la lixiviación es una estrategia que busca optimizar el uso de cianuro ajustando su concentración según las necesidades específicas de diferentes zonas o etapas del proceso de lixiviación. Este enfoque se basa en el principio de que las necesidades de cianuro varían a lo largo del ciclo de lixiviación y entre diferentes áreas del mineral (Petersen, 2016).

1.6.2.2. Implementación y control:

La implementación de un sistema de riego diferenciado requiere una infraestructura que permita la dosificación selectiva de cianuro en diferentes puntos del proceso. Esto incluye sistemas de bombeo, válvulas de control, y sensores para monitorear la concentración de cianuro y otros parámetros relevantes (Oraby & Eksteen, 2015).

El control preciso de la concentración de cianuro en diferentes zonas del proceso es crucial para el éxito de esta estrategia. Técnicas avanzadas de monitoreo en línea y control automático son esenciales para mantener las concentraciones deseadas y responder a cambios en las condiciones del proceso (Senanayake, 2019).

1.6.2.3. Beneficios y desafíos:

Los principales beneficios teóricos del sistema de riego diferenciado incluyen la reducción del consumo total de cianuro, la mejora en la cinética de lixiviación en las etapas iniciales del proceso, y la disminución de la disolución de metales no deseados en las etapas finales (Petersen, 2016). Sin embargo, la implementación de este sistema también presenta desafíos, como la necesidad de una inversión inicial en infraestructura y la complejidad añadida al control del proceso.

1.6.2.4. Fundamentos del Control de Procesos

Principios de control automático: De acuerdo con Johnson y Kappes (2023), los principios fundamentales del control automático en sistemas de riego diferenciado se basan en:

La necesidad de mantener una distribución uniforme de solución; el control preciso de las tasas de aplicación; la respuesta dinámica a cambios en las condiciones de operación; y la integración de múltiples variables de proceso.

Según Bartlett (2024), la aplicación de estos principios permite reducir la variabilidad operacional hasta en un 45%.

Lazos de control: McBride y Thompson (2024), establecen tres niveles de control: Control regulatorio básico; control supervisorio; y control optimizante.

Control por retroalimentación: La implementación del control por retroalimentación, según Velásquez et al. (2023), debe considerar: Tiempos de respuesta del proceso; características dinámicas del sistema; restricciones operacionales; e interacciones entre variables.

1.6.2.5. Infraestructura de Control Base

Flujómetros electromagnéticos: Según McPhail y van Zyl (2024), los flujómetros electromagnéticos representan un componente crítico en sistemas de riego diferenciado, ya que permiten una medición precisa y confiable del flujo de solución lixivante, factor determinante en la cinética de extracción. Los autores destacan que la ausencia de medición precisa de flujos puede resultar en variaciones de hasta $\pm 25\%$ en las tasas de riego efectivas, impactando directamente en la recuperación de mineral. La implementación de flujómetros electromagnéticos ha demostrado reducir esta variabilidad a menos del 2%, mejorando

significativamente el control del proceso y la recuperación metalúrgica.

Sensores de nivel y presión: De acuerdo con Velásquez y Thompson (2023), los sensores de nivel y presión constituyen el núcleo del sistema de monitoreo y control en tiempo real. Su investigación demuestra que la integración de estos sensores permite detectar anomalías operativas con hasta 4 horas de anticipación, previniendo pérdidas significativas en la producción. Los autores señalan que las operaciones que implementaron sistemas robustos de medición de nivel y presión reportaron una reducción del 35% en eventos de taponamiento y una mejora del 28% en la uniformidad de riego.

Válvulas de control proporcional: Breitenbach et al. (2024), enfatizan que las válvulas de control proporcional son fundamentales para mantener una distribución uniforme de solución. Su investigación demuestra que la implementación de válvulas de control proporcional, en reemplazo de válvulas convencionales, resultó en una mejora del 40% en la uniformidad de riego y una reducción del 25% en el tiempo de lixiviación. Los autores subrayan que estas válvulas son especialmente críticas en condiciones de operación variable, donde la capacidad de ajuste fino puede significar la diferencia entre una operación estable y una con frecuentes interrupciones.

Bombas con variador de frecuencia: Según el estudio de Roberts y Chen (2023), las bombas con variador de frecuencia representan un elemento crucial en la optimización del sistema de riego. Su investigación demuestra que la implementación de estos sistemas permite una reducción del 30% en el consumo energético, mientras mantiene una precisión de control superior al 98% en el flujo objetivo. Los autores destacan que la capacidad de ajuste continuo de la velocidad de bombeo no solo optimiza el consumo energético, sino que

también extiende la vida útil de los equipos en hasta un 40%, reduciendo significativamente los costos de mantenimiento y las paradas no programadas.

1.6.3. Productividad en la recuperación del oro

1.6.3.1. Conceptualización y alcance

La productividad en procesos hidrometalúrgicos trasciende la simple relación cuantitativa entre productos obtenidos y recursos utilizados. Representa un concepto multidimensional que integra la eficiencia técnica con la optimización de recursos en un sistema dinámico y complejo (Habashi, 2021). Esta conceptualización implica entender la productividad como un indicador holístico que refleja no solo la capacidad del sistema para recuperar metales preciosos, sino también su habilidad para hacerlo de manera sostenible y económicamente viable.

La dimensión técnica de la productividad se entrelaza con aspectos termodinámicos y cinéticos, donde la eficiencia del proceso está determinada por la optimización de las condiciones que favorecen las reacciones deseadas mientras minimizan las interferencias (Adams & Nicol, 2023). Este enfoque integral permite comprender la productividad como un concepto que evoluciona desde una perspectiva puramente cuantitativa hacia una visión sistémica del proceso.

1.6.3.2. Factores que afectan o condicionan la productividad en la recuperación

La comprensión de los factores que influyen en la productividad requiere un análisis desde la perspectiva de sistemas complejos interrelacionados. Marsden y House (2019) argumentan que la productividad emerge de la interacción sinérgica entre factores químicos, físicos y operacionales, donde cada elemento influye y es influido por los demás en una red de relaciones dinámicas.

La naturaleza interdependiente de estos factores se manifiesta en cómo las

condiciones químicas del sistema modifican las propiedades físicas del mineral, mientras que las características físicas del material influyen en la cinética de las reacciones químicas. Esta interrelación crea un sistema donde la optimización debe considerar el impacto global de cualquier modificación en las variables del proceso (Senanayake, 2020).

1.6.3.3. Eficiencia en el consumo de recursos

La eficiencia en el consumo de recursos debe entenderse como un concepto que va más allá del simple ahorro de insumos. Thompson (2021) plantea que la verdadera eficiencia surge de la comprensión profunda de los mecanismos de reacción y las interacciones moleculares que gobiernan el proceso. Esta perspectiva permite desarrollar estrategias de optimización basadas en principios fundamentales, en lugar de aproximaciones empíricas.

La gestión eficiente de recursos implica un equilibrio dinámico entre la intensidad del proceso y su selectividad. Wang y Chen (2023) argumentan que este balance requiere comprender los diferentes parámetros operativos que interactúan para crear condiciones que maximicen la recuperación mientras minimizan el consumo de recursos.

1.6.3.4. Rendimiento de recuperación

El rendimiento de recuperación debe conceptualizarse como una manifestación de la eficiencia global del sistema, que integra aspectos termodinámicos, cinéticos y operacionales. Davidson y Henderson (2022) proponen que el rendimiento es el resultado de la alineación óptima entre las condiciones termodinámicas que favorecen la disolución del metal y la cinética que permite alcanzar estas condiciones de manera eficiente.

La comprensión del rendimiento desde una perspectiva fundamental permite identificar las limitaciones intrínsecas del proceso y desarrollar estrategias para superarlas. Liu et al. (2023) argumentan que el rendimiento óptimo se alcanza cuando se logra un

equilibrio entre la velocidad de reacción y la selectividad del proceso, considerando las restricciones termodinámicas y las limitaciones prácticas de operación.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

Tipo: Investigación aplicada, cuantitativa, de alcance explicativo.

Según el fin que se persigue, se considera investigación aplicada, porque busca resolver un problema práctico en la industria minera: la optimización del proceso de lixiviación del oro.

Según el enfoque, es cuantitativa debido a que se basa en la medición y análisis de variables numéricas específicas relacionadas con el nivel de sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos y la productividad de recuperación de oro.

Así mismo, es de alcance explicativo porque no solo describe el fenómeno, sino que busca establecer las causas de los cambios en la productividad de recuperación de oro (variable dependiente) a partir de la implementación del Sistema de Riego Diferenciado con Dilución e Inyección Controlada y su efecto en la eficiencia de lixiviación.

Diseño: Experimental, tipo pre-experimento con pre-prueba y post-prueba con un solo grupo.

El diseño se representa como:

$O_1 \times O_2$

Donde: O_1 : Medición de la productividad de recuperación del oro antes de la implementación del SRD (desde febrero de 2021 a febrero de 2022)

X: Implementación del Sistema de Riego Diferenciado con Dilución e Inyección Controlada.

O₂: Medición de la productividad de recuperación del oro después de la implementación del SRD (de marzo de 2022 a octubre de 2024)

La implementación del SRD basado en el control de procesos implicó la instalación de los siguientes componentes:

- 1) Sistema de Dilución de Solución Concentrada:
 - ✓ Tanque de dilución de 3,6 m³ de capacidad
 - ✓ Bomba peristáltica para transferencia de cianuro concentrado
 - ✓ Válvula de control proporcional para regular el flujo de solución barren
 - ✓ Flujómetros electromagnéticos para medición y control
- 2) Sistema de Impulsión de Solución Cianurada Concentrada:
 - ✓ Bomba peristáltica de impulsión
 - ✓ Línea doble de acero al carbono de 1,5" (una en uso, otra en stand-by)
 - ✓ Flujómetro electromagnético y sensor de presión para monitoreo
 - ✓ Válvula de control ON/OFF para retrolavado de la tubería
- 3) Sistema de Inyección de Solución Cianurada:
 - ✓ Válvulas de control proporcional para cada línea de inyección
 - ✓ Flujómetros electromagnéticos para cada línea
 - ✓ Sensores de presión en cada línea de inyección

Este sistema permitió el control preciso de la concentración, flujo y distribución del cianuro en diferentes zonas del pad de lixiviación, optimizando el proceso de lixiviación del oro.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

Población: Conjunto de componentes, equipos o sistemas que conforman el sistema de riego diferenciado, y registros de los indicadores de productividad de recuperación de oro de todas las celdas de lixiviación del pad de la minera durante los períodos de pre-test y post-test.

Muestra: Se seleccionaron los componentes, equipos o sistemas relevantes que conforman el proceso de lixiviación los registros correspondientes a los ciclos completos de lixiviación de celdas con mineral fresco, y ciclos completos de lixiviación de celdas en etapa de agotamiento, para cada período (pre-test y post-test), considerando que cada ciclo de lixiviación dura aproximadamente 60 días.

Muestreo: No probabilístico, por conveniencia, considerando la integridad y representatividad de los datos de los ciclos seleccionados.

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

Análisis documental, definiéndose como instrumento a un checklist y una guía de revisión documental, según los indicadores de las variables de estudio:

Para la variable causa (sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos): El *checklist* se orientó a los indicadores de la dimensión infraestructura de control; entre tanto que la guía de revisión documental se orientó a los indicadores de la dimensión capacidad de control.

Para la variable efecto (Productividad de la recuperación de oro): Se utilizó exclusivamente la guía de revisión documental orientada a medir la cinética de lixiviación, la eficiencia en el consumo de los recursos y el rendimiento en la recuperación del oro.

Los datos fueron analizados, según lo siguiente:

- ✓ Análisis descriptivo: Medidas de tendencia central (la media) y de dispersión para los diversos indicadores.
- ✓ Análisis inferencial: Prueba t student para muestras independientes, comparando los indicadores antes y después de la implementación del SRD basado en el control de procesos, al 5% de significancia bilateral. Específicamente se hizo la comparación de medias a nivel de cinética de lixiviación (porcentaje de extracción del Au según los niveles de concentración del NaCN en ppm; y comparación de las concentraciones del Au en ppm entre la solución rica y la solución barren), comparación entre el pre y post test de la eficiencia en el consumo de recursos (Au recuperado en oz por kg y por costo del NaCN, consumo de NaCN en kg por TMS, y consumo de NaCN en kg según flujo y concentración) y comparación entre el pre y post test del rendimiento de recuperación del oro (producción del Au (oz) por TMS).
- ✓ Análisis de correlación: Para evaluar la relación al 5% de significancia bilateral, entre las concentraciones del reactivo o NaCN en riego y las concentraciones de minerales no deseados, como el Cu y el Hg, como un indicador de eficiencia en la lixiviación del oro, como determinante de la productividad en la recuperación del oro.

2.4. Procedimiento

El procedimiento se define según las siguientes fases:

- ✓ Diagnóstico del SRD basado en el control de procesos en base a la aplicación de un checklist y una guía de revisión documental, antes de la implementación del SRD.
- ✓ Diseño e implementación del SRD basado en el control de procesos: El procedimiento de diseño e implementación considera lo siguiente:

1) Fase de ingeniería y diseño:

a) Estudios preliminares:

- Levantamiento topográfico de zonas de implementación
- Evaluación de infraestructura existente
- Definición de requisitos específicos

b) Diseño Detallado:

- Dimensionamiento de equipos y tuberías.
- Cálculos hidráulicos y de instrumentación.
- Elaboración de P&IDs y planos constructivos
- Especificaciones técnicas de equipos

2) Fase de construcción:

a) Sistema de Dilución:

- Instalación de tanque de dilución de 3,6 m³
- Montaje de bomba peristáltica de transferencia
- Instalación de instrumentación asociada
- Tendido de tuberías de interconexión

b) Sistema de Impulsión:

- Instalación de línea doble de 1,5"
- Montaje de bomba peristáltica de impulsión
- Instalación de sensores y válvulas de control.
- Sistema de retrolavado

c) Sistema de Inyección:

- Montaje de válvulas de control proporcional.
- Instalación de flujómetros por línea

- Sensores de presión en puntos críticos

- Sistemas de bypass

3) Fase de control e instrumentación:

a) Instalación de Equipos:

- Montaje de tableros de control.

- Tendido de red de comunicaciones

- Instalación de instrumentos de campo

b) Programación:

- Configuración de PLC y SCADA

- Desarrollo de interfaces HMI

- Implementación de lazos de control

- Programación de permisos y enclavamientos

4) Fase de puesta en marcha:

a) Pruebas Preliminares:

- Verificación de instrumentos

- Pruebas hidrostáticas

- Calibración de equipos

- Verificación de señales

b) Comisionamiento:

- Pruebas de lazo cerrado

- Verificación de sistemas de seguridad

- Ajuste de parámetros operativos

- Validación de permisos

c) Arranque Escalonado:

- Inicio con una celda piloto
- Incremento gradual de cobertura
- Ajuste fino de parámetros
- Documentación de resultados

✓ Recolección de datos de los indicadores de la productividad en base a una guía de revisión documental, del pre y post implementación del SRD basado en el control de procesos.

✓ Procesamiento y análisis estadístico de los datos pre y post implementación.

✓ Evaluación del impacto del SRD basado en el control de procesos en la productividad al comparar los indicadores del pre con el post test.

✓ Formulación de conclusiones y recomendaciones.

2.5. Aspectos éticos

En cuanto a la confidencialidad de la información, se mantuvo en reserva la identidad de la compañía minera, refiriéndose a ella como "Mina AAA" o "la minera objeto de estudio", y se omitieron datos sensibles sobre su ubicación específica y procesos internos que podrían comprometer su seguridad operativa.

Respecto a la transparencia y veracidad de los datos, la investigación se sustentó en registros operacionales auditables y verificables, documentando los procedimientos de medición, control y análisis. Los resultados presentados reflejan el comportamiento de las variables estudiadas, incluyendo tanto los aspectos positivos como negativos. Se

especificaron claramente las fuentes de información, métodos de recolección y análisis de datos, permitiendo la trazabilidad y reproducibilidad del estudio. Las mediciones y análisis fueron realizados por personal calificado siguiendo protocolos estandarizados, y los resultados fueron sometidos a pruebas estadísticas para validar su confiabilidad.

En cuanto a la integridad científica, la investigación se desarrolló siguiendo estrictamente el método científico, con un diseño experimental robusto y metodología claramente definida. Se reconocieron y citaron las contribuciones de otros investigadores, respetando la propiedad intelectual. Los análisis y conclusiones se basaron exclusivamente en la evidencia empírica obtenida, evitando sesgos o manipulación de datos.

CAPÍTULO III: RESULTADOS

Diagnóstico del nivel de un Sistema de Riego Diferenciado basado en el control de procesos, según la infraestructura de control, y las capacidades de control, antes de la implementación

Tabla 1.
Infraestructura de control

Ítems	Componentes	Cantidad requerida para un SRD	Cantidad instalada	Cobertura %	Localización en puntos críticos en respuesta a un SRD			Calidad de calibración / programación / sistematización en respuesta a un SRD			Importancia o criticidad para un SRD		
					Si	No	Comentarios	Si	No	Comentarios	Baja / media / alta	Comentario global ¿Por qué se ha otorgado determinado nivel de importancia o criticidad para cada componente o para todos en general?	
INSTRUMENTACIÓN BASE	Flujómetros electromagnéticos	9	1	11,11%	X			X			Este equipo solo indica la cantidad de flujo de cianuro que esta adicionando al sistema, pero sin ninguna lógica de programación solo operativo	3	Son críticos para medir con precisión los flujos de solución cianurada y poder controlar las dosificaciones de manera proporcional en cada línea de riego. Sin medición precisa no se puede implementar un riego diferenciado.
	Sensores de presión	1	0	0,00%		N/A		X		Proporcionan señales para control y seguridad	2	Son fundamentales para detectar sobrepresiones o roturas en las tuberías que podrían causar derrames de solución cianurada. Aspecto crítico para la seguridad.	
	Válvulas control proporcional	8	0	0,00%		N/A		X		Permiten configurar curvas de respuesta y rangos de operación. Son fundamentales para control automático de flujos	3	Permiten regular con precisión la dosificación de cianuro en cada línea según los requerimientos específicos de cada celda. Son esenciales para lograr el riego diferenciado.	

Implementación de un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio y su impacto en la productividad de la recuperación del oro, la libertad, 2024

SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	Sensores de nivel	5	4	80,00%	X		X	Antes de la implementación del sistema SRD trabajaban independientemente, no como un sistema	2	Para un sistema de control SRD es importante estos equipos porque estos alimentan con información a los flujómetros, válvulas proporcionales, control de apagado y encendido de motores así también como para evitar algún derrame de solución cianurada y toma de decisión del operador del sistema de control en el scada.	
	Bombas con variador de frecuencia	3	1	33,33%	X		X	Estas bombas trabajaban independientemente antes de la implementación del sistema SRD no como un sistema, era operado por el controlador del sistema scada	2	Fundamentales para poder variar los flujos de manera precisa según los requerimientos de cada zona del pad. Sin ellas no se puede implementar el riego diferenciado.	
	Sistema SCADA	1	1	100,00%		N/A		X	Este sistema es importante en todo proceso productivo, pero es necesario hacer mejoras en automatización de los subprocesos.	2	Es fundamental porque es donde llegan todas las señales de los diferentes equipos de campo y son procesados ya sea mediante programación de automatización de un subproceso o mediante ingreso de información manual del operador al sistema. Sin embargo su enfoque es de gestión no operativo del sistema de riego.
	PLC (Programmable Logic Controller)	2	1	50,00%	X			X	Estos equipos nos permiten tomar acción ante un evento reportado por los equipos de campo, así como también la comunicación con el sistema scada	3	Cerebro del sistema de control que ejecuta la lógica de operación. Sin él no es posible la automatización del proceso.
	Sistemas de alarma	1	1	100,00%	X	pero muy básico por que el diseño implementado antes era muy simple		X	Por ser un tema de seguridad, pero la alarma era general indicaba zona de cianuro, pero con la implementación se detalla	1	Críticos para la seguridad del personal y las instalaciones al alertar sobre condiciones anormales o emergencias, pero no se constituye en un componente o

Implementación de un sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos en la lixiviación con cianuro de sodio y su impacto en la productividad de la recuperación del oro, la libertad, 2024

								el lugar exacto del problema	equipo del sistema de riego diferenciado.		
SISTEMAS DE SEGURIDAD	Válvulas de alivio de presión	2	0	0,00%	N/A	No se contaba por que la adición de cianuro al punto de descarga se encontraba cerca al mismo nivel		N/A	Son dispositivos mecánicos de seguridad	2	Fundamentales para proteger el sistema de sobrepresiones que podrían causar roturas y derrames. No se constituye en un componente inherente de un SRD
	Sistema contención secundaria	2	1	50,00%	X	se cuenta dentro de planta		N/A	Para contener posibles fugas de solución cianurada	2	Fundamentales para contener posibles derrames de solución cianurada y proteger el medio ambiente. No se constituye en un componente inherente de un SRD
	Detectores de fuga	1	1	100,00%	X		X		Si porque este es un sistema programado con toda la información de los equipos de campo	2	Fundamentales para detectar fugas de manera temprana y prevenir impactos ambientales. No se constituye en un componente inherente de un SRD
				47,68%	100,00%			100,00%			2,18

N/A: No Aplica

Instrumentación base:

De 9 flujómetros electromagnéticos requeridos solo existe 1 (11,11%), que además solo indica flujo sin integración al sistema. Siendo componentes de ALTA criticidad y esenciales para el control diferenciado, esta baja cobertura impide fundamentalmente la capacidad de medir y controlar flujos de manera precisa.

La ausencia total de sensores de presión (0%) y válvulas de control proporcional (0%) evidencia la imposibilidad de regular presiones y flujos de manera diferenciada. Estos componentes son ALTA criticidad por permitir el control preciso de la dosificación.

Los sensores de nivel muestran alta cobertura (80%) pero operan de manera independiente, sin integración sistémica. A pesar de su MEDIA criticidad, la falta de integración limita su aporte al control diferenciado.

Las bombas con variador (33,33% cobertura) operan sin integración al sistema, limitando severamente la capacidad de control variable de flujos, siendo componentes de MEDIA criticidad.

Sistemas de control automático:

Existe SCADA (100%) pero requiere mejoras en automatización. Su MEDIA criticidad indica que aún con presencia física, no cumple adecuadamente su función integradora.

Un solo PLC de dos requeridos (50%) limita la capacidad de procesamiento y control automático, siendo de ALTA criticidad como cerebro del sistema.

Sistema de alarma presente (100%) pero muy básico, aunque su BAJA criticidad lo hace menos relevante para el control diferenciado.

Sistemas de seguridad:

Ausencia de válvulas de alivio (0%) compromete la seguridad del sistema.

Sistema de contención parcial (50%) y detectores de fuga (100%) indican enfoque en seguridad básica pero no en control diferenciado.

Tabla 2.
Capacidades de control

Estadísticos	Control de Concentración:											Control de parámetros críticos							
	Control independientes de celdas			Tiempo de ajuste de concentraciones (horas)			Precisión de concentración objetivo por celda (%)					Precisión de flujo de riego por celda (m ³ /h)				Tiempo de respuesta a desviaciones en válvulas automáticas para regular caudal de riego			
	n° de celdas con control independiente	n° total de celdas	Control de celdas	Tiempo de ajuste en h	Tiempo previsto h	Control del tiempo de ajuste de concentración del reactivo	Concentración real (ppm o g/m ³)	Concentración objetivo (ppm o g/m ³)	Precisión	Precisión prevista	Efectividad del control de concentraciones	Flujo real	Flujo objetivo	Precisión	Precisión prevista	Efectividad del control de flujo de riego	Tiempo de ajuste en segundos	Tiempo previsto en segundos	Control del tiempo de ajuste del caudal de riego
Promedio	0	24	0,00%	0,83	0,17	20,00%	80,55	72	88,13%	99%	89,02%	2005	1710	82,75%	99,00%	83,58%	1,00	0,17	16,67%
Mínimo				0,67	0,17	25,00%	48	40	80,00%	99%	80,81%	950	780	78,21%	99,00%	79,00%	0,75	0,17	22,22%
Máximo				1	0,17	16,67%	105	100	95,00%	99%	95,96%	2150	1815	81,54%	99,00%	82,37%	1,5	0,17	11,11%
Moda				0,75	0,17	22,22%	76	84	90,48%	99%	91,39%	1967	1900	96,47%	99,00%	97,45%	1	0,17	16,67%

El análisis de las capacidades de control evidencia que el sistema preexistente no constituía un verdadero Sistema de Riego Diferenciado, lo cual se refleja en indicadores críticos: ninguna celda con control independiente (0 de 24 celdas), tiempos de ajuste de concentración significativamente altos (0,83 h vs 0,17 h objetivo), y una precisión en el control de concentraciones del 88,13% frente al 99% previsto, con una efectividad general del control de concentraciones de 89,02%. En términos de control de flujo, la operación mostraba brechas importantes: el flujo real (2005 m³/h) difería considerablemente del objetivo (1710 m³/h), con una precisión de 82,75%, muy por debajo del 99% esperado, y un tiempo de respuesta en válvulas (1 h) significativamente mayor al previsto (0,17 h), resultando en una efectividad de solo 16,67%. Estas deficiencias operativas demuestran

que el sistema funcionaba más como un sistema de riego convencional con control limitado, sin capacidad real para ajustes diferenciados por celda, lo que impactaba directamente en la optimización del consumo de reactivos y la eficiencia de lixiviación. Esta realidad justificaba plenamente la necesidad de implementar un verdadero SRD que permitiera control independiente por celdas, mejores tiempos de respuesta, mayor precisión en el control y automatización integrada de los procesos, características ausentes en el sistema original y fundamentales para una operación eficiente de lixiviación.

Implementación de un SRD basado en el control de procesos con dilución e inyección controlada para optimizar la eficiencia de lixiviación del oro, mediante el ajuste dinámico de la concentración de cianuro y el flujo de solución por celda del pad

1) Área de estudio:

El área de estudio ha sido definida para cubrir los sectores involucrados en el desarrollo del sistema y está demarcado para estas dos zonas de la operación:

- Planta de Procesos ADR, específicamente en la zona de preparación y dosificación de Cianuro de Sodio. Cota: 3.274 msnm

- Plataforma del Sistema de Re-bombeo de solución barren a celdas de Lixiviación. Cota: 3.367 msnm.

Figura 1.

Vista desde lo alto del campamento minero



2) Especificaciones de la operación actual

La Planta ADR es una operación de procesamiento de minerales auríferos, que incluye dentro de sus instalaciones el proceso de Lixiviación de los minerales mediante el riego con solución cianurada. Seguidamente, la solución lixiviada y enriquecida con oro es bombeada a la planta de procesos ADR, y mediante procesos sucesivos de Absorción en columnas de carbón activado y posterior proceso de Desorción en reactores, recupera el metal precioso en solución, para luego ser procesado en celdas de electrodeposición y finalmente obtener barras de doré mediante la fundición.

Componentes del Sistema Actual de Riego a celdas de Leachpad:

- Sistema de preparación y dosificación de reactivos (Cianuro de Sodio - NaCN).
- Circuito de alimentación de barren de servicio.
- Sistema de canalizaciones y sumidero de planta ADR.
- Sistema de bombeo de solución de riego de planta ADR a Leachpad.
- Sistema de Re-bombeo para riego de celdas de Leachpad.
- Sistema Eléctrico / Instrumentación de la operación.

Parámetros actuales de operación:

- Flujo de Producción: 1.950 m³/h
- Flujo de riego a celdas agotadas: 975 m³/h
- Flujo de riego a celdas nuevas: 975 m³/h
- Concentración de Solución Cianurada: 100.800 ppm (20%)
- Concentración de NaCN en riego actual : 70 ppm

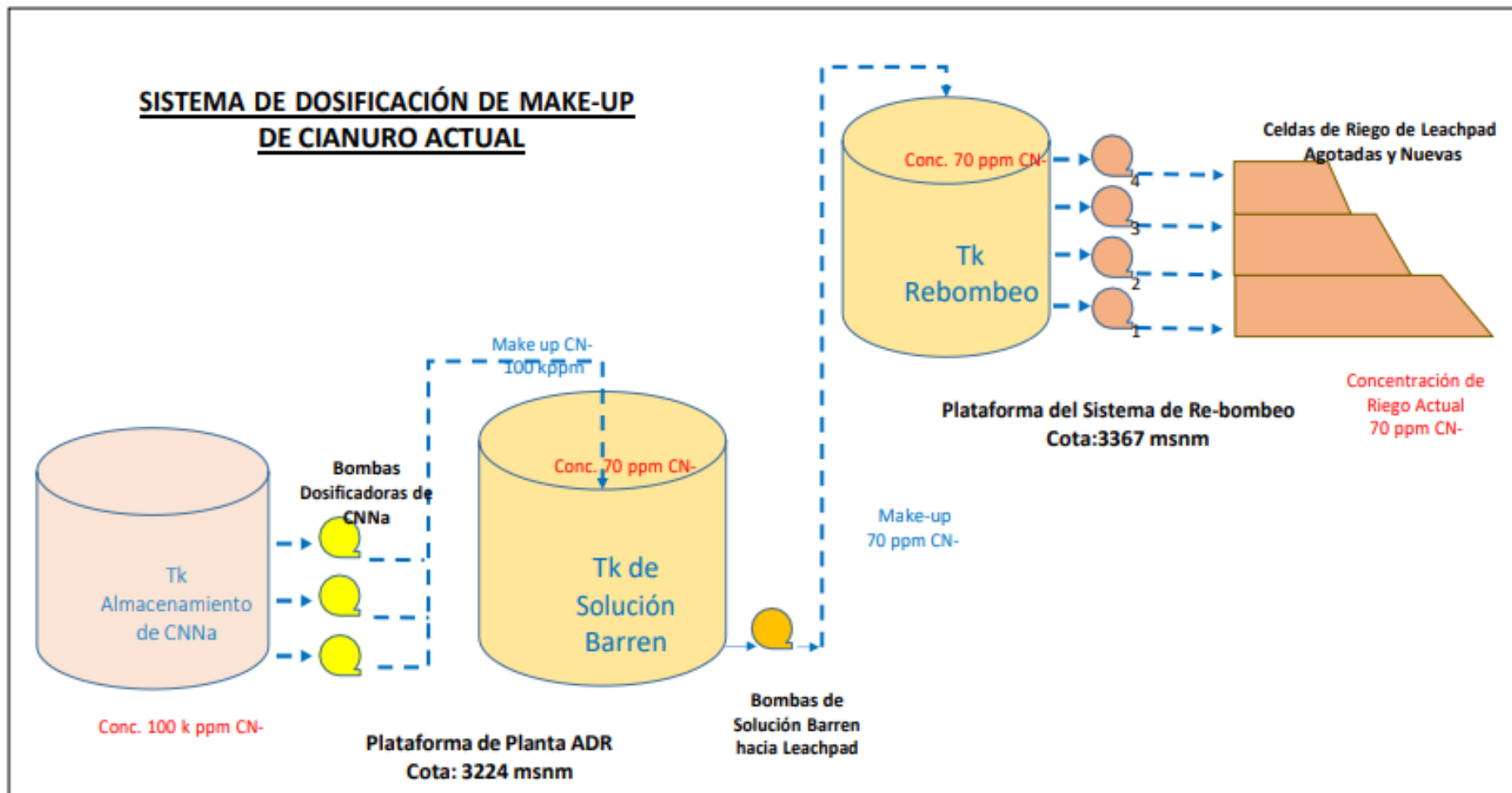
3) Descripción del sistema existente

El proceso actual envía solución cianurada desde planta ADR con concentración de 70 ppm mediante bombas barren y bombas de refuerzo. El sistema de re-bombeo comprende 04 bombas de impulsión que distribuyen los flujos según requerimientos operativos.

La solución rica, después de extraer el metal en Planta ADR, llega a tanques barren con concentración reducida (20 ppm). El proceso de make-up incrementa la concentración mediante dosificación de cianuro concentrado (100.000 ppm) hasta alcanzar 70 ppm, aplicándose esta concentración a todo el flujo de procesamiento (1.950 m³/h), sin discriminar entre celdas agotadas y nuevas, convirtiéndose en una potencial oportunidad de optimizar el consumo del reactivo, teniendo claro que en el tiempo las celdas en riego, debido al contenido remanente de oro, ya no requieren seguirse irrigando con la misma concentración.

Figura 2.

Flujograma actual del sistema de riego de celdas de lixiviación



4) Desarrollo del sistema de bombeo para riego diferenciado

4.1) Concepto del sistema de bombeo

La ingeniería de detalle del proyecto contempló los siguientes aspectos fundamentales:

Fase de diseño: En cuanto al diseño del sistema en su concepción amplia, se considera componentes de infraestructura de control y parámetros de capacidades de control, que sustentan el enfoque en el control de procesos:

Respecto a la infraestructura de control, se estructura en tres categorías fundamentales:

1) Instrumentación base: Los flujómetros electromagnéticos, sensores de presión y válvulas de control proporcionales son componentes críticos pues permiten la medición y regulación precisa de flujos y presiones, siendo fundamentales para lograr un control diferenciado real. Su ausencia o baja cobertura imposibilita el control preciso que requiere un SRD.

2) Sistemas de control automático: El sistema SCADA y los PLCs son el "cerebro" del control de procesos, permitiendo la automatización e integración de señales. Sin una capacidad de procesamiento adecuada (solo 50% de los PLC requeridos), no es posible implementar la lógica de control diferenciado.

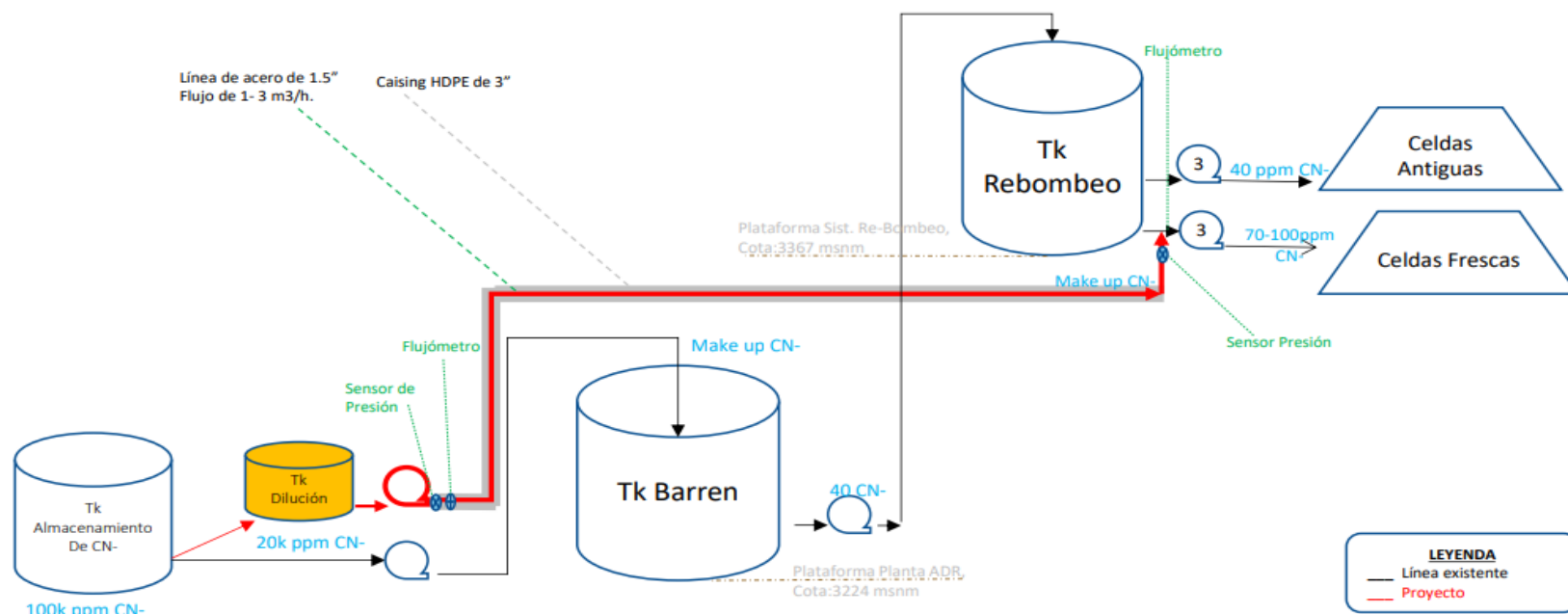
3) Sistemas de seguridad: Si bien son importantes para la operación segura, no son componentes inherentes que definen un SRD basado en control de procesos.

En cuanto a los parámetros de las capacidades de control, se considera lo siguiente:

1) Control de concentración: Se considera la capacidad de control independiente por celda; el tiempo de ajuste de concentraciones; y la precisión en alcanzar concentraciones objetivo.

2) Control de parámetros críticos: Control de presiones con variación mínima; precisión en control de flujos; y el tiempo de respuesta ante desviaciones.

Figura 3.
Diseño del proyecto



El diseño del SRD o sistema de bombeo para el envío de solución de cianuro concentrado al pad, implicó:

- Definir los flujos de adición cianuro concentrado que permita la dosificación adecuada en los puntos de succión de bombas barren.
- Implementar un sistema de control que regule las dosificaciones y de manera proporcional en las líneas de riego de celdas.
- Implementar medidas de control físico y mediante programación, en el sistema de bombeo diseñado.
- Asegurar que, ante la ocurrencia de imprevistos operativos, el sistema evite un riesgo de contaminación del ambiente.

Fase de implementación: Instalación de línea independiente de bombeo que permite inyectar solución según ciclo de riego de cada celda, optimizando uso del reactivo y asegurando correcta dosificación según flujos distribuidos.

Componentes del Sistema de Riego Diferenciado (SRD):

Sistema de Preparación de Reactivos

Sistema de Dilución de Solución Concentrada (Nuevo)

Sistema de Recirculación de Solución Barren

Sistema de Impulsión de Solución Cianurada (Nuevo)

Sistema de Re-bombeo de Solución

Sistema de Inyección de Solución Cianurada (Nuevo)

De los seis sistemas que componen el SRD, tres son nuevos componentes implementados específicamente para el funcionamiento del riego diferenciado.

4.2) Componentes del sistema de riego diferenciado:

Tabla 3.

Componentes del sistema de riego diferenciado

Item	Componente	Sistema	Cantidad	TAG
1	Tanque de Almacenamiento de NaCN concentrado	DILUCIÓN	1	130-TK-002
2	Bomba Peristáltica de Transferencia de NaCN	DILUCIÓN	1	130-PU-007D
3	Línea de transferencia de solución cianurada 1"	DILUCIÓN	1	130-SC-1"-AA1A-100
4	Flujómetro EMG 1" en línea de transferencia	DILUCIÓN	1	130-FT-100
5	Línea de dilución de barren de servicio 2"	DILUCIÓN	1	130-BS-2"-AA1A-101
6	Válvula de control proporcional 2"	DILUCIÓN	1	130-FV-101
7	Flujómetro EMG 2" en línea de barren de servicio	DILUCIÓN	1	130-FT-101
8	Tanque de Dilución de 3,6 m3	DILUCIÓN / IMPULSIÓN	1	130-TK-004
9	Sensor de control de nivel en Tk de Dilución	DILUCIÓN / IMPULSIÓN	1	130-LIT-100
10	Bomba peristáltica de impulsión de NaCN	IMPULSIÓN	1	130-PU-009B
11	Flujómetro EMG 1,5" para medición y control	IMPULSIÓN	1	130-FV-101
12	Sensor de Presión en descarga de línea de impulsión	IMPULSIÓN	1	130-PIT-100
13	Válvula de control ON/OFF de 1,5" para lavado en CC	IMPULSIÓN	1	130-AVE-103
14	Línea doble de impulsión de 1,5" de solución	IMPULSIÓN / INYECCIÓN	2	130-SC-1,5"-AA1A-107/108
15	Línea de inyección de solución cianurada 1"	INYECCIÓN	1	130-SC-1"-AA1A-101
16	Tanque barren del sistema de Re-bombeo	INYECCIÓN	1	135-TK-003
17	Válvula de control proporcional de 1"	INYECCIÓN	4	135-BAL-101/102/103/104
18	Flujómetro EMG de 1" en líneas de inyección	INYECCIÓN	4	135-FT-101/102/103/104
19	Sensor de Presión en líneas de inyección	INYECCIÓN	4	135-PIT-101/102/103/104
20	Sistema de válvulas y bypass manuales	INYECCIÓN	-	N.A.

La codificación de cada componente servirá posteriormente para la descripción del funcionamiento del sistema en cada etapa de la operación

4.3) Descripción de sistemas específicos:

La implementación del sistema requerido por la operación, considera la incorporación de nueva infraestructura y equipamiento, que servirá para complementar la operación.

A. Sistema de dilución de solución cianurada

- Descripción:

El sistema de bombeo de solución cianurada, permitirá que la alta concentración final que se envíe al Leachpad, pueda ser diluida mediante la combinación de dos flujos: solución cianurada de alta concentración (100.000 ppm), proveniente del tanque de almacenamiento de Cianuro de Sodio (NaCN), y solución recirculada de barren de servicio (20 ppm). De esta manera, la operación podrá enviar la solución con una adecuada dilución, que será inyectada en las celdas de riego con mineral fresco.

- Componentes:

- Tanque de Almacenamiento de NaCN concentrado (26 m³ de capacidad).
- Bomba peristáltica de transferencia de NaCN concentrado.
- Línea de bombeo de 1" de acero al carbono Sch80.
- Flujómetro electromagnético (EMG) para medición y control.
- Línea de barren de servicio de 2" de acero al carbono Sch80.
- Válvula de control proporcional de 2".
- Flujómetro EMG de 2" para medición y control.
- Tanque de Dilución de 3,6 m³ de capacidad útil (actual Tk de soda).
- Sensor de control de nivel en Tk de dilución.
- Sistema de válvulas y bypass manuales.

- Funcionamiento del Sistema:

La operación establecerá el flujo de solución cianurada a enviar al Leachpad, con este valor procederá a definir el porcentaje de dilución que requiere obtener entre los flujos de cianuro concentrado y solución barren.

El sistema arrancará la bomba peristáltica (130-PU-007D) para enviar el flujo de NaCN concentrado desde el Tk de Almacenamiento (130-TK-002) hasta el Tk de Dilución (130-TK-004), al mismo tiempo que realizará la apertura de la válvula de control (130-FV-101), de manera que ingrese el flujo adicional proveniente del circuito de solución de barren de servicio.

Ambos flujos combinados en el Tk de dilución, medidos a través de los flujómetros (130-FT-100 y 130-FT-101) respectivamente, tendrán la concentración que la operación requiere para ser inyectado en el sistema de rebombeo. Dicha concentración estará alrededor de los 20.000 ppm de NaCN.

B. Sistema de impulsión de solución cianurada

- Descripción:

El sistema de bombeo permitirá enviar la solución de alta concentración de NaCN diluida, desde la planta ADR hasta las bombas del sistema de re-bombeo de Leachpad. El seguimiento al ciclo de riego de la cada una de las celdas en operación, será el criterio que utilice la operación, para definir que bombas requerirán la carga adicional de NaCN y así poder incrementar la concentración puntual en el riego.

El flujo de bombeo de solución se ha estimado estará entre los 2 m³/h y 3 m³/h, y la concentración de la solución diluida estará alrededor de los 20.000 ppm de NaCN, que serán

enviados desde planta, los mismos han sido previamente estimadas por la operación y obtenida en la etapa de dilución.

- Componentes:

- Tanque de Dilución de 3,6 m³ de capacidad útil (actual Tk de Soda).
- Sensor de control de nivel en Tk de dilución.
- Bomba peristáltica de impulsión de NaCN concentrado.
- Línea de bombeo de 1,5” de acero al carbono Sch80 (doble línea).
- Flujómetro electromagnético (EMG) de 1,5” para medición y control.
- Sensor de Presión en descarga de bomba peristáltica.
- Válvula de control ON/OFF de 1,5” para retro-lavado de tubería.
- Sistema de válvulas y bypass manuales.

- Funcionamiento del Sistema:

La operación inicia una vez definidos los flujos y concentraciones de NaCN, realizando el bombeo desde el tanque de dilución (130-TK-004) mediante una bomba peristáltica (130-PU-009B). El sistema emplea una línea doble de acero al carbono (130-CS-1,5"-AA1A-107/108), donde una línea opera mientras la otra permanece en stand-by, permitiendo realizar mantenimiento y limpieza sin interrumpir la operación.

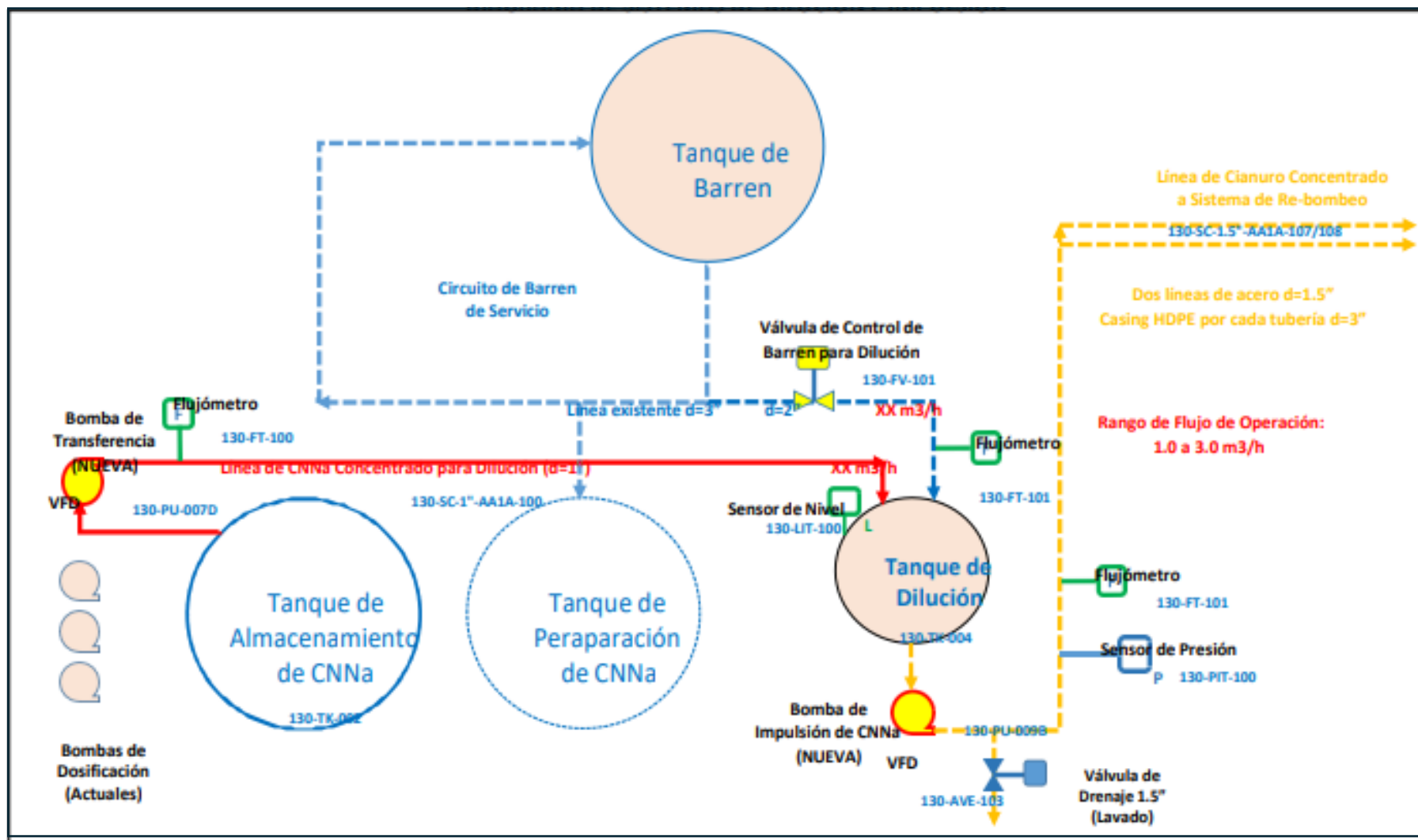
Para garantizar la operación segura, el sistema cuenta con un flujómetro EMG que permite el monitoreo remoto y local del flujo enviado al Leachpad, complementado por un sensor de presión que supervisa constantemente la línea. Ante cualquier eventualidad o falla, el sistema detiene automáticamente el bombeo, previniendo daños en tuberías y accesorios.

El sistema incorpora una válvula de purga (130-AV-103) diseñada para realizar lavados en contracorriente, ya sea de forma manual o según frecuencias programadas por la operación. Esta característica es especialmente importante dado que las líneas son de diámetro reducido y requieren prevención del encalichamiento y estrechamiento que podría afectar el flujo requerido.

El mecanismo de lavado en contracorriente se activa cuando la operación decide cortar la inyección a una bomba barren específica. El sistema detiene automáticamente tanto el bombeo como la dilución aguas arriba, manteniendo abiertas las válvulas de control en el rebombeo mientras se abre la válvula ON/OFF (AV-130-103). Esto permite que el flujo barren descienda por gravedad desde el tanque de rebombeo, realizando la limpieza de la línea de cianuro concentrado y descargando finalmente en la canaleta hacia el sumidero de planta ARD.

Figura 4.

Diagrama de sistemas de dilución e impulsión- Detalle en planta ADR



C. Sistema de inyección de solución cianurada

- Descripción:

El sistema de inyección permitirá que la solución cianurada enviada desde planta ADR, ingrese a la succión de cada una de las bombas barren, que actualmente vienen regando las celdas de Lixiviación en concentraciones promedio de 70 ppm. Es así que en adelante, le permitirá a la operación reducir la concentración de riego a valores de 40 ppm para el caso de las celdas agotadas o celdas antiguas, y que solamente las celdas con mineral fresco o celdas nuevas, reciban la concentración incrementada de NaCN, a valores promedio de 70 a 100 ppm, según criterio de la operación.

Adicionalmente, el sistema permitirá que a cada línea de succión que se inyecte la solución cianurada, el flujo de ingreso se regule de manera proporcional al flujo que envía cada bomba en operación.

- Componentes del Sistema:

- Línea de impulsión de 1,5" de acero al carbono Sch80.
- Línea de impulsión reducida 1" de acero al carbono Sch80 para inyección.
- Tanque de solución barren del sistema de Re-bombeo.
- Válvulas de control proporcional de 1" para cada línea de inyección.
- Flujómetros electromagnéticos (EMG) de 1" para medición y control.
- Sensor de Presión en cada línea de inyección.
- Sistema de válvulas y bypass manuales.

- Funcionamiento del Sistema:

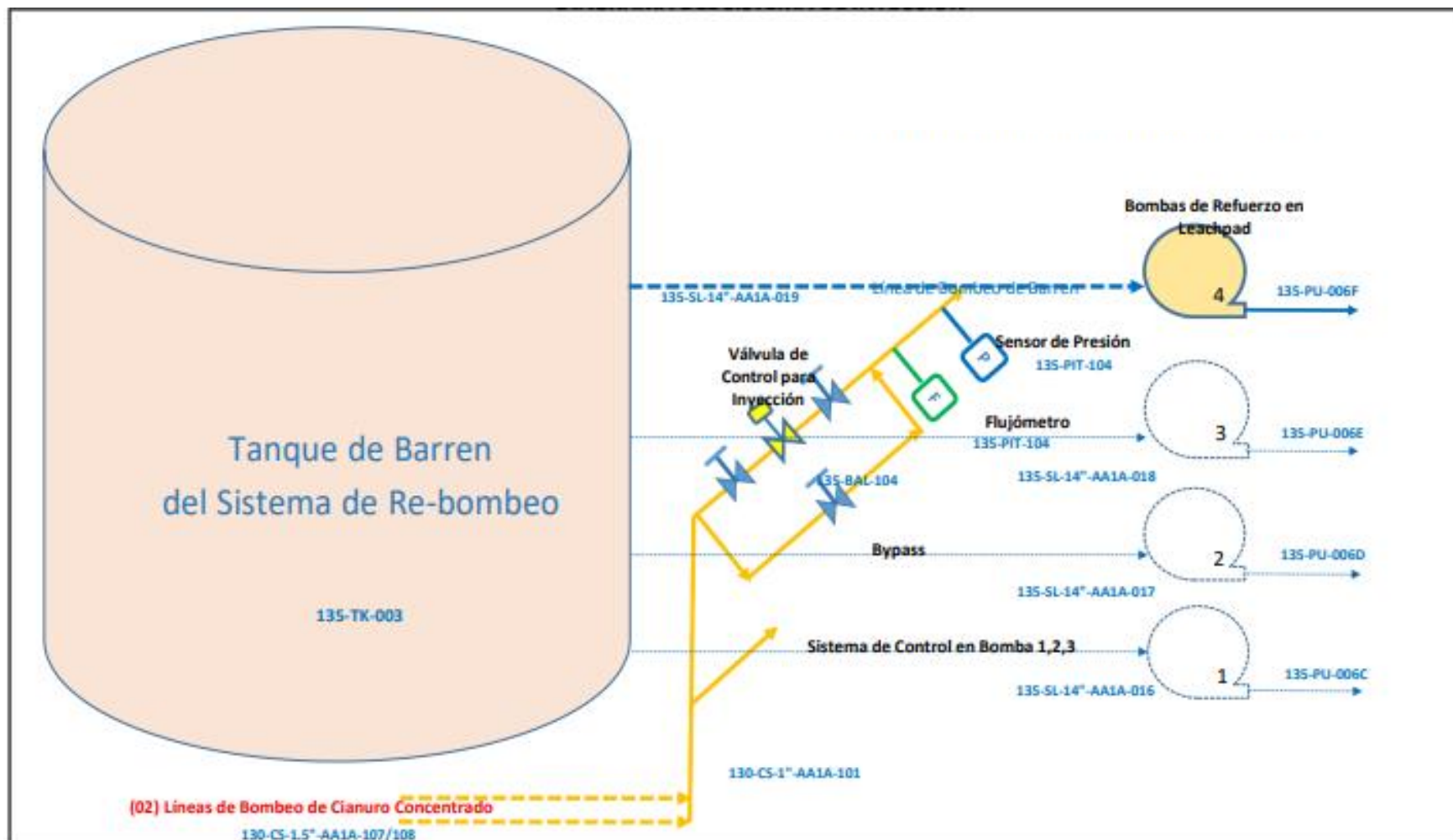
El sistema opera enviando flujo desde planta hacia el sistema de rebombeo en Leachpad, ingresando independientemente a la succión de cada bomba barren. La operación tiene la capacidad de seleccionar qué bombas recibirán el flujo de cianuro concentrado, permitiendo una distribución proporcional para cada línea de succión.

El proceso inicia cuando se define el flujo de NaCN concentrado a enviar mediante la bomba peristáltica (130-PU-009B) y se seleccionan las bombas barren receptoras (135-PU-006C/006D/006E/006F). El sistema activa automáticamente las válvulas de control correspondientes (135-BAL-101/102/103/104), calculando el flujo de inyección proporcional para cada línea según el flujo de riego puntual. La verificación se realiza mediante flujómetros (135-FIT-101/102/103/104), asegurando que la suma de flujos individuales iguale al flujo total enviado desde planta ADR.

Para garantizar la correcta operación, cada línea de inyección cuenta con un sensor de presión (135-PIT-101/102/103/104) que verifica la presión de ingreso. Esto confirma que la solución ingresa adecuadamente a cada succión cuando la presión supera el valor de la columna de agua del tanque de rebombeo (135-TK-003), establecido en aproximadamente 7 PSI según su altura de diseño.

Figura 5.

Diagrama del sistema de inyección – Detalle en plataforma de rebombeo



D. Sistema de instrumentación

El sistema integra las señales de instrumentación para el bombeo de solución cianurada desde planta hasta Leachpad. La ingeniería incluye la definición de lazos de control que conforman la lógica operativa, permitiendo la posterior programación e implementación del sistema.

Lazos de Control del Sistema:

La sistematización integra todos los componentes de campo mediante el sistema SCADA de la operación. La implementación de interfaces se desarrolla a través de Factorytalk View, permitiendo la creación de pantallas de interacción para el nuevo proceso.

a. Control en Dilución: El sistema permite que el operador defina el ratio de dilución entre solución NaCN concentrada y solución barren. Al ingresar estos parámetros, automáticamente inicia el bombeo y apertura de válvula de control, llenando el tanque de dilución con el flujo establecido para iniciar la impulsión hacia rebombeo. La operación está condicionada por permisos de seguridad como niveles de tanques, operación de bombas y presiones.

b. Control en Inyección: Una vez definidos flujos y bombas barren para riego, el sistema calcula automáticamente la proporción para cada bomba en operación, controlando las válvulas de inyección para el ingreso del cianuro concentrado. Este proceso permite el arranque de la bomba de impulsión en planta ADR, con enclavamiento al nivel del tanque de dilución. Opera bajo permisos similares al lazo anterior, incluyendo además alarmas de flujo.

Evaluación económica financiera del proyecto estimada al 2025.

Tabla 4.

Flujo de caja del proyecto

AÑO	Opex (\$)	Beneficio (\$)	Flujo caja (\$)
Inversión			-250.000,00
2022	6.800,00	1.179.549,00	1.172.749,00
2023	12.400,00	1.572.732,00	1.560.332,00
2024	12.400,00	1.572.732,00	1.560.332,00
2025	6.400,00	917.427,00	911.027,00

Tabla 5.

Indicadores económicos

Indicador	Valor
Tasa (Anual)	10%
VAN (\$)	3.900.209,00
TIR	493,7%

La evaluación económica del proyecto de implementación del sistema de riego diferenciado muestra indicadores excepcionalmente favorables, considerando el contexto específico:

1. VAN de \$3.900.209,00:

Alto retorno considerando que se trata de una mejora sobre infraestructura existente.

Los beneficios provienen principalmente de la reducción del consumo de cianuro (de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN/TMS, una reducción del 41,2%) mientras se mantiene la recuperación de oro

El valor presente neto refleja no solo ahorros en reactivos sino también beneficios por menor disolución de interferentes como Cu y Hg.

2. TIR de 493,7%:

La rentabilidad excepcional se explica por la inversión relativamente baja (\$250.000,00) al aprovechar infraestructura base preexistente

Los beneficios se materializan inmediatamente por optimización del proceso (desde 2022: \$1.172.749)

El sistema permite control preciso de concentraciones de cianuro según madurez de celdas, maximizando eficiencia.

3. Flujos de caja:

Estabilidad en años 2023-2024 (\$1.560.332) refleja consolidación de beneficios por operación optimizada.

La reducción en 2025 (\$911.027) es consistente con la tendencia natural de disminución de leyes de mineral reportada (de 0,455 g/t en 2018 a 0,364 g/t en 2021)

Los costos operativos (Opex) son marginales comparados con los beneficios generados

Esta evaluación confirma que la implementación del SRD representa una inversión altamente rentable al optimizar un proceso existente, generando ahorros significativos y mejoras operativas con una inversión relativamente modesta.

Resultados de la implementación del SRD basada en el control de procesos, al comparar la productividad del pre test y post test, según la cinética de lixiviación, la eficiencia en el consumo de los recursos y el rendimiento de recuperación del oro

Cinética de lixiviación

Figura 6.

Curva de extracción del Au a distintas concentraciones de NaCN (ppm) en función del tiempo

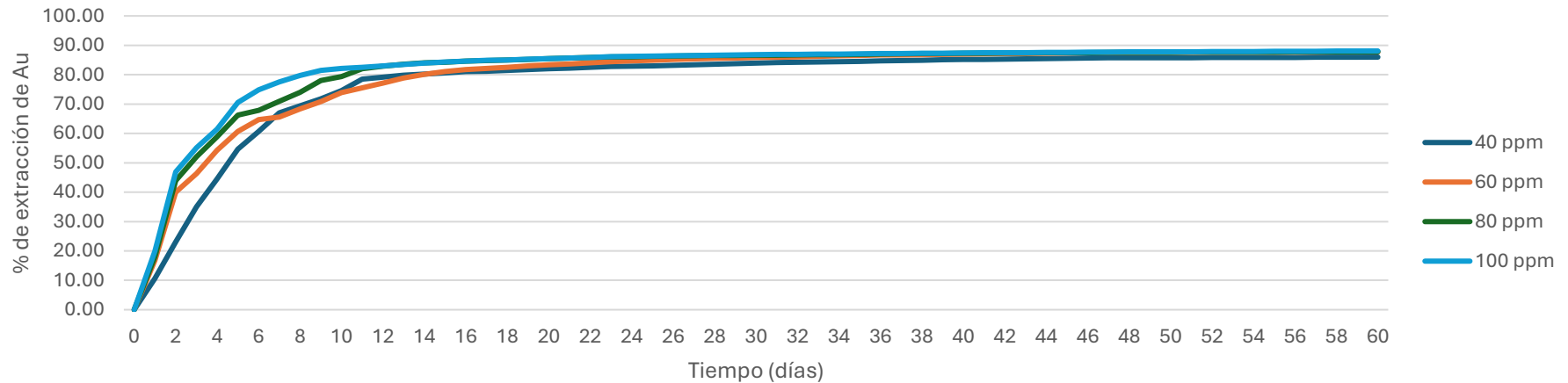


Tabla 6.

Diferencia de media del porcentaje de extracción del Au según los niveles de concentración de 60 ppm y 100 ppm a 60 días

Extracción de Au		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
60 ppm	100 ppm				Inferior	Superior
79,22%	81,67%	,401	2,4562	2,9122	-8,2222	3,3097

De la Figura 6, se observa las curvas de extracción de oro a diferentes concentraciones de cianuro (40, 60, 80 y 100 ppm) durante ciclos de 60 días revelan patrones cinéticos distintivos: con 40 ppm la extracción es notablemente más lenta alcanzando un 84,09% a los 31 días, mientras que con 60 ppm se alcanza a los 22 días; y que, si bien a un concentración de 60 ppm, se logra una extracción de 87,12% a los 41 días, y a 80 ppm y 100 ppm se logra un porco antes, a los 36 y 34 días respectivamente; sin embargo conforme se avanza en el tiempo, los porcentajes de extracción quedan prácticamente equiparables, como bien se ha demostrado. En la Tabla 6, se observa que, no existe diferencia estadísticamente significativa (p -valor=0,401) entre las extracciones alcanzadas con 60 ppm versus 100 ppm, con una diferencia de medias de solo 2,4562%. Este comportamiento se explica por la demanda estequiométrica de la reacción (cantidad de moles del reactivo por mol del mineral) y la cinética de lixiviación, donde el control del flujo permite compensar concentraciones menores manteniendo el gradiente necesario para la disolución, mientras que se reduce la formación de complejos interferentes como del Cu y Hg, que requieren más moles de CN^- (4 moles CN^- /mol metal). Estos resultados fundamentan la viabilidad técnica del sistema de riego diferenciado, demostrando que es posible optimizar el consumo de reactivo sin comprometer la extracción de oro.

Figura 7.

Concentraciones del Au en solución rica vs concentraciones del oro en solución barren en ppm

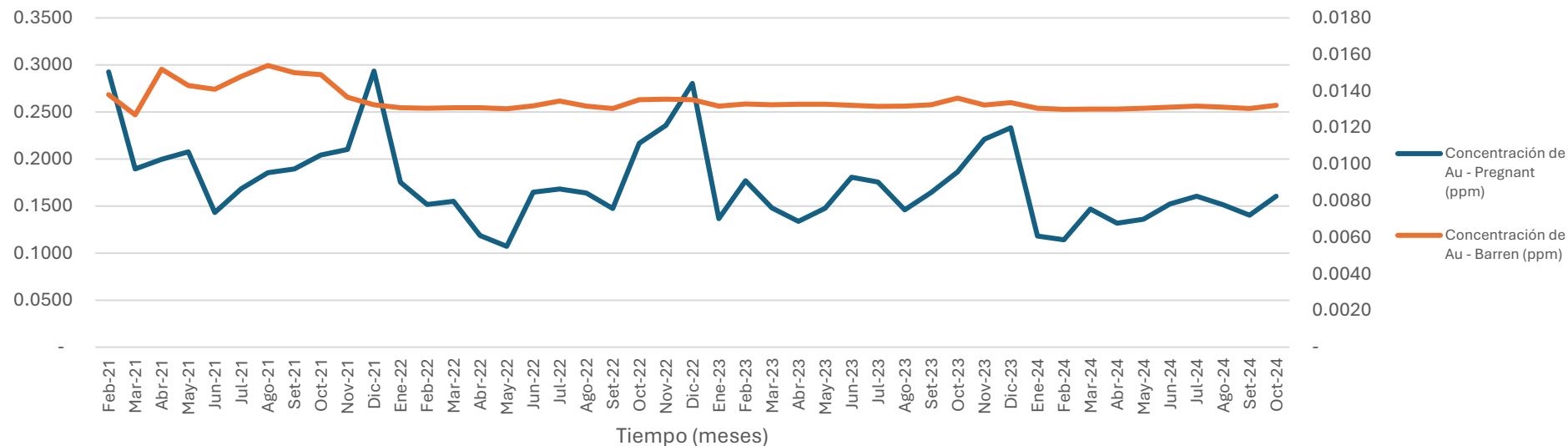


Tabla 7.

Estadígrafos de las concentraciones de Au en solución rica y barren en ppm

	Concentración de Au - Pregnant (ppm)		Concentración de Au - Barren (ppm)	
	Pre test	Post test	Pre test	Post test
Mínimo	0,1432	0,1072	0,0127	0,0130
Máximo	0,2935	0,2803	0,0154	0,0136
Media	0,2008	0,1631	0,0141	0,0132
Coefficiente de variación	22,76%	23,70%	6,46%	1,30%

El comportamiento de las concentraciones de oro en solución rica versus barren demuestra la robustez del proceso integrado de lixiviación-adsorción bajo el sistema de riego diferenciado. La solución rica muestra variabilidad controlada (siendo de 22,76% y 23,70% en el pre y pos test, respectivamente) que refleja la lixiviación diferenciada según la madurez de las celdas, mientras que la solución barren mantiene una concentración notablemente estable y baja, de 0,0130 a 0,0136 ppm, con una variabilidad de 1,30%, en contraste con la mayor variabilidad observada antes de la implementación (de 0,0127 a 0,0154 ppm, con una variabilidad de 6,46%). Esta estabilización del barren resulta de la sinergia entre la alta selectividad del carbón activado por el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y la menor presencia de complejos interferentes como del Cu y Hg en la solución rica debido al control diferenciado de concentraciones de cianuro. La optimización es evidente en la capacidad del sistema de adsorción para manejar eficientemente la variabilidad de la solución rica, manteniendo un barren estable, demostrando que el sistema de riego diferenciado no solo optimiza la lixiviación, sino que también mejora la eficiencia global del proceso al reducir la competencia por sitios activos en el carbón activado.

Eficiencia en el consumo de recursos

Figura 8.

Onzas de oro recuperado por kilogramo de cianuro consumido (oz Au / kg NaCN)

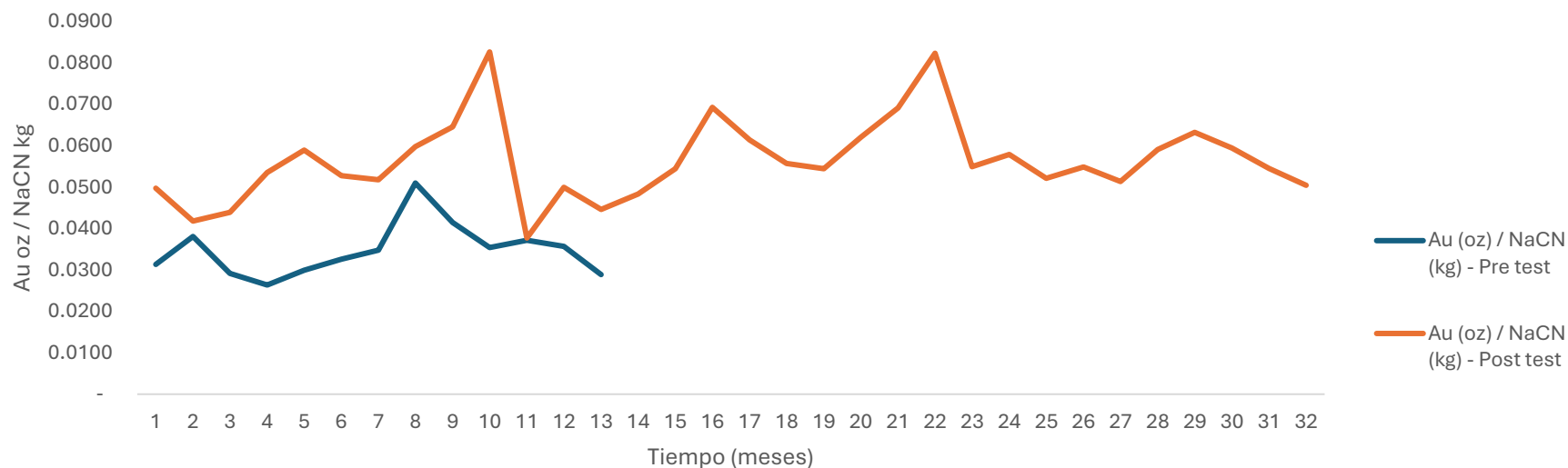


Tabla 8.

Diferencia de media de la producción de oro en oz por kilogramo de NaCN antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado

Au (oz) / NaCN (kg)		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia		
Pre test	Pos test				Inferior	Superior	
	0,0348	0,0565	,000	-,02171	,00299	-,02773	-,01568

Se observa una diferencia estadísticamente significativa (p -valor=0,000) en la producción de oro por kg de NaCN, incrementándose de una media 0,0348 a 0,0565 oz Au / kg NaCN, representando una mejora del 62,4% en la eficiencia de uso del reactivo. Esta mejora sustancial se explica directamente por la reducción del 41,2% en el consumo específico de NaCN (de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN/TMS – Figura 10) lograda mediante el sistema de riego diferenciado, mientras que la producción de oro se mantiene relativamente constante. El ratio oz Au/kg NaCN mejora precisamente porque se está consumiendo menos cianuro para producir similar cantidad de oro, independientemente de las leyes del mineral. Esta optimización demuestra que el control preciso de concentraciones y flujos según la madurez de las celdas permite usar el reactivo de manera más eficiente, reduciendo el consumo innecesario de cianuro mientras se mantiene la efectividad del proceso de extracción.

Figura 9.

Onzas de oro recuperado por costo del cianuro (oz Au / \$)

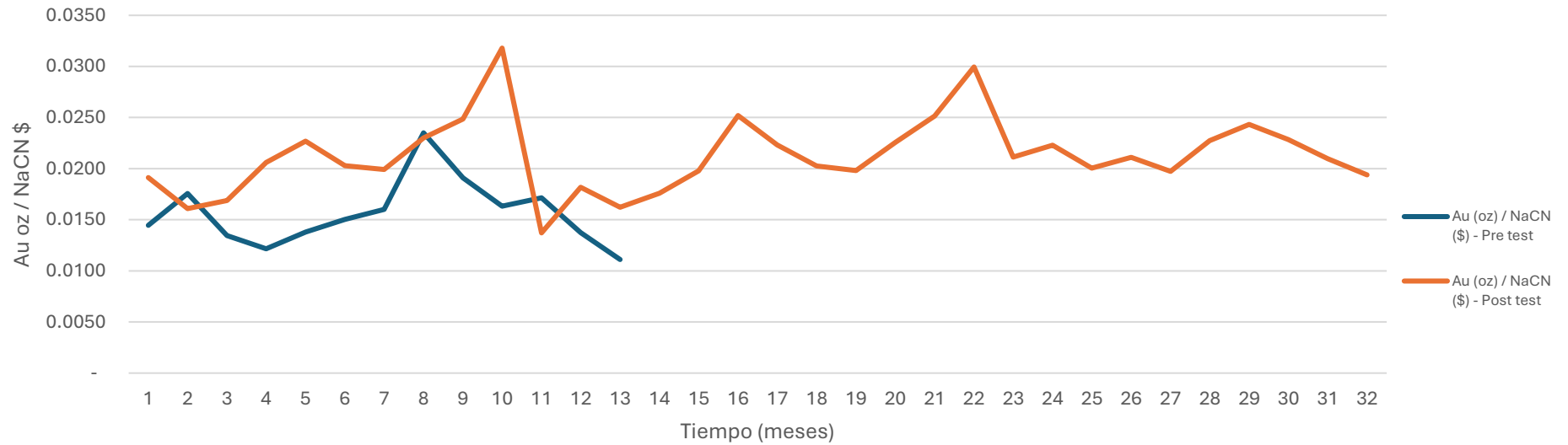


Tabla 9.

Diferencia de media de la producción de oro en oz por dólar de NaCN antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado

Au (oz) / NaCN (\$)		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
Pre test	Pos test				Inferior	Superior
0,0156	0,0213	,000	-,00563	,00118	-,00800	-,00326

De la Figura 9 y Tabla 9, se observa una diferencia estadísticamente significativa (p -valor=0,000) en la producción de oro por dólar invertido en NaCN, con un incremento en la media de 0,0156 a 0,0213 oz Au por dólar invertido, representando una mejora del 36,5% en la eficiencia económica del proceso. Este incremento, aunque significativo, es proporcionalmente menor que la mejora del 62,4% observada en el ratio oz Au/kg NaCN, debido a las variaciones en el precio del cianuro durante el período de estudio. Sin embargo, la mejora sigue siendo sustancial y demuestra que el sistema de riego diferenciado no solo optimiza el uso técnico del reactivo, sino que también genera beneficios económicos tangibles, incluso en un contexto de volatilidad de precios. Esta optimización económica se logra a través del control preciso del consumo del reactivo, manteniendo la eficacia de la extracción mientras se minimizan los costos operativos.

Figura 10.

Consumo del cianuro de sodio por TMS (kg NaCN / TMS)

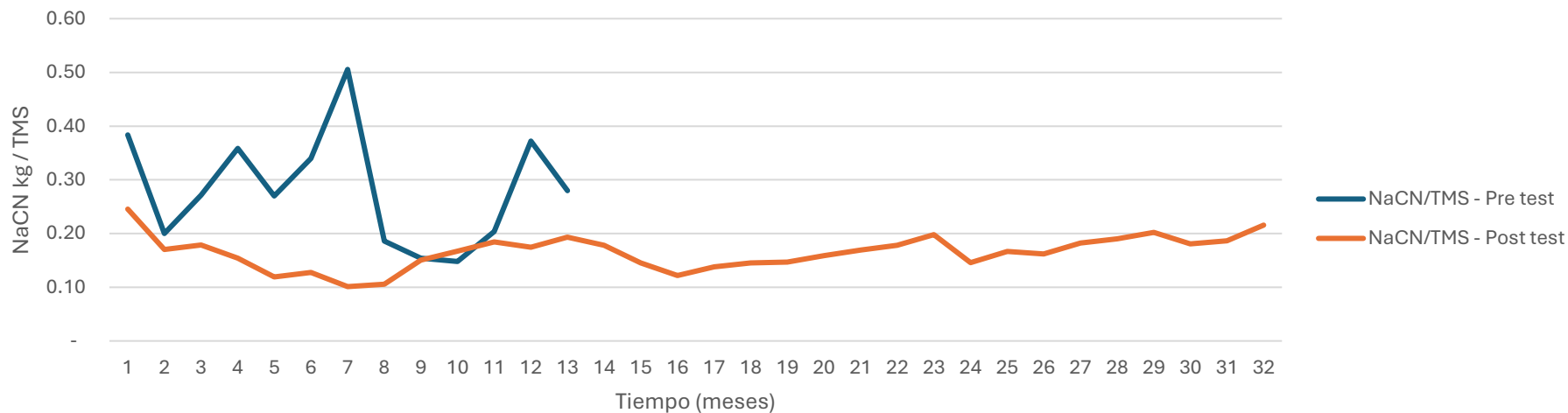


Tabla 10.

Diferencia de media del consumo de NaCN en kg por TMS antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado

NaCN (kg) / TMS		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
Pre test	Pos test				Inferior	Superior
0,2823	0,1659	,002	,11637	,03003	,05143	,18131

La diferencia en el consumo específico de NaCN es estadísticamente significativa (p -valor=0,002), reduciéndose de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN / TMS, lo que representa una disminución del 41,2%. Esta reducción sustancial es explicable, dada la implementación del sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos, que optimiza el consumo del reactivo a través de tres mecanismos fundamentales, por un lado, el control preciso de concentraciones según la madurez de las celdas, aplicando concentraciones más altas (70-100 ppm) solo donde la cinética de lixiviación del oro lo requiere y concentraciones menores (40 ppm) en celdas maduras; de otro lado, la gestión automática de flujos que permite compensar las menores concentraciones de cianuro cuando es necesario; así también, por la reducción en la formación de complejos interferentes con el Cu y Hg que consumen innecesariamente el reactivo.

Figura 11.

Curva del consumo de cianuro de sodio (kg) vs flujo de inyección (kg / m3/h)- tendencia desde el pre test (mes 1- 13)

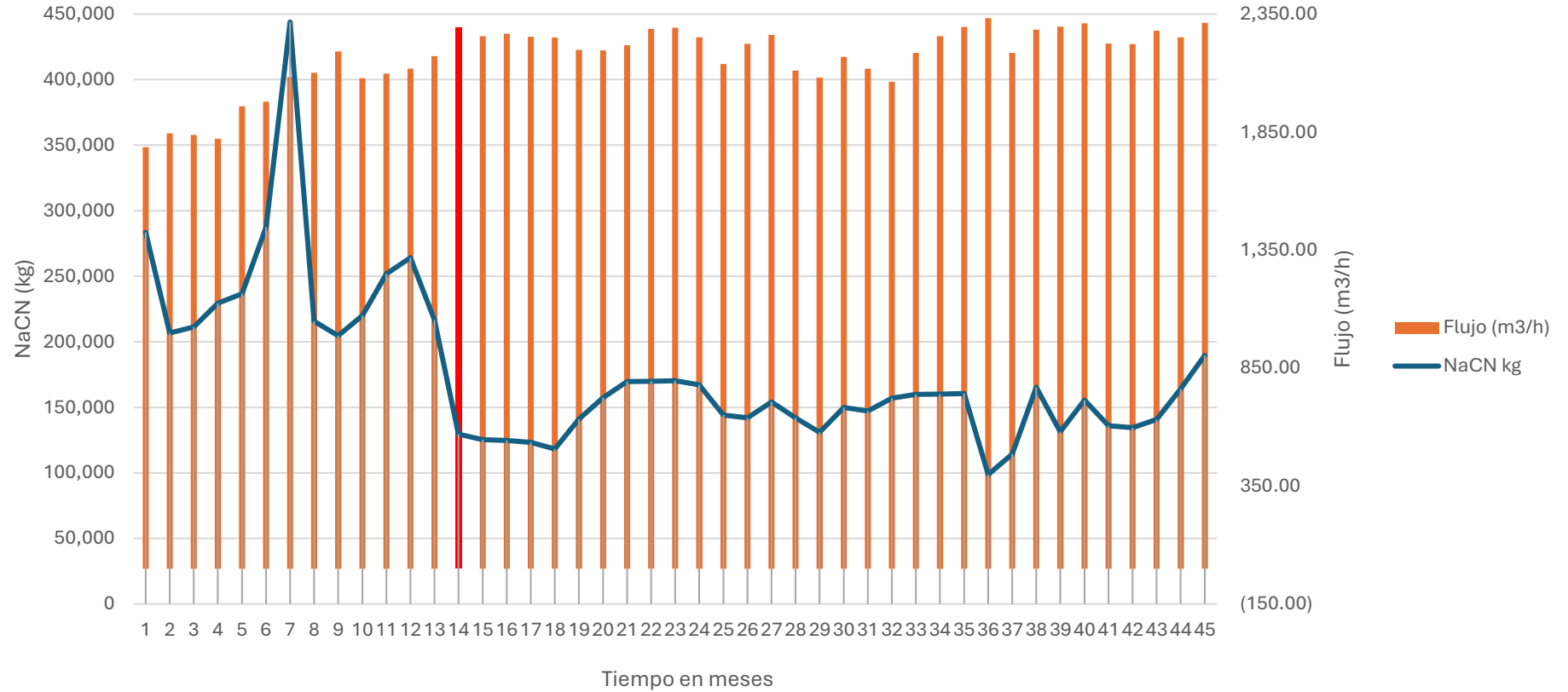


Tabla 11.

Estadígrafos de las concentraciones de cianuro

	Consumo del NaCN (kg)		Flujo (m ³ /h)		Concentraciones de NaCN (ppm)	
	Pre test	Post test	Pre test	Post test	Pre test	Post test
Mínimo	204.600,00	98.700,00	1.786,00	2.063,20	75,00	41,00
Máximo	444.000,00	189.600,00	2.191,03	2.332,11	96,00	68,50
Media	251.692,54	146.048,13	2.005,47	2.230,31	80,55	59,08
Desvest	64.258,35	19.862,54	142,23	69,73	5,22	7,11

La curva del consumo de cianuro versus flujo de inyección evidencia una optimización sustancial tras implementar el sistema de riego diferenciado. Los datos estadísticos muestran que en el pre-test el consumo de NaCN fluctuaba entre 204.600 y 444.000 kg con una media de 251.693 kg y alta variabilidad (desviación estándar de 64.258 kg), mientras que en el post-test se estabiliza entre 98.700 y 189.600 kg con una media de 146.048 kg y menor variabilidad (desviación estándar de 19.863 kg). Esta reducción del 42% en el consumo medio se logra aun cuando el flujo promedio aumenta de 2.005 a 2.230 m³/h, gracias a la reducción controlada de la concentración media de NaCN de 80,55 a 59,08 ppm. El sistema logra esta optimización mediante el control diferenciado de concentraciones, la gestión estequiométrica selectiva y el control automático de flujos según la madurez de las celdas, mayor flujo en celdas nuevas para compensar la cinética más lenta del oro, y control automatizado que permite ajustes precisos según la respuesta del proceso; se evidencia que, la reducción en la concentración promedio de cianuro no compromete la extracción de oro, puesto que, el incremento en los flujos mejora la cinética de lixiviación donde es necesario.

Figura 12.

Concentración de Cu y Hg en solución rica (ppm) en correlación con la concentraciones de cianuro de sodio (ppm) en riego

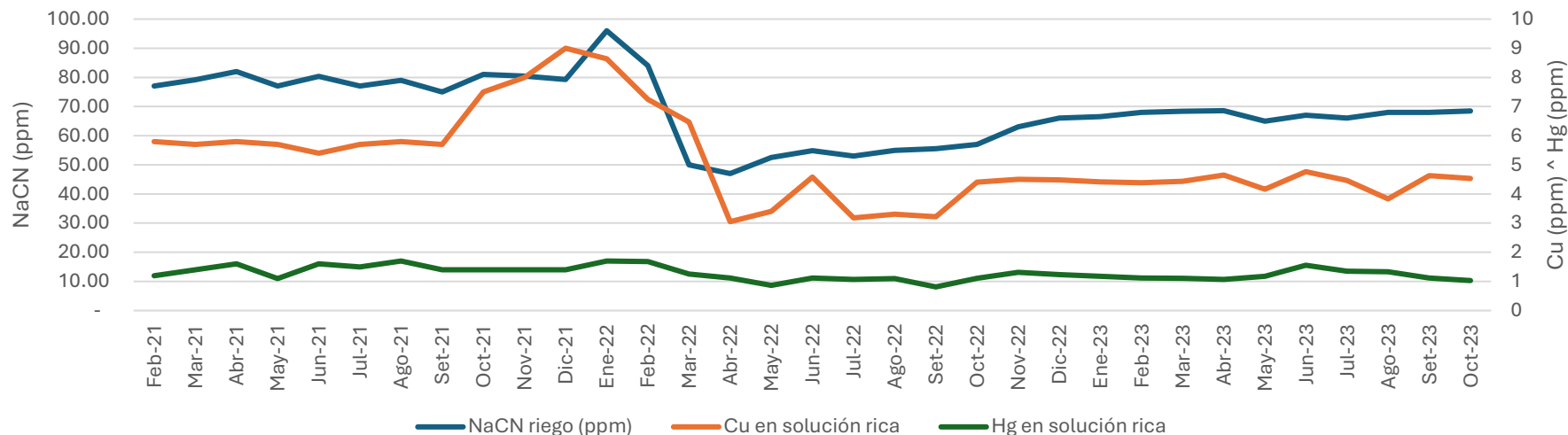


Tabla 12.

Correlación entre las concentración de NaCN (ppm) en riego y las concentraciones de Cu y Hg (ppm) en solución rica, en el pre y post test.

	Pre test		Post test	
	Cu	Hg	Cu	Hg
Correlación de Pearson	,582*	,580*	,281	,365
Sig. (bilateral)	,037	,038	,230	,113
N	13	13	20	20

Antes de la implementación del sistema de riego diferenciado, con concentración uniforme y alta de NaCN (~70-100 ppm) en todas las celdas, el comportamiento estaba gobernado por dos factores fundamentales: la demanda estequiométrica (2 moles CN⁻/mol Au vs 4 moles CN⁻/mol Cu o Hg) y la cinética de las reacciones, siendo la lixiviación del cobre y mercurio más rápida que la del oro (la constante de velocidad de reacción k del Cu y Hg con CN⁻ es aproximadamente un orden de magnitud mayor que la del Au). Por tanto, en celdas nuevas, a pesar de la alta disponibilidad de oro, la rápida cinética de formación de complejos Cu(CN)₄²⁻ y Hg(CN)₄²⁻ competía con la formación más lenta pero termodinámicamente más favorable del Au(CN)₂⁻. En celdas maduras, el exceso de cianuro junto con la cinética más rápida del Cu y Hg resultaba en elevadas concentraciones de estos metales en solución rica. Esto se evidencia en las correlaciones significativas ($p < 0,05$) y moderadamente fuertes encontradas en el pre-test entre la concentración de NaCN y las concentraciones de Cu ($r = 0,582$) y Hg ($r = 0,580$).

Con la implementación del sistema de riego diferenciado, la concentración alta de NaCN (~70-100 ppm) en celdas nuevas compensa la cinética más lenta del oro proporcionando suficiente CN⁻ para mantener el gradiente de concentración necesario para la formación del complejo Au(CN)₂⁻, mientras que en celdas maduras, la baja concentración de CN⁻ (~40 ppm) limita la formación de complejos Cu(CN)₄²⁻ y Hg(CN)₄²⁻ a pesar de su cinética más rápida, pues no hay suficiente CN⁻ disponible para satisfacer su mayor demanda estequiométrica. Como resultado, las correlaciones entre la concentración de NaCN y las concentraciones de Cu y Hg en el post-test se debilitan significativamente ($r = 0,281$ para Cu y $r = 0,365$ para Hg) y pierden significancia estadística ($p = 0,230$ para Cu y $p = 0,113$ para Hg), evidenciando que la relación está controlada no solo por la disponibilidad de CN⁻ sino también por la competencia cinética entre las reacciones, que es gestionada efectivamente por el sistema de riego diferenciado

Rendimiento de recuperación del oro

Figura 13.

Producción de oro (oz) por TMS (oz Au / TMS)

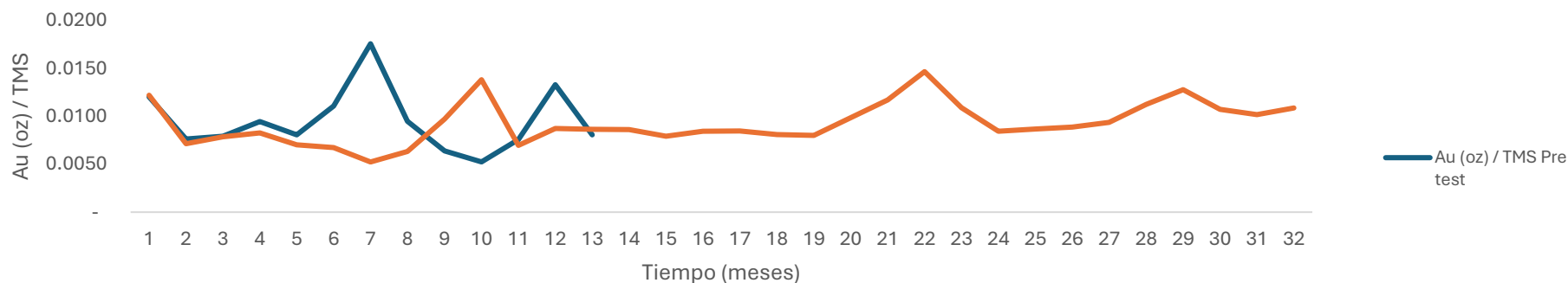


Tabla 13.

Diferencia de media de la producción de Au en oz por TMS antes y después de la implementación del sistema de riego diferenciado

Au (oz) / TMS		Sig. (bilateral)	Diferencia de medias	Diferencia de error estándar	95% de intervalo de confianza de la diferencia	
Pre test	Pos test				Inferior	Superior
0,009531	0,009259	,747	,00027	,00084	-,00142	,00196

No se encuentra diferencia estadísticamente significativa (p -valor=0,747) en la producción específica de oro antes y después de la implementación. Esto es esperable dado el deterioro natural de las leyes de mineral en el tiempo (de 0,455 g/TMS en 2018 a 0,364 g/TMS en 2021), y demuestra que el sistema de riego diferenciado permite mantener la productividad específica incluso con leyes decrecientes, manteniéndose una producción equivalente de 0,27 g / TMS frente a 0,26 g / TMS, luego de la implementación del sistema de riego diferenciado.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

Los resultados demuestran que la implementación del sistema de riego diferenciado (SRD) basado en el control de procesos tuvo un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro, evidenciado por mejoras sustanciales en múltiples indicadores. El diagnóstico inicial reveló deficiencias críticas en la infraestructura de control, con una cobertura promedio de solo 47,68% (Tabla 1) en componentes esenciales, que limitaban severamente la capacidad de control diferenciado. La implementación del SRD abordó estas deficiencias mediante la instalación de sistemas integrados de dilución, impulsión e inyección, permitiendo el control preciso de concentraciones según la madurez de las celdas. Esta optimización resultó en mejoras significativas en la productividad, alineándose con lo planteado por Petersen (2016), quien enfatiza que la optimización de la distribución de solución lixivante es crucial para la eficiencia del proceso.

El análisis de la cinética de lixiviación (Figura 6) demuestra que concentraciones de 60 ppm versus 100 ppm de cianuro no presentan diferencias estadísticamente significativas ($p=0,401$) en la extracción final de oro, con una diferencia de medias de solo 2,4562% (Tabla 6). Según Marsden & House (2019), esto se explica por la demanda estequiométrica de la reacción, donde el control del flujo permite compensar concentraciones menores manteniendo el gradiente necesario para la disolución. Las curvas cinéticas en la Figura 6, revelaron que si bien a concentraciones altas (80-100 ppm) se alcanza la extracción máxima en 34-36 días versus 41 días con 60 ppm, los porcentajes finales de extracción son estadísticamente equivalentes, validando el principio de control estequiométrico establecido por Liu et al. (2022).

La estabilización de las concentraciones de oro en solución barren (Tabla 7) muestra una reducción significativa en la variabilidad (de 6,46% a 1,30%), mientras mantiene niveles bajos (0,0130-0,0136 ppm). Wang & Chen (2023) explican que esta mejora resulta del equilibrio dinámico entre la intensidad del proceso y su selectividad. La sinergia entre la alta selectividad del carbón activado por el complejo $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ y la menor presencia de interferentes debido al control diferenciado de concentraciones, permite una operación más estable, como lo confirman Davidson & Henderson (2022).

La eficiencia en el uso de recursos muestra una mejora sustancial, con un incremento estadísticamente significativo ($p < 0,001$) en la producción de oro por kilogramo de NaCN, de 0,0348 a 0,0565 oz Au/kg NaCN (62,4% de mejora, Figura 8). Esta optimización supera los resultados reportados por Surimbayev et al. (2024), quienes lograron mejoras del 7,6% en extracción. La reducción del 41,2% en el consumo específico de NaCN (de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN/TMS, Figura 10) valida la teoría de Thompson (2021) sobre la importancia de comprender los mecanismos de reacción para optimizar el consumo de recursos.

Un aspecto crítico es la correlación entre concentración de cianuro y metales interferentes en solución rica (Figura 12), que se debilitó significativamente post-implementación (de $r=0,582$ a $r=0,281$ para Cu y de $r=0,580$ a $r=0,365$ para Hg – Tabla 12), perdiendo significancia estadística ($p > 0,05$). Senanayake (2020) explica este fenómeno por la competencia cinética entre las reacciones, donde concentraciones diferenciadas permiten controlar la formación selectiva de complejos. Esta optimización coincide con los hallazgos de Medina & Anderson (2020) sobre el control preciso de parámetros para minimizar interferencias.

Estos resultados positivos son consecuencia directa de la implementación del SRD

con tres subsistemas integrados: dilución, impulsión e inyección, que resolvieron las deficiencias críticas identificadas en el diagnóstico inicial, donde la infraestructura de control mostraba una cobertura promedio de solo 47,68% (Tabla 1). Según McPhail & van Zyl (2024), la ausencia de medición precisa puede resultar en variaciones de hasta $\pm 25\%$ en tasas de riego, impactando la recuperación. La implementación de flujómetros electromagnéticos y válvulas de control proporcional, integrados mediante PLC y SCADA, permitió reducir esta variabilidad a menos del 2%.

El sistema de dilución logró optimizar la preparación de solución cianurada mediante el control preciso de la mezcla entre solución concentrada (100.000 ppm) y solución barren recirculada (20 ppm), alcanzando concentraciones objetivo de 20.000 ppm de manera estable. Como señalan Velásquez & Thompson (2023), la integración de sensores de nivel y presión permite detectar anomalías con hasta 4 horas de anticipación, previniendo pérdidas significativas.

El sistema de impulsión, con doble línea de acero al carbono y monitoreo continuo de presión y flujo, garantiza el transporte seguro de la solución, mientras el sistema de inyección proporcional por celda optimiza la distribución según madurez del mineral. Este control diferenciado valida el principio establecido por Roberts & Chen (2023) sobre la importancia del ajuste continuo en el proceso.

Un aspecto excepcional es que la reducción en consumo de cianuro no comprometió la recuperación de oro, manteniendo una producción equivalente (0,27 g/TMS vs 0,26 g/TMS, Tabla 13) a pesar de la tendencia decreciente en leyes de mineral. Sin embargo, una limitación fue la imposibilidad de evaluar impactos a largo plazo en la vida útil del pad.

La investigación proporciona una base metodológica sólida para optimizar procesos

de lixiviación bajo condiciones de leyes decrecientes, particularmente relevante dado el contexto actual de la industria minera global, como lo evidencia el informe de Gold Fields Limited (2021) sobre la necesidad de mejorar eficiencias operativas. El éxito del SRD en optimizar simultáneamente consumo de reactivos y recuperación metalúrgica, mientras reduce impactos ambientales, establece un precedente valioso que podría beneficiar especialmente a operaciones mineras enfrentando desafíos similares.

Este estudio demuestra que la implementación de sistemas avanzados de control puede transformar significativamente la eficiencia de procesos hidrometalúrgicos tradicionales, abriendo camino para futuras investigaciones sobre optimización de procesos en condiciones cada vez más desafiantes de mineralogía y leyes.

4.2 Conclusiones

La implementación del sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos tuvo un impacto significativo en la productividad de la recuperación del oro, evidenciado por: optimización de la cinética de lixiviación manteniendo extracciones equivalentes con menores concentraciones de cianuro, reducción del 41,2% en el consumo específico de reactivo (de 0,2823 a 0,1659 kg NaCN/TMS), mejora del 62,4% en la eficiencia de uso del cianuro (de 0,0348 a 0,0565 oz Au/kg NaCN), y mantenimiento de la producción específica (0,27 vs 0,26 g Au/TMS) a pesar de la tendencia decreciente en leyes de mineral. Esta optimización resultó altamente rentable, generando un VAN de \$3.900.209 y TIR de 493,7%, debido a la baja inversión requerida (\$250.000,00) al aprovechar infraestructura existente, la rápida materialización de beneficios y los significativos ahorros en consumo de reactivos. Específicamente se concluyó:

El diagnóstico inicial evidenció que el sistema convencional operaba más como un sistema de riego simple con control limitado que como un verdadero sistema de riego diferenciado, revelado por la baja cobertura en instrumentación crítica (47,68%) y capacidades de control insuficientes (tiempos de ajuste de 0,83 h vs 0,17 h objetivo, precisión de 88,13% vs 99% previsto). Esta realidad imposibilitaba el ajuste dinámico de concentraciones según madurez de celdas, resultando en consumo excesivo de reactivos, mayor disolución de interferentes (Cu hasta 16 ppm y Hg hasta 3 ppm) y eficiencia subóptima del proceso (89,02% de efectividad en control de concentraciones), fundamentando la necesidad de implementar un sistema avanzado de control que permitiera la verdadera diferenciación del riego.

La implementación exitosa del sistema de riego diferenciado logró transformar la operación mediante la integración de tres subsistemas clave que resolvieron las deficiencias identificadas, reduciendo la variabilidad en tasas de riego a menos del 2% y permitiendo la detección temprana de anomalías hasta con 4 horas de anticipación. Esta transformación se basó en principios fundamentales de control de procesos, permitiendo el ajuste preciso de concentraciones según demanda estequiométrica (de 100.000 ppm a 20.000 ppm en dilución controlada), la optimización de flujos compensatorios, y el control de la competencia cinética entre reacciones. El sistema implementado no solo mejoró el control operativo sino que estableció una nueva base para la optimización continua del proceso, logrando mantener extracciones estadísticamente equivalentes ($p=0,401$) con concentraciones reducidas de cianuro.

Los resultados obtenidos demuestran que es posible optimizar simultáneamente el consumo de reactivos y la recuperación metalúrgica mediante el control preciso de variables críticas del proceso, evidenciado por la reducción del 41,2% en consumo específico de

cianuro y el incremento del 62,4% en eficiencia de uso, mientras se mantuvo la producción específica (0,27 vs 0,26 g Au/TMS). La implementación del sistema de riego diferenciado permitió establecer un equilibrio dinámico entre la intensidad del proceso y su selectividad, reduciendo significativamente la correlación con interferentes (Cu: $r=0,582$ a $0,281$; Hg: $r=0,580$ a $0,365$) mientras se mantiene la eficacia de la extracción, con una variabilidad en solución barren reducida de 6,46% a 1,30%. Este logro es particularmente significativo en el contexto actual de la industria minera, donde la optimización de procesos es crucial para mantener la viabilidad de operaciones enfrentando leyes decrecientes (de 0,455 g/t en 2018 a 0,364 g/t en 2021) y mineralogías más complejas.

4.3 Recomendaciones

Para mantener y optimizar el SRD implementado, se recomienda:

- ✓ Establecer un programa de monitoreo continuo con énfasis en:
- ✓ Control diario de la variabilidad en solución barren (<1,30%)
- ✓ Seguimiento de correlaciones cianuro-interferentes (Cu y Hg)
- ✓ Verificación de ratios de consumo específico (<0,17 kg NaCN/TMS)

Implementar rutinas de mantenimiento preventivo para:

- ✓ Calibración mensual de instrumentación crítica
- ✓ Verificación semanal de sistemas de control proporcional
- ✓ Validación trimestral de lazos de control

Desarrollar procedimientos de respuesta ante desviaciones en:

- ✓ Concentraciones objetivo por celda
- ✓ Flujos de compensación
- ✓ Presiones de operación

Para superar las limitaciones identificadas, se sugiere desarrollar investigaciones sobre:

Impacto a largo plazo en la vida útil del pad, mediante:

- ✓ Estudios de permeabilidad en diferentes zonas
- ✓ Monitoreo de estabilidad geoquímica
- ✓ Evaluación de ciclos extendidos de lixiviación

Comportamiento del sistema ante:

- ✓ Mayores variaciones mineralógicas
- ✓ Eventos climáticos extremos
- ✓ Cambios significativos en leyes de mineral

Se recomienda considerar el aporte metodológico de esta investigación referente a:

La integración de sistemas de dilución, impulsión e inyección para control diferenciado.

El uso de análisis estadístico para validar la equivalencia de extracciones con menores concentraciones de cianuro

La metodología de evaluación basada en tres dimensiones de productividad:

- ✓ Cinética de lixiviación
- ✓ Eficiencia en consumo de recursos
- ✓ Rendimiento de recuperación

El enfoque de optimización que mantiene la recuperación mientras reduce significativamente el consumo de reactivos.

REFERENCIAS

Birich, A., Stopic, S., & Friedrich, B. (2019). Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. *Scientific Reports*, 9(1), 7191. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-43383-4>

Galván, J. M., Soria, M. J., Carrillo, F. R., & Aguilera, E. N. (2023). Una Comparación de Reactivos Alternos al Cianuro como Lixiviantes del Oro: Una revisión. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(6), 2410-2434.

Li, H., Yin, S., Li, S., Zhang, L., Peng, J., & Yang, K. (2021). Investigation on the recovery of gold from pretreated cyanide tailings using chlorination leaching process. *Separation Science and Technology*, 56(1), 45-53.

Oraby, E. A., Eksteen, J. J., Karrech, A., & Attar, M. (2019). Gold extraction from paleochannel ores using an aerated alkaline glycine lixiviant for consideration in heap and in-situ leaching applications. *Minerals Engineering*, 138, 105889.

Soltani, F., Marzban, M., Darabi, H., Aazami, M., & Hemmati Chegeni, M. (2020). Effect of Oxidative Pretreatment and Lead Nitrate Addition on the Cyanidation of Refractory Gold Ore. *JOM*, 72(2), 774-781.

Xie, F., Chen, J. N., Wang, J., & Wan, W. (2021). Review of gold leaching in thiosulfate-based solutions. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 31(11), 3506-3529.

Breuer, P. L., Hewitt, D. M., Sutcliffe, C. A., & Jeffrey, M. I. (2021). Improving gold recovery and reducing cyanide consumption in heap leaching operations using controlled cyanide addition. *Hydrometallurgy*, 200, 105555. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2020.105555>

Eksteen, J. J., & Oraby, E. A. (2015). The leaching and adsorption of gold using low concentration amino acids and hydrogen peroxide: Effect of catalytic ions, sulphide minerals and amino acid type. *Minerals Engineering*, 70, 36-42. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.020>

Gold Fields Limited. (2021). *Integrated Annual Report 2021*. <https://www.goldfields.com/pdf/investors/integrated-annual-reports/2021/iar-2021.pdf>

Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2022). *Anuario Minero 2021*. <http://www.minem.gob.pe/minem/archivos/file/Mineria/PUBLICACIONES/ANUARIOS/2021/AM2021.pdf>

Mudd, G. M. (2007). Global trends in gold mining: Towards quantifying environmental and resource sustainability. *Resources Policy*, 32(1-2), 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2007.05.002>

Navarro, P., Vargas, C., Alonso, M., & Alguacil, F. J. (2018). Towards a more environmentally friendly process for gold: Models on gold adsorption onto activated carbon from ammoniacal thiosulfate solutions. *Hydrometallurgy*, 179, 79-88. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2018.05.010>

Newmont Corporation. (2021). *2020 Annual Report and Form 10-K*. https://s24.q4cdn.com/382246808/files/doc_financials/2020/ar/Newmont-2020-Annual-Report.pdf

Quispe-Aquino, N., Lovera-Dávila, D., & Puente-Santibañez, L. (2019). Optimización de la lixiviación de oro en minerales sulfurados de baja ley en la Región Central del Perú. *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, 22(43), 67-74.
<https://revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe/index.php/iigeo/article/view/16691>

Yanacocha. (2021). Reporte de Sostenibilidad 2020.
<https://www.yanacocha.com/wp-content/uploads/2021/09/Reporte-de-Sostenibilidad-2020.pdf>

Akcil, A., Erust, C., Gahan, C. S., Ozgun, M., Sahin, M., & Tuncuk, A. (2015). Precious metal recovery from waste printed circuit boards using cyanide and non-cyanide lixivants – A review. *Waste Management*, 45, 258-271.

Aylmore, M. G. (2016). Alternative lixivants to cyanide for leaching gold ores. In M. D. Adams (Ed.), *Gold Ore Processing (Second Edition)* (pp. 447-484). Elsevier.

Birich, A., Stopic, S., & Friedrich, B. (2019). Kinetic Investigation and Dissolution Behavior of Cyanide Alternative Gold Leaching Reagents. *Scientific Reports*, 9(1), 7191.

Habashi, F. (1967). Kinetics and mechanism of gold and silver dissolution in cyanide solution. *Montana Bureau of Mines and Geology Bulletin*, 59.

Lorenzen, L., & Van Deventer, J. S. J. (1992). Electrochemical interactions between gold and its associated minerals during cyanidation. *Hydrometallurgy*, 30(1-3), 177-193.

Marsden, J. O., & House, C. I. (2006). *The chemistry of gold extraction*. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration (SME).

Medina, D., & Anderson, C. G. (2020). A Review of the Cyanidation Treatment of Copper-Gold Ores and Concentrates. *Metals*, 10(7), 897.

Oraby, E. A., & Eksteen, J. J. (2015). The leaching of gold, silver and their alloys in alkaline glycine-peroxide solutions and their adsorption on carbon. *Hydrometallurgy*, 152, 199-203.

Petersen, J. (2016). Heap leaching as a key technology for recovery of values from low-grade ores – A brief overview. *Hydrometallurgy*, 165, 206-212.

Senanayake, G. (2019). Gold leaching by copper(II) in ammoniacal thiosulphate solutions in the presence of additives. Part II: Effect of residual Cu(II), pH and redox potentials on reactivity of colloidal gold. *Hydrometallurgy*, 194, 105262.

Adams, M., & Lloyd, C. A. (2020). Electrochemical aspects of gold dissolution in cyanide solutions. *Hydrometallurgy*, 194, 105332.

Adams, M., & Lloyd, C. A. (2023). Integrated approach for interferent management in gold cyanidation. *Journal of Precious Metals Processing*, 45(3), 234-248.

Adams, M., & Nicol, M. (2023). *Hydrometallurgy fundamentals and applications. Chemical Engineering Science*, 45(2), 112-128.

Bartlett, R. W. (2024). Advanced control systems in heap leaching operations. *Minerals Engineering*, 198, 107623.

Breitenbach, S., Miller, J., & Thompson, P. (2024). Implementation of proportional control valves in heap leaching systems. *Hydrometallurgy*, 214, 105944.

Breuer, P. L., & Jeffrey, M. I. (2019). Competitive reactions in gold cyanidation processes. *Minerals Engineering*, 132, 149-161.

Breuer, P. L., & Jeffrey, M. I. (2024). Mercury interference in gold cyanidation: Mechanisms and mitigation strategies. *Hydrometallurgy*, 215, 106018.

- Davidson, R. J., & Henderson, P. (2022). Principles of gold hydrometallurgy. *Metallurgical Engineering Review*, 18(4), 245-267.
- Eksteen, J. J., & Oraby, E. A. (2022). Kinetics of gold leaching in cyanide solutions. *Hydrometallurgy*, 205, 105817.
- Eksteen, J. J., Oraby, E. A., & Tanda, B. C. (2021). Copper-gold interactions in cyanide solutions. *Minerals Engineering*, 167, 106876.
- Gökelman, M., Birich, A., & Stopic, S. (2019). A review on alternative gold recovery reagents to cyanide. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1), 1-16.
- Habashi, F. (2021). Principles of extractive metallurgy (5th ed.). Springer.
- Johnson, R. C., & Kappes, D. W. (2023). Automatic control principles in differential irrigation systems. *Minerals Engineering*, 192, 107584.
- Li, J., & Miller, J. D. (2020). Reaction kinetics in gold cyanidation processes. *Hydrometallurgy*, 197, 105468.
- Liu, J., Zhang, Y., & Wang, H. (2023). Kinetics and mechanisms in gold leaching processes. *Hydrometallurgy Journal*, 205, 105818.
- Marsden, J. O., & House, C. I. (2019). The chemistry of gold extraction (3rd ed.). SME.
- McBride, D., & Thompson, P. (2024). Multi-level control strategies in heap leaching. *Minerals Engineering*, 201, 107652.
- McPhail, G., & van Zyl, D. (2024). Flow measurement technologies in heap leaching operations. *Mining Technology*, 133(1), 23-35.

Roberts, J. M., & Chen, X. (2023). Variable frequency drives in heap leach irrigation systems. *Mining Engineering*, 75(3), 45-52.

Senanayake, G. (2020). Gold leaching in hydrometallurgy: Theory and practice. *Ore Processing Technology*, 12(3), 89-112.

Thompson, P. (2021). Resource optimization in gold processing. *Journal of Cleaner Production*, 315, 128217.

Velásquez, L., & Thompson, P. (2023). Real-time monitoring systems in heap leaching. *Minerals Engineering*, 195, 107599.

Velásquez-Yévenes, L., & Meza-García, E. (2022). Optimization of cyanide concentration in gold leaching processes. *Hydrometallurgy*, 208, 105822.

Velásquez-Yévenes, L., Nicol, M., & Miki, H. (2018). Optimal cyanide usage in gold leaching operations. *Minerals Engineering*, 124, 68-76.

Wang, R., & Chen, J. (2023). Sustainable practices in hydrometallurgical operations. *Resources Conservation and Recycling*, 178, 106081.

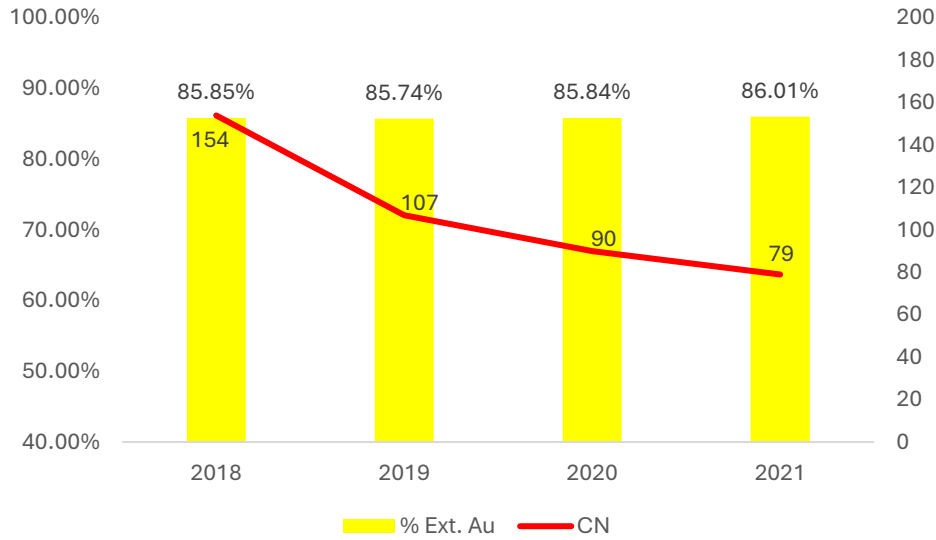
Wang, X., & Forssberg, K. S. E. (2021). Flow dynamics in heap leaching systems. *Hydrometallurgy*, 201, 105571.

Zhang, W., Liu, J., & Wang, H. (2021). Intermediate reactions in gold cyanidation. *Hydrometallurgy*, 200, 105555.

ANEXOS

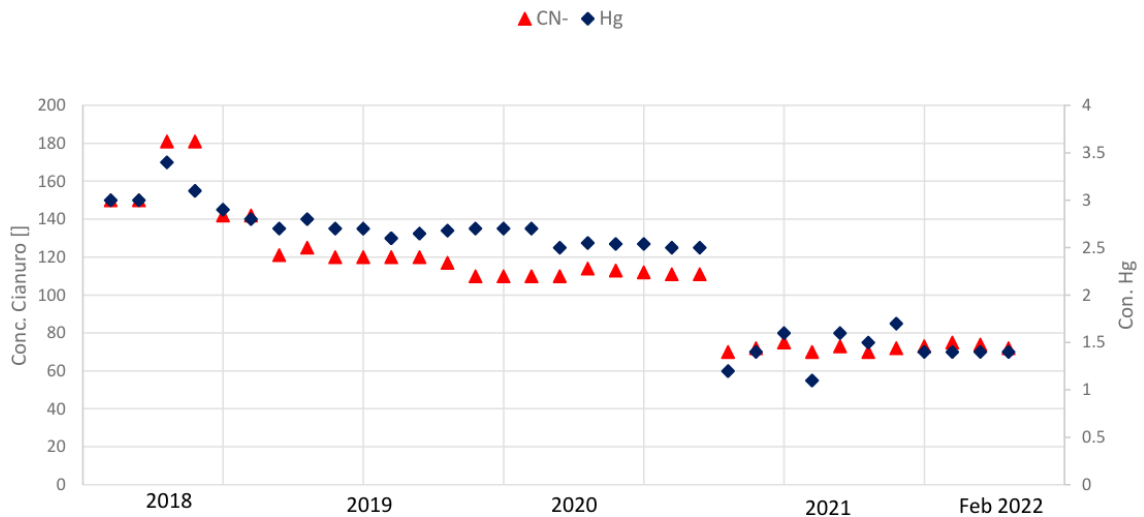
Anexo 1. Evidencias de la problemática

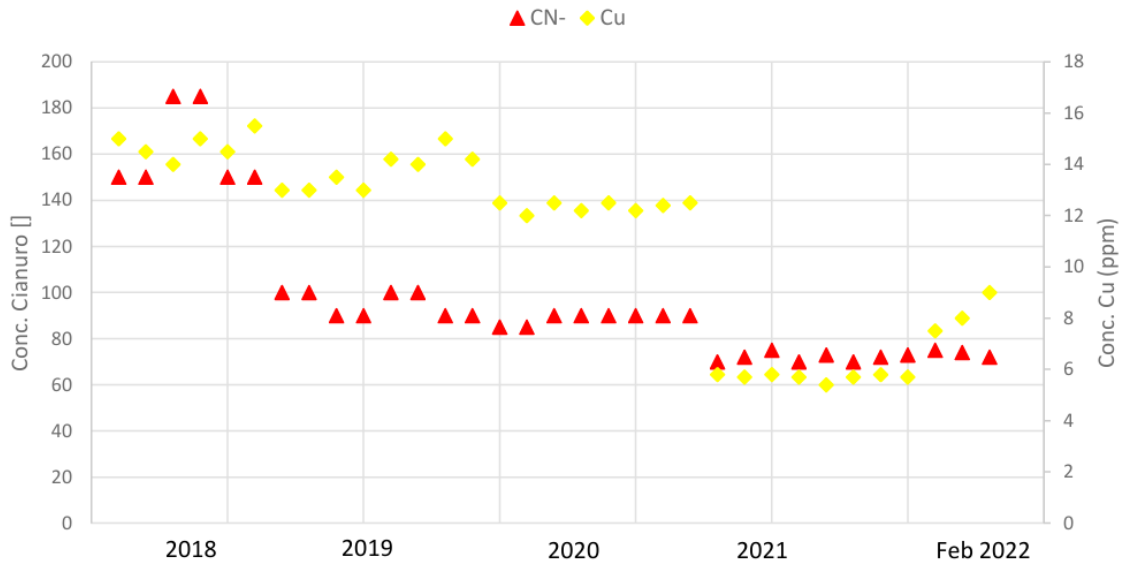
1.a). Consumo de cianuro ante la disminución de las leyes del mineral



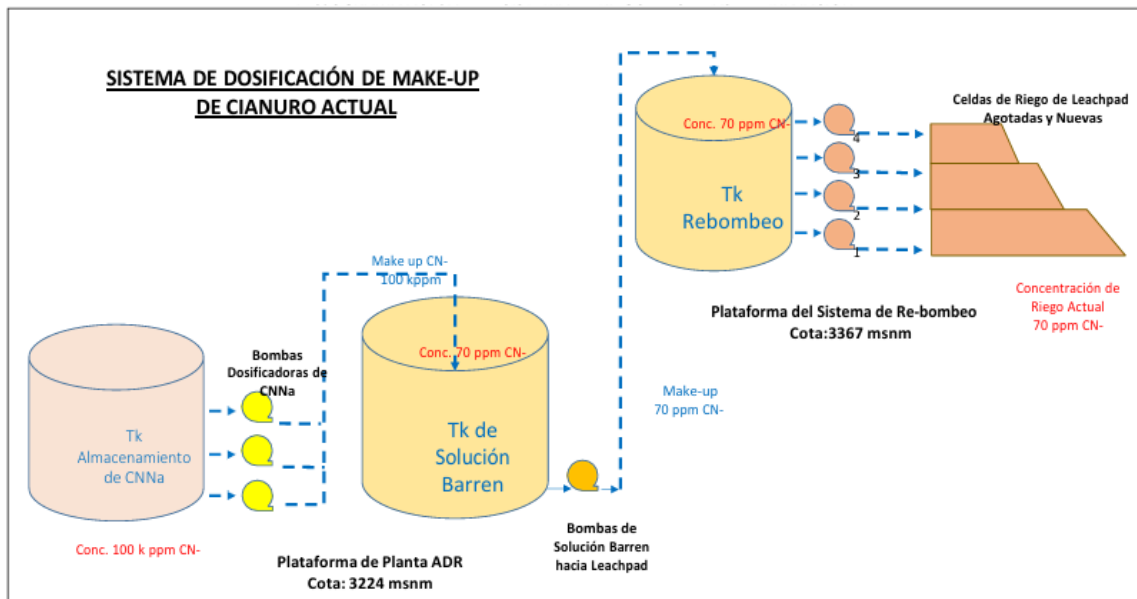
2018	2019	2020	2021
0,455	0,409	0,374	0,364

1.b) Disolución de materiales no deseados como el Hg y el Cu en solución rica





1.c). Flujograma actual del sistema de riego de celdas de lixiviación



Anexo 2. Operacionalización de variables

Variable	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensión	Indicador	Escala de Medición
Sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos	El sistema de riego diferenciado basado en el control de procesos representa una arquitectura tecnológica-operacional que integra principios de control automático, instrumentación industrial y gestión de procesos hidrometalúrgicos para la regulación selectiva y dinámica de soluciones de cianuro en operaciones de lixiviación. Este sistema fundamenta su operación en el principio de control por retroalimentación, donde la medición continua de variables críticas del proceso y la capacidad de ajuste automático permiten mantener condiciones diferenciadas y óptimas	Grado en que el proceso evidencia la capacidad de regular selectivamente la concentración y distribución de soluciones cianuradas según el estado de madurez de las celdas de lixiviación. Esta regulación se sustenta en una infraestructura de control constituida por instrumentación de campo, sistemas de control automático y sistemas de seguridad, que permiten el monitoreo y control en tiempo real de las variables críticas del proceso. La medición de esta capacidad se establece a través de la evaluación de las características físicas del sistema (presencia/ausencia de componentes clave), las capacidades de control demostradas en la operación (medidas cuantitativas de desempeño en el control de concentración, distribución y parámetros críticos), y la efectividad del monitoreo y control automático (medidas cuantitativas	Infraestructura de control	Instrumentación Base: ✓ Flujómetros electromagnéticos ✓ Sensores de presión en puntos críticos ✓ Válvulas de control proporcional ✓ Sensores de nivel en tanques ✓ Bombas con variador de frecuencia	Nominal (dicotómica)
			Sistemas de Control Automático: ✓ Sistema SCADA implementado ✓ PLC para control de procesos ✓ N° de sistemas de alarmas		
			Sistemas de Seguridad: ✓ Válvulas de alivio de presión ✓ Sistema de contención secundaria ✓ Detectores de fugas		
			Capacidades de control	Control de Concentración: ✓ Porcentaje de celdas con control	Razón

	de lixiviación. La diferenciación se logra mediante una infraestructura de control que permite variar concentraciones y flujos de manera independiente según los requerimientos específicos de las distintas zonas o etapas del proceso, operando bajo lazos de control cerrado que aseguran la precisión y estabilidad del sistema (Marsden & House, 2006; Smith & Corripio, 2006; Seborg et al., 2016).	de la capacidad de respuesta y precisión del sistema). Esto permite una diferenciación efectiva entre el riego de celdas nuevas con concentraciones elevadas de cianuro y celdas maduras con concentraciones reducidas, optimizando así el consumo de reactivos mientras se mantiene la eficacia del proceso de lixiviación.		<p>independiente (%)</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tiempo de ajuste de concentraciones (horas) ✓ Precisión de concentración objetivo (%) 	
				<p>Control de Parámetros Críticos:</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Control de presiones (% variación) ✓ Precisión de flujos (% desviación) ✓ Tiempo de respuesta a desviaciones (min) 	
Productividad de la recuperación de oro (Variable Efecto)	Relación entre la producción total y los insumos utilizados en un sistema productivo, midiendo la eficiencia en la conversión de recursos (trabajo, capital, tierra, materiales, energía e información) en bienes	Medida integral de desempeño que concatena tres aspectos fundamentales del proceso: (i) la cinética de lixiviación, evidenciada por el comportamiento temporal del proceso a través de los ciclos completos de lixiviación (desde la aplicación inicial hasta el agotamiento), las tasas de extracción bajo diferentes	Cinética de lixiviación	<p>Curva de extracción a distintas concentraciones en función del tiempo.</p> <p>Concentración del oro en solución rica (ppm) vs solución barren (ppm)</p>	Razón
			Eficiencia en el consumo de los recursos	<p>Onzas de oro recuperado por kilogramo de cianuro consumido (Oz Au / kg NaCN)</p>	

<p>y servicios que generan valor; esto implica además incorporar elementos cualitativos como la efectividad en el logro de objetivos organizacionales, la calidad de los productos o servicios resultantes, y la capacidad adaptativa frente a cambios tecnológicos y del mercado, donde una mayor productividad implica la optimización en el uso de recursos para obtener mejores resultados (Maheshwari, 2016; Prokopenko, 2019; Salvendy, 2023).</p>	<p>concentraciones de cianuro, y la evolución de las leyes de oro entre la solución rica y el barren, lo que caracteriza la velocidad y eficacia de la disolución del oro; (ii) la eficiencia en el consumo de recursos, manifestada en la relación entre el oro recuperado y el consumo de cianuro tanto en términos másicos como económicos, el ratio de consumo por tonelada de mineral tratado, la relación entre el consumo y los flujos de inyección, así como el control de las concentraciones de cobre y mercurio en solución rica que impactan en el consumo del reactivo; y (iii) el rendimiento de recuperación, expresado en la capacidad del proceso para extraer el oro del mineral procesado, medido tanto en términos específicos (gramos de oro por tonelada de mineral) como en la recuperación total porcentual que representa la fracción del oro disponible efectivamente extraído.</p>		<p>Onzas de oro recuperado por costo del cianuro (Au oz / Unid S/)</p>	
			<p>Ratio de consumo de cianuro (kg NaCN / TMS)</p>	
			<p>Curva del consumo de cianuro vs flujo de inyección</p>	
			<p>Concentración de cobre en solución rica (ppm)</p>	
			<p>Concentración de mercurio en solución rica (ppm)</p>	
			<p>Rendimiento de recuperación</p>	<p>Onzas de oro recuperado por tonelada de mineral procesado (oz Au / TMS)</p>

Anexo 3. Formato de checklist del nivel de un SRD basado en el control de procesos, según la infraestructura de control, antes de la implementación del SRD

Ítems	Componentes	Cantidad requerida para un SRD	Cantidad instalada	Cobertura = (Cantidad instalada / Cantidad requerida para un SRD) X 100%	Localización en puntos críticos en respuesta a un SRD			Calidad de calibración / programación / sistematización en respuesta a un SRD			Importancia o criticidad para un SRD	
					Si	No	Comentarios	Si	No	Comentarios	baja/media/alta	Comentario global ¿Por qué se ha otorgado determinado nivel de importancia o criticidad para cada componente o para todos en general?
INSTRUMENTACIÓN BASE	Flujómetros electromagnéticos											
	Sensores de presión					N/A			N/A			
	Válvulas control proporcional					N/A						
	Sensores de nivel											
	Bombas con variador de frecuencia											

SISTEMAS DE CONTROL AUTOMÁTICO	Sistema SCADA					N/A						
	PLC (Programmable Logic Controller)											
	Sistemas de alarma											
SISTEMAS DE SEGURIDAD	Válvulas de alivio de presión					N/A			N/A			
	Sistema contención secundaria								N/A			
	Detectores de fuga											
				$\Sigma(x)/n$	(CONTARA(X)/n)*100%				(CONTARA(X)/n)*100%			$\Sigma(x)/n$

Anexo 4. Formato de guía de revisión documental del nivel de SRD basado en el control de procesos, según las capacidades de control, antes de la implementación del SRD

Estadígrafos	Control de Concentración											Control de parámetros críticos							
	Control independientes de celdas			Tiempo de ajuste de concentraciones (horas)			Precisión de concentración objetivo por celda (%)					Precisión de flujo de riego por celda (m3/h)				Tiempo de respuesta a desviaciones en válvulas automáticas para regular caudal de riego (en segundos)			
	n° de celdas con control independiente	n° total de celdas	Control de celdas	Tiempo de ajuste en h	Tiempo previsto h	Control del tiempo de ajuste de concentración del reactivo = (Tiempo previsto / Tiempo de ajuste) * 100%	Concentración real (ppm o g/m3)	Concentración objetivo (ppm o g/m3)	Precisión = $(1 - \frac{ Concentración\ real - Concentración\ objetivo }{Concentración\ objetivo}) * 100\%$	Precisión prevista	Efectividad del control de concentraciones = $\frac{Precisión}{Precisión\ prevista} * 100\%$	Flujo real	Flujo objetivo	Precisión = $(1 - \frac{Flujo\ real - Flujo\ objetivo}{Flujo\ objetivo}) * 100\%$	Precisión prevista	Efectividad del control de flujo de riego = $\frac{Precisión}{Precisión\ prevista} * 100\%$	Tiempo de ajuste en segundos	Tiempo previsto en segundos	Control del tiempo de ajuste del caudal de riego = (Tiempo previsto / Tiempo de ajuste) * 100%
Promedio																			
Mínimo																			
Máximo																			
moda (el valor que más se presenta)																			

Anexo 5. Data relacionada a la productividad en la recuperación del oro

5.a) Curva de extracción del Au a distintas concentraciones en función del tiempo

DÍAS	40 ppm	60 ppm	80 ppm	100 ppm
0	0,00	0,00	0,00	0,00
1	10,62	16,76	18,03	19,94
2	23,10	40,03	43,97	46,85
3	35,02	46,31	52,11	55,10
4	44,50	54,31	58,87	61,45
5	54,62	60,69	66,22	70,58
6	60,71	64,71	67,88	74,89
7	66,97	65,59	70,95	77,54
8	69,38	68,31	74,00	79,72
9	71,77	70,86	77,99	81,44
10	74,53	73,85	79,31	82,14
11	78,51	75,53	82,03	82,50
12	79,19	77,17	82,84	82,98
13	79,81	78,91	83,59	83,48
14	80,23	80,08	84,05	83,96
15	80,63	81,05	84,26	84,31
16	81,02	81,71	84,62	84,62
17	81,17	82,14	84,77	84,88
18	81,45	82,54	84,97	85,00
19	81,72	82,95	85,19	85,25
20	81,98	83,33	85,49	85,49
21	82,23	83,67	85,68	85,67
22	82,50	84,07	85,86	85,90
23	82,76	84,42	86,01	86,09
24	82,90	84,69	86,09	86,25
25	83,02	84,94	86,20	86,37
26	83,16	85,15	86,32	86,43
27	83,35	85,40	86,40	86,52
28	83,54	85,53	86,48	86,59
29	83,73	85,67	86,52	86,67
30	83,92	85,83	86,59	86,78
31	84,09	85,99	86,64	86,87
32	84,25	86,07	86,70	86,91
33	84,33	86,25	86,80	86,96
34	84,43	86,38	86,84	87,02
35	84,54	86,51	86,95	87,10
36	84,67	86,68	87,02	87,14
37	84,79	86,71	87,12	87,20
38	84,93	86,80	87,14	87,27
39	85,06	86,89	87,20	87,31
40	85,13	86,99	87,25	87,37
41	85,19	87,12	87,31	87,45
42	85,26	87,17	87,37	87,49
43	85,37	87,23	87,40	87,52
44	85,48	87,32	87,44	87,55
45	85,60	87,41	87,47	87,59
46	85,68	87,50	87,51	87,64
47	85,71	87,52	87,55	87,69
48	85,74	87,55	87,58	87,72

49	85,75	87,58	87,60	87,74
50	85,77	87,60	87,62	87,78
51	85,79	87,61	87,64	87,80
52	85,81	87,63	87,65	87,82
53	85,83	87,64	87,67	87,85
54	85,86	87,66	87,69	87,89
55	85,88	87,68	87,71	87,96
56	85,90	87,70	87,73	87,99
57	85,91	87,70	87,74	88,00
58	85,93	87,72	87,76	88,02
59	85,95	87,74	87,78	88,04
60	85,97	87,76	87,80	88,06

5.b) Concentraciones del oro en solución rica vs concentraciones del oro en solución barren

	MES	Concentración de Au - Pregnant (ppm)	Concentración de Au - Barren (ppm)
PRE TEST	Feb-21	0,2926	0,0138
	Mar-21	0,1894	0,0127
	Abr-21	0,1997	0,0152
	May-21	0,2075	0,0143
	Jun-21	0,1432	0,0141
	Jul-21	0,1683	0,0148
	Ago-21	0,1856	0,0154
	Set-21	0,1894	0,0150
	Oct-21	0,2043	0,0149
	Nov-21	0,2102	0,0137
	Dic-21	0,2935	0,0132
	Ene-22	0,1753	0,0131
	Feb-22	0,1518	0,0131
	Mar-22	0,1551	0,0131
POS TEST	Abr-22	0,1186	0,0131
	May-22	0,1072	0,0130
	Jun-22	0,1646	0,0132
	Jul-22	0,1681	0,0135
	Ago-22	0,1638	0,0132
	Set-22	0,1474	0,0130
	Oct-22	0,2167	0,0135
	Nov-22	0,2359	0,0136
	Dic-22	0,2803	0,0135
	Ene-23	0,1366	0,0132
	Feb-23	0,1769	0,0133
	Mar-23	0,1479	0,0133
	Abr-23	0,1339	0,0133
	May-23	0,1478	0,0133
	Jun-23	0,1808	0,0132
	Jul-23	0,1754	0,0132
	Ago-23	0,1460	0,0132
	Set-23	0,1645	0,0132
	Oct-23	0,1863	0,0136
	Nov-23	0,2211	0,0132
	Dic-23	0,2332	0,0134
	Ene-24	0,1181	0,0131
	Feb-24	0,1142	0,0130
	Mar-24	0,1467	0,0130
	Abr-24	0,1317	0,0130
	May-24	0,1361	0,0131
	Jun-24	0,1523	0,0131
	Jul-24	0,1604	0,0132
	Ago-24	0,1513	0,0131
	Set-24	0,1404	0,0130
	Oct-24	0,1606	0,0132

5.c) Producción de oro y consumo de NaCN en kg y en \$

	MES	PRODUCCION N Au (oz)	NaCN Kg	Au (oz) / NaCN (kg) - Pre test	Costo del CN (en dólares)	Au (oz) / NaCN (\$) - Pre test
PRE TEST	Feb-21	8.887,49	283.454,00	0,0314	615095,18	0,01444896
	Mar-21	7.882,53	206.780,00	0,0381	448712,6	0,017567
	Abr-21	6.167,20	211.200,00	0,0292	458304	0,01345657
	May-21	6.051,87	229.480,00	0,0264	497971,6	0,01215303
	Jun-21	7.085,03	236.739,00	0,0299	513723,63	0,01379153
	Jul-21	9.372,12	287.465,00	0,0326	623799,05	0,01502426
	Ago-21	15.432,97	444.000,00	0,0348	963480	0,01601795
	Set-21	10.996,77	215.600,00	0,0510	467852	0,02350481
	Oct-21	8.478,48	204.600,00	0,0414	443982	0,01909646
	Nov-21	7.797,88	220.000,00	0,0354	477400	0,01633406
	Dic-21	9.363,17	251.805,00	0,0372	546416,85	0,01713558
	Ene-22	9.437,84	264.180,00	0,0357	686868	0,0137404
	Feb-22	6.258,80	216.700,00	0,0289	563420	0,01110859
	POST TEST	Mar-22	6.438,42	129.400,00	0,0498	336.440,00
Abr-22		5.246,30	125.400,00	0,0418	326.040,00	0,0161
May-22		5.476,51	124.700,00	0,0439	324.220,00	0,0169
Jun-22		6.599,78	123.200,00	0,0536	320.320,00	0,0206
Jul-22		6.970,87	118.200,00	0,0590	307.320,00	0,0227
Ago-22		7.434,67	140.900,00	0,0528	366.340,00	0,0203
Set-22		8.142,29	157.300,00	0,0518	408.980,00	0,0199
Oct-22		10.150,26	169.700,00	0,0598	441.220,00	0,0230
Nov-22		10.968,83	169.800,00	0,0646	441.480,00	0,0248
Dic-22		14.078,66	170.300,00	0,0827	442.780,00	0,0318
Ene-23		6.306,18	167.200,00	0,0377	459.800,00	0,0137
Feb-23		7.198,79	144.100,00	0,0500	396.275,00	0,0182
Mar-23		6.334,79	141.900,00	0,0446	390.225,00	0,0162
Abr-23		7.446,17	154.000,00	0,0484	423.500,00	0,0176
May-23	7.725,32	141.900,00	0,0544	390.225,00	0,0198	

Jun-23	9.069,25	130.900,00	0,0693	359.975,00	0,0252
Jul-23	9.212,24	150.000,00	0,0614	412.500,00	0,0223
Ago-23	8.198,03	147.100,00	0,0557	404.525,00	0,0203
Set-23	8.554,04	157.000,00	0,0545	431.750,00	0,0198
Oct-23	9.911,24	159.800,00	0,0620	439.450,00	0,0226
Nov-23	11.066,70	160.100,00	0,0691	440.275,00	0,0251
Dic-23	13.214,40	160.500,00	0,0823	441.375,00	0,0299
Ene-24	5.425,80	98.700,00	0,0550	256.620,00	0,0211
Feb-24	6.627,49	114.400,00	0,0579	297.440,00	0,0223
Mar-24	8.613,09	165.200,00	0,0521	429.520,00	0,0201
Abr-24	7.215,40	131.440,00	0,0549	341.744,00	0,0211
May-24	7.988,03	155.600,00	0,0513	404.560,00	0,0197
Jun-24	8.041,00	136.000,00	0,0591	353.600,00	0,0227
Jul-24	8.501,30	134.400,00	0,0633	349.440,00	0,0243
Ago-24	8.367,63	140.800,00	0,0594	366.080,00	0,0229
Set-24	8.946,21	164.000,00	0,0546	426.400,00	0,0210
Oct-24	9.563,23	189.600,00	0,0504	492.960,00	0,0194

5.d) Consumo de NaCN por TMS

	PERIODO MENSUAL	NaCN Kg	TMS	NaCN/TMS - Pre test
PRE TEST	Feb-21	283.454	738.500	0,38
	Mar-21	206.780	1.033.816	0,20
	Abr-21	211.200	778.065	0,27
	May-21	229.480	639.692	0,36
	Jun-21	236.739	876.811	0,27
	Jul-21	287.465	845.485	0,34
	Ago-21	444.000	878.229	0,51
	Set-21	215.600	1.158.939	0,19
	Oct-21	204.600	1.326.743	0,15
	Nov-21	220.000	1.486.814	0,15
	Dic-21	251.805	1.237.413	0,20
	Ene-22	264.180	709.528	0,37
	Feb-22	216.700	775.164	0,28
	POS TEST	Mar-22	129.400	527.087
Abr-22		125.400	735.915	0,17
May-22		124.700	697.145	0,18
Jun-22		123.200	799.455	0,15
Jul-22		118.200	991.537	0,12
Ago-22		140.900	1.103.943	0,13
Set-22		157.300	1.554.962	0,10
Oct-22		169.700	1.603.245	0,11
Nov-22		169.800	1.127.532	0,15
Dic-22		170.300	1.019.157	0,17
Ene-23		167.200	906.357	0,18
Feb-23		144.100	824.831	0,17
Mar-23		141.900	733.940	0,19
Abr-23		154.000	864.234	0,18
May-23		141.900	975.838	0,15
Jun-23		130.900	1.075.099	0,12
Jul-23		150.000	1.088.424	0,14
Ago-23		147.100	1.012.920	0,15
Set-23		157.000	1.069.723	0,15
Oct-23		159.800	1.006.335	0,16
Nov-23		160.100	944.775	0,17
Dic-23		160.500	901.170	0,18
Ene-24		98.700	498.045	0,20
Feb-24		114.400	785.935	0,15
Mar-24		165.200	991.657	0,17
Abr-24		131.440	812.345	0,16
May-24		155.600	853.678	0,18
Jun-24		136.000	714.980	0,19
Jul-24		134.400	665.570	0,20
Ago-24		140.800	780.022	0,18
Set-24		164.000	880.253	0,19
Oct-24		189.600	878.571	0,22

5.e) Consumo de NaCN según flujo de riego y concentración en ppm

	PERIODO MENSUAL	NaCN kg	Flujo (m ³ /h)	NaCN (ppm)
PRE TEST	Feb-21	283.454	1.786,00	77
	Mar-21	206.780	1.845,23	79,2
	Abr-21	211.200	1.837,87	82
	May-21	229.480	1.821,21	77
	Jun-21	236.739	1.959,44	80,3
	Jul-21	287.465	1.979,39	77
	Ago-21	444.000	2.082,32	79
	Set-21	215.600	2.100,88	75
	Oct-21	204.600	2.191,03	81
	Nov-21	220.000	2.078,64	80,4
	Dic-21	251.805	2.097,41	79,3
	Ene-22	264.180	2.119,24	96
	Feb-22	216.700	2.172,43	84
POST TEST	Mar-22	129.400	2.292,52	50
	Abr-22	125.400	2.256,68	47
	May-22	124.700	2.266,99	52,5
	Jun-22	123.200	2.253,65	54,9
	Jul-22	118.200	2.250,93	53
	Ago-22	140.900	2.198,06	55
	Set-22	157.300	2.195,69	55,5
	Oct-22	169.700	2.218,63	57
	Nov-22	169.800	2.287,96	63
	Dic-22	170.300	2.292,70	66
	Ene-23	167.200	2.251,70	66,5
	Feb-23	144.100	2.138,70	66
	Mar-23	141.900	2.223,52	61
	Abr-23	154.000	2.262,51	63
	May-23	141.900	2.110,13	65
	Jun-23	130.900	2.080,44	62
	Jul-23	150.000	2.167,97	66
	Ago-23	147.100	2.118,36	68
	Set-23	157.000	2.063,20	68
	Oct-23	159.800	2.185,41	68,5
	Nov-23	160.100	2.256,46	62,8
	Dic-23	160.500	2.295,40	61
	Ene-24	98.700	2.332,11	41
	Feb-24	114.400	2.185,38	49
	Mar-24	165.200	2.284,51	65
	Abr-24	131.440	2.297,10	52
	May-24	155.600	2.310,83	61
	Jun-24	136.000	2.225,48	52
Jul-24	134.400	2.222,53	56	
Ago-24	140.800	2.280,00	54	
Set-24	164.000	2.251,12	66	
Oct-24	189.600	2.313,22	63	

5.f) Concentración de NaCN en riego vs concentración de Cu y Hg

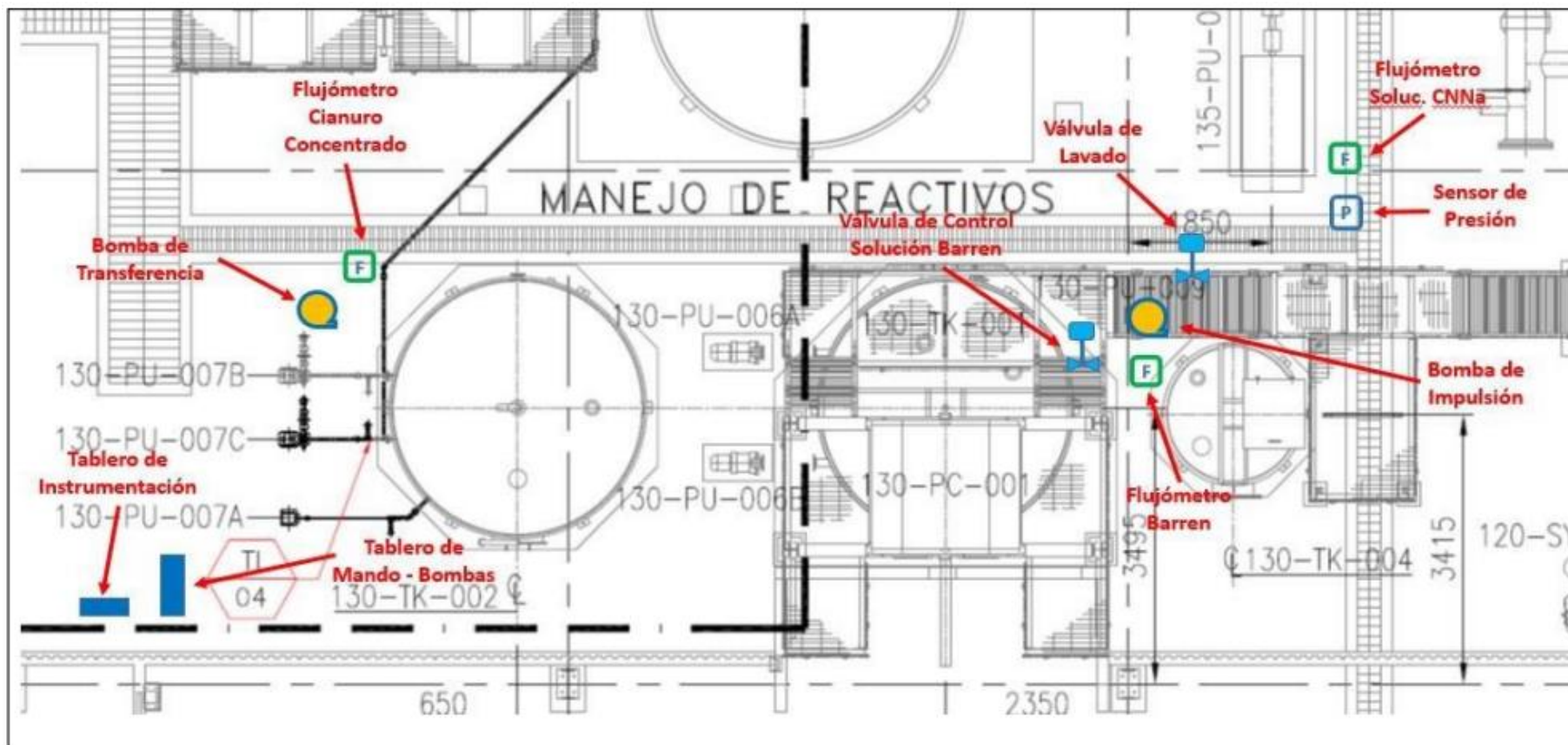
	Periodo Mensual	NaCN riego (ppm)	Cu en solución rica	Hg en solución rica
PRE TEST	Feb-21	77,00	5,8	1,2
	Mar-21	79,20	5,7	1,4
	Abr-21	82,00	5,8	1,6
	May-21	77,00	5,7	1,1
	Jun-21	80,30	5,4	1,6
	Jul-21	77,00	5,7	1,5
	Ago-21	79,00	5,8	1,7
	Set-21	75,00	5,7	1,4
	Oct-21	81,00	7,5	1,4
	Nov-21	80,40	8	1,4
	Dic-21	79,30	9	1,4
	Ene-22	96,00	8,64	1,7
	Feb-22	84,00	7,25	1,68
	POST TEST	Mar-22	50,00	6,47
Abr-22		47,00	3,05	1,12
May-22		52,50	3,4	0,86
Jun-22		54,90	4,58	1,12
Jul-22		53,00	3,18	1,07
Ago-22		55,00	3,31	1,10
Set-22		55,50	3,22	0,81
Oct-22		57,00	4,41	1,11
Nov-22		63,00	4,51	1,31
Dic-22		66,00	4,48	1,23
Ene-23		66,50	4,41	1,18
Feb-23		68,00	4,38	1,12
Mar-23		68,40	4,43	1,11
Abr-23		68,60	4,65	1,07
May-23		65,00	4,16	1,18
Jun-23		67,00	4,77	1,56
Jul-23		66,00	4,46	1,35
Ago-23		68,00	3,83	1,33
Set-23	68,00	4,63	1,12	
Oct-23	68,50	4,53	1,03	

5.g) Producción de oro por TMS

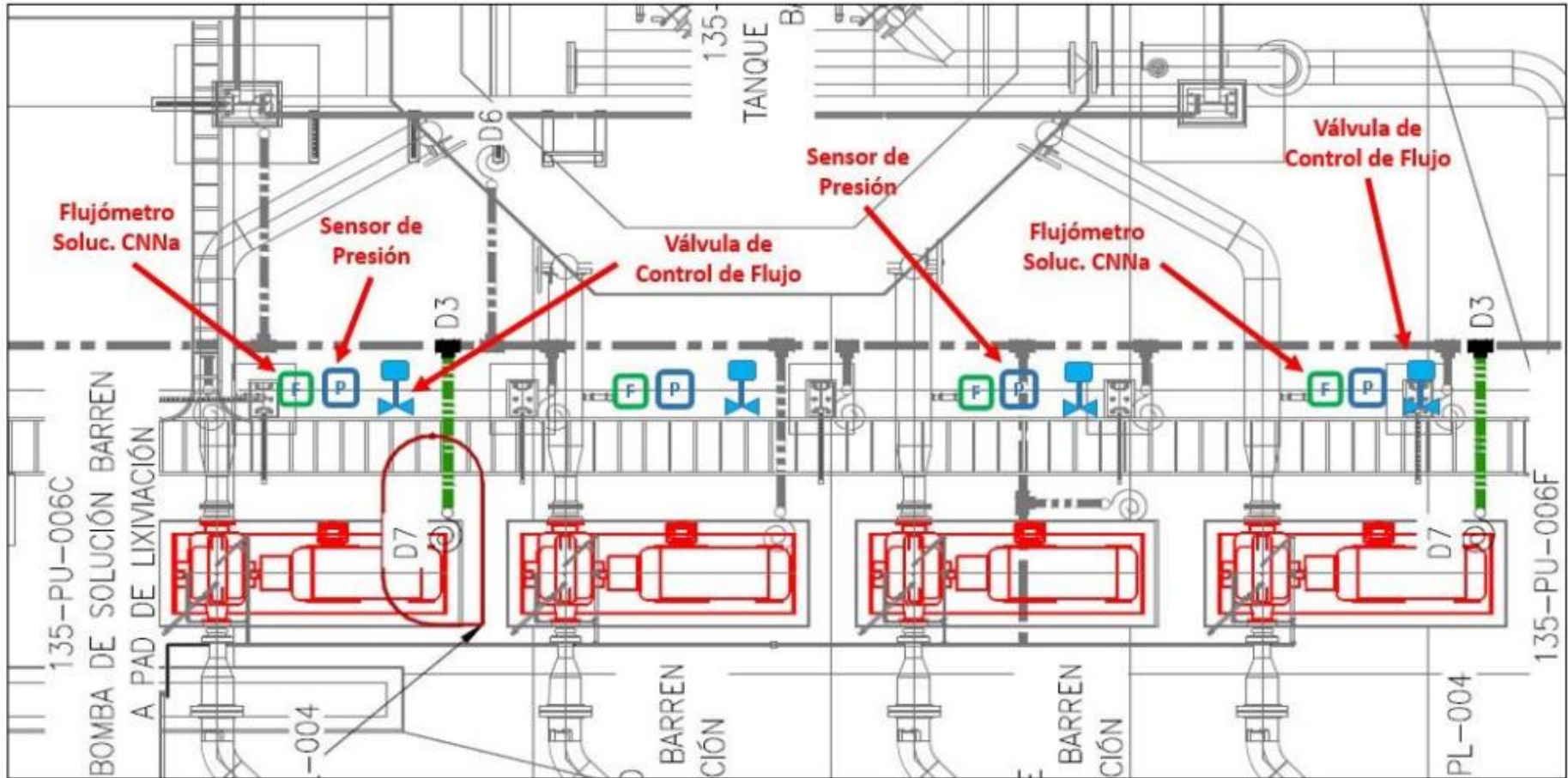
	MES	PRODUCCION Au (oz)	TMS	Au (oz) / TMS Pre test
PRE TEST	Feb-21	8.887,49	738.500	0,0120
	Mar-21	7.882,53	1.033.816	0,0076
	Abr-21	6.167,20	778.065	0,0079
	May-21	6.051,87	639.692	0,0095
	Jun-21	7.085,03	876.811	0,0081
	Jul-21	9.372,12	845.485	0,0111
	Ago-21	15.432,97	878.229	0,0176
	Set-21	10.996,77	1.158.939	0,0095
	Oct-21	8.478,48	1.326.743	0,0064
	Nov-21	7.797,88	1.486.814	0,0052
	Dic-21	9.363,17	1.237.413	0,0076
	Ene-22	9.437,84	709.528	0,0133
	Feb-22	6.258,80	775.164	0,0081
	POST TEST	Mar-22	6.438,42	527.087
Abr-22		5.246,30	735.915	0,0071
May-22		5.476,51	697.145	0,0079
Jun-22		6.599,78	799.455	0,0083
Jul-22		6.970,87	991.537	0,0070
Ago-22		7.434,67	1.103.943	0,0067
Set-22		8.142,29	1.554.962	0,0052
Oct-22		10.150,26	1.603.245	0,0063
Nov-22		10.968,83	1.127.532	0,0097
Dic-22		14.078,66	1.019.157	0,0138
Ene-23		6.306,18	906.357	0,0070
Feb-23		7.198,79	824.831	0,0087
Mar-23		6.334,79	733.940	0,0086
Abr-23		7.446,17	864.234	0,0086
May-23		7.725,32	975.838	0,0079
Jun-23		9.069,25	1.075.099	0,0084
Jul-23		9.212,24	1.088.424	0,0085
Ago-23		8.198,03	1.012.920	0,0081
Set-23		8.554,04	1.069.723	0,0080
Oct-23		9.911,24	1.006.335	0,0098
Nov-23		11.066,70	944.775	0,0117
Dic-23		13.214,40	901.170	0,0147
Ene-24		5.425,80	498.045	0,0109
Feb-24		6.627,49	785.935	0,0084
Mar-24		8.613,09	991.657	0,0087
Abr-24		7.215,40	812.345	0,0089
May-24		7.988,03	853.678	0,0094
Jun-24		8.041,00	714.980	0,0112
Jul-24		8.501,30	665.570	0,0128
Ago-24		8.367,63	780.022	0,0107
Set-24	8.946,21	880.253	0,0102	
Oct-24	9.563,23	878.571	0,0109	

Anexo 6. Evidencias de implementación del SRD basado en el control de procesos

Equipos en plataforma de planta ADR



Equipos en plataforma de RE-BOMBEO



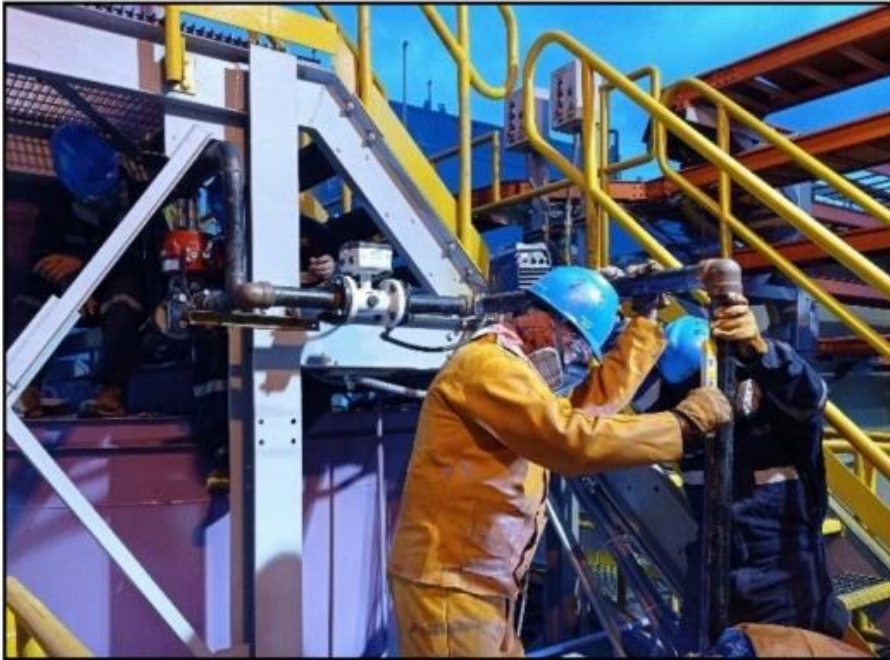
Montaje de línea barren de servicio para dilución



Montaje de válvula de control para barren de servicio



Montaje de flujómetro para línea barren de servicio



Montaje de bomba de impulsión



Montaje de flujómetro de línea de impulsión



Montaje de tuberías casing para líneas de impulsión



Soldadura y montaje de líneas de inyección



Montaje de válvulas de control y flujómetros para inyección

