



QUÍMICA QUE SALVA. LA TRANSFORMACIÓN DEL CIANURO EN LA MINERÍA MODERNA

Gustavo Raúl Fernández Essenwanger
Emérito Gustavo Fernández Essenwanger
Gustavo Paul Fernández Chávez
Antonio Manuel Otoyá Zelada
Walter Moreno Eustaquio
Marcelino Torres Villanueva
[Autores]



Gustavo Raúl Fernández Essenwanger | Emérito Gustavo Fernández
Essenwanger | Gustavo Paul Fernández Chávez | Antonio Manuel Otoyá
Zelada | Walter Moreno Eustaquio | Marcelino Torres Villanueva

Química que salva

La transformación del cianuro en la minería moderna



Quito, Ecuador
2025

Gustavo Raúl Fernández Essenwanger | Emérito Gustavo Fernández
Essenwanger | Gustavo Paul Fernández Chávez | Antonio Manuel Otoyá
Zelada | Walter Moreno Eustaquio | Marcelino Torres Villanueva

Chemistry that saves

The transformation of cyanide in modern mining



Quito, Ecuador
2025

Religación Press

[Ideas desde el Sur Global]

Equipo Editorial / Editorial team

Ana B. Benalcázar
Editora Jefe / Editor in Chief
Felipe Carrión
Director de Comunicación / Scientific Communication Director
Melissa Díaz
Coordinadora Editorial / Editorial Coordinator
Sarahi Licango Rojas
Asistente Editorial / Editorial Assistant

Consejo Editorial / Editorial Board

Jean-Arsène Yao
Dilrabo Keldiyorovna Bakhronova
Fabiana Parra
Mateus Gamba Torres
Siti Mistima Maat
Nikoleta Zampaki
Silvina Sosa

Religación Press, es parte del fondo editorial del
Centro de Investigaciones CICSHAL-RELIGACIÓN |
Religación Press, is part of the editorial collection
of the CICSHAL-RELIGACIÓN Research Center |
Diseño, diagramación y portada | Design, layout and
cover: Religación Press.
CP 170515, Quito, Ecuador. América del Sur.
Correo electrónico | E-mail: press@religacion.com
www.religacion.com

Disponible para su descarga gratuita en
| Available for free download at | [https://
press.religacion.com](https://press.religacion.com)

Este título se publica bajo una licencia de
Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0)
This title is published under an Attribution
4.0 International (CC BY 4.0) license.



CITAR COMO [APA 7]

Fernández Essenwanger, G. R., Fernández Essenwanger, E. G., Fernández Chávez, G. P., Otoya Zelada, A. M., Moreno Eustaquio, W., y Torres Villanueva, M. (2025). *Química que salva. La transformación del cianuro en la minería moderna*. Religación Press. <https://doi.org/10.46652/ReligacionPress.264>

Derechos de autor | Copyright: Religación Press, Gustavo Raúl Fernández Essenwanger, Emérito Gustavo Fernández Essenwanger, Gustavo Paul Fernández Chávez, Antonio Manuel Otoya Zelada, Walter Moreno Eustaquio, Marcelino Torres Villanueva

Primera Edición | First Edition: 2025

Editorial | Publisher: Religación Press

Materia Dewey | Dewey Subject: 660.2 – Ingeniería química

Clasificación Thema | Thema Subject Categories: PNF - Química industrial | RNH - Minería y extracción de recursos | TQ - Ingeniería química | RND - Gestión ambiental y sostenibilidad

BISAC: SC1013060 – SCIENCE / Chemistry / Industrial & Technical

Público objetivo | Target audience: Profesional / Académico | Professional / Academic

Colección | Collection: Ingeniería

Soporte | Format: PDF / Digital

Publicación | Publication date: 2025-04-07

ISBN: 978-9942-561-13-8

Título: Química que salva. La transformación del cianuro en la minería moderna

Chemistry that saves. The transformation of cyanide in modern mining

A química que salva. A transformação do cianeto na mineração moderna

Nota obra derivada: El libro retoma y amplía, mediante el trabajo colaborativo de un grupo de investigadores, los hallazgos y aportes presentados en la tesis original, enriqueciendo su contenido con nuevos enfoques, análisis y perspectivas que profundizan en los temas abordados en "Concentraciones de Peróxido y su efecto cinético en las soluciones cianuradas en minera Coimolache. Hualgayoc, Cajamarca" presentada ante la Universidad Nacional de Trujillo por Gustavo Raúl Fernández Essenwanger en 2024.

Note: The book takes up and expands, through the collaborative work of a group of researchers, the findings and contributions presented in the original dissertation, enriching its content with new approaches, analyses and perspectives that deepen the topics addressed. "Concentraciones de Peróxido y su efecto cinético en las soluciones cianuradas en minera Coimolache. Hualgayoc, Cajamarca" presented to the Universidad Nacional de Trujillo by Gustavo Raúl Fernández Essenwanger in 2024.

Revisión por pares

La presente obra fue sometida a un proceso de evaluación mediante el sistema de dictaminación por pares externos bajo la modalidad doble ciego. En virtud de este procedimiento, la investigación que se desarrolla en este libro ha sido avalada por expertos en la materia, quienes realizaron una valoración objetiva basada en criterios científicos, asegurando con ello la rigurosidad académica y la consistencia metodológica del estudio.

Peer Review

This work was subjected to an evaluation process by means of a double-blind peer review system. By virtue of this procedure, the research developed in this book has been endorsed by experts in the field, who made an objective evaluation based on scientific criteria, thus ensuring the academic rigor and methodological consistency of the study.

Sobre los autores/ About the authors

Gustavo Raúl Fernández Essenwanger

Ingeniero químico, 18 años en minería aurífera. Dominio de planta Merrill Crowe. Planta de aguas acidas, planta de residuales, planta agua potable, estudios postgrado: master en ingeniería ambiental, Doctor en Ingeniería Ambiental.

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-8089-431X>

gfernandeze@unitru.edu.pe

raferessgoldmining@gmail.com

Emérito Gustavo Fernández Essenwanger

Ingeniero Metalurgista con MBA, con 25 años de experiencia en Plantas Industriales Hidrometalúrgicas y Plantas concentradoras de producción de oro, plata, cobre, plomo y zinc. Diseño y montaje de Plantas, Diseño y ejecución de Modelos Geo metalúrgicos.

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0009-0004-4642-9897>

emerito.fernandez@minsur.com

gustavoessenw@hotmail.com

Gustavo Paul Fernández Chávez

Ingeniero Químico, Operador Plantas CIC., planta chancado Lagunas norte Boro Misquichilca, 3 años en plantas de extracción de oro, con reconocimiento a excelente, calificación en la tesis para licenciatura: "Recuperación de oro y plata con cianuración de mineral sulfurado con pretratamiento de diferentes concentraciones de H₂O₂"

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0009-0001-5765-3737>

gpfernandez@unitru.edu.pe

gpfernandez1997@gmail.com

Antonio Manuel Otoya Zelada

Doctor en Ingeniería Química Ambiental, Maestro en Ciencias y Título profesional de Ingeniero Químico, experiencia docente, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo (UNASAM), facultad de ciencias básicas y en la Universidad Nacional de Trujillo (UNT), facultad de Ingeniería Química.

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0000-0001-6460-969X>

amotoyaz@unitru.edu.pe

antonio_otoya@hotmail.com

Walter Moreno Eustaquio

Ingeniero Químico e Ingeniero Ambiental, Maestro en Ciencias Económicas Mención Administración de Negocios. Estudios Concluidos en Doctorado Ciencias e Ingeniería.

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0000-0001-7299-3943>

wmoreno@unitru.edu.pe

wmorenoe255@hotmail.com

Marcelino Torres Villanueva

Ingeniero Químico, Ingeniero de Sistemas con maestría en Informática en la Pontificias Universidad Católica del Perú. Docente del Departamento de Ingeniería de Sistemas de la Universidad Nacional de Trujillo. Autor de libros de Lenguajes de Programación.

Universidad Nacional de Trujillo | Trujillo | Perú

<https://orcid.org/0000-0002-9797-1510>

mtorres@unitru.edu.pe

torresmarcelino1@gmail.com

Resumen

En una planta industrial de tratamiento de efluentes mineros, se estudió el proceso de detoxificación de soluciones con cianuro, utilizando peróxido de hidrógeno en dos concentraciones distintas. El objetivo era analizar cómo variaba la velocidad de degradación del cianuro libre bajo condiciones controladas de pH y en presencia de cobre como catalizador. Se compararon dos sistemas de tanques en paralelo, midiendo la disminución del cianuro a lo largo del tiempo hasta su conversión en compuestos menos tóxicos. Los resultados demostraron que la concentración más alta de peróxido aceleraba significativamente la reacción, logrando una degradación más eficiente con un menor consumo de reactivos. Este hallazgo permitió optimizar el proceso, reduciendo costos sin comprometer la efectividad del tratamiento. El estudio confirmó que, bajo las condiciones adecuadas, es posible neutralizar el cianuro de manera confiable y sostenible, aportando soluciones prácticas para la industria minera.

Palabras clave: Detoxificación, Cianuro, Peróxido de hidrógeno, Catálisis, Optimización.

Abstract

In an industrial mining effluent treatment plant, the detoxification process of cyanide solutions was studied using hydrogen peroxide at two different concentrations. The objective was to analyze how the degradation rate of free cyanide varied under controlled pH conditions and in the presence of copper as a catalyst. Two tank systems were compared in parallel, measuring the decrease of cyanide over time until its conversion into less toxic compounds. The results showed that the higher concentration of peroxide significantly accelerated the reaction, achieving a more efficient degradation with a lower consumption of reagents. This finding allowed optimizing the process, reducing costs without compromising the effectiveness of the treatment. The study confirmed that, under the right conditions, it is possible to neutralize cyanide in a reliable and sustainable manner, providing practical solutions for the mining industry.

Keywords: Detoxification, Cyanide, Hydrogen peroxide, Catalysis, Optimization.

Resumo

Em uma estação de tratamento de efluentes de mineração industrial, o processo de desintoxicação de soluções de cianeto foi estudado usando peróxido de hidrogênio em duas concentrações diferentes. O objetivo era analisar como a taxa de degradação do cianeto livre variava sob condições controladas de pH e na presença de cobre como catalisador. Dois sistemas de tanques foram comparados em paralelo, medindo a diminuição do cianeto ao longo do tempo até sua conversão em compostos menos tóxicos. Os resultados mostraram que a maior concentração de peróxido acelerou significativamente a reação, obtendo uma degradação mais eficiente com menor consumo de reagentes. Essa descoberta permitiu que o processo fosse otimizado, reduzindo os custos sem comprometer a eficácia do tratamento. O estudo confirmou que, sob as condições certas, é possível neutralizar o cianeto de forma confiável e sustentável, fornecendo soluções práticas para o setor de mineração.

Palavras-chave: Desintoxicação, Cianeto, Peróxido de hidrogênio, Catálise, Otimização.

Contenido

Revisión por pares	6
Peer Review	6
Sobre los autores/ About the authors	8
Resumen	10
Abstract	10
Resumo	11
Capítulo 1	18
El Cianuro en la minería: procesos, riesgos y métodos de tratamiento	18
Introducción al Uso Industrial del Cianuro	18
El Proceso Merrill-Crowe: Tecnología Estándar para Recuperación de Metales	19
Generación y Caracterización de Efluentes Cianurados	19
Técnicas de Degradación y Tratamiento de Cianuros	20
Operaciones Integrales en Minera Coimolache	20
Control de Calidad y Cumplimiento Normativo	21
Una Minería Sustentable	21
Capítulo 2	24
Optimización del Tratamiento de Efluentes Cianurados en Minería	24
Estrategias para la Gestión de Desbalances Hídricos y Reducción de Costos	24
Fundamentos Científicos del Proceso de Detoxificación	25
Metodología de Investigación y Protocolos Experimentales	28
Resultados Esperados y Beneficios Potenciales	28
Etapa 1. Catalización	29
Etapa 2. Oxidación	30
Etapa 3: Hidrólisis	30
Metodología	31
Objetivo General	31
Población	31
Capítulo 3	36
Optimización del Tratamiento de Cianuro en Efluentes Mineros	36
Evaluación Comparativa de Diferentes Concentraciones de Peróxido de Hidrógeno	36
Fundamentos Cinéticos del Proceso de Oxidación	36
Eficiencia en la Reducción de Concentraciones de Cianuro	37
Evaluación Comparativa de los Esquemas de Dosificación	37
Dinámica del Proceso en los Tanques de Tratamiento	37

Análisis de Resultados y Validación Estadística	38
Implicaciones Operativas y Recomendaciones	38
Conclusiones	53
Recomendaciones	54
Referencias	55

Tablas

Tabla 1. Efecto de concentraciones de H ₂ O ₂ en detoxificación	39
Tabla 2. Prueba de normalidad de la concentración de cianuro libre sometida a concentración de H ₂ O ₂ al 50%.	39
Tabla 3. Resumen Estadístico para concentración de cianuro utilizando H ₂ O ₂ al 50%	40
Tabla 4. Análisis ANOVA para cianuro con H ₂ O ₂ 50%	40
Tabla 5. Prueba Tukey para cianuro por TK	41
Tabla 6. Normalidad de cianuro con H ₂ O ₂ 70%	41
Tabla 7. Estadísticos de cianuro con H ₂ O ₂ 70%	42
Tabla 9. Prueba de múltiples rangos para concentración de cianuro por TK Porcentaje Tukey HSD.	43
Tabla 10. Prueba de normalidad de los datos de concentración de cianuro libre entre los últimos TKs sometida a concentración de H ₂ O ₂ al 50% y 70%	43
Tabla 11. Resumen Estadístico para concentración de cianuro utilizando H ₂ O ₂ al 50% y 70%	44
Tabla 12. Anova de datos de Concentración de Cianuro final cuando se utiliza H ₂ O ₂ al 50% y 70%.	44
Tabla 13. Prueba de múltiples rangos para concentración de cianuro tratados con H ₂ O ₂ al 50% y 70%. Porcentaje Tukey HSD.	45
Tabla 14. Cuadro de datos de la reacción orden cero $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%	45
Tabla 15. Cuadro de datos de la reacción orden uno $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%	46
Tabla 16. Cuadro de datos de la reacción orden dos $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%.	48
Tabla 17. Cuadro de datos de la reacción orden cero $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 70%	49
Tabla 18. Cuadro de datos de la reacción orden uno $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 70%	50
Tabla 19. Cuadro de datos de la reacción orden dos $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 70%	51

Figuras

Figura 1. Foto del proceso de la planta de tratamientos de efluentes Coimolache-Cajamarca.	32
Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de detoxificación de cianuro	33
Figura 3. Evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%	46
Figura 4. Evaluación de reacción de orden $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 50%	47
Figura 5. Evaluación de reacción de orden $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 50%	48
Figura 6. Evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%	49
Figura 7. Evaluación de reacción de orden $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%	51
Figura 8. Evaluación de reacción de orden $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%	52
Figura 9. Evaluación de Flujos y Costos	53

Química que salva

La transformación del cianuro en la minería moderna

Capítulo 1

El Cianuro en la minería: procesos, riesgos y métodos de tratamiento

Introducción al Uso Industrial del Cianuro

Desde su introducción en los procesos industriales en 1889, el cianuro ha demostrado ser un compuesto químico de extraordinaria utilidad en múltiples aplicaciones productivas. Su capacidad única para formar complejos estables con diversos metales lo ha convertido en un componente esencial en la fabricación de pinturas, plásticos, textiles y papel, así como en procesos de galvanización metálica. Sin embargo, es en el sector minero donde su impacto ha sido más transformador, particularmente en la extracción de metales preciosos como oro y plata.

En el contexto específico de la minería global, aproximadamente el 6% de la producción mundial total de cianuro se destina a procesos extractivos. Este porcentaje, aunque aparentemente modesto, representa un avance tecnológico significativo al haber reemplazado casi por completo el antiguo método de amalgamación con mercurio, conocido tanto por su elevada toxicidad como por su menor eficiencia en la recuperación de metales. La transición hacia el uso de

cianuro marcó un punto de inflexión en la metalurgia extractiva, permitiendo no solo mayores porcentajes de recuperación sino también procesos más controlados y seguros.

El Proceso Merrill-Crowe: Tecnología Estándar para Recuperación de Metales

Entre las diversas metodologías desarrolladas para recuperar metales preciosos a partir de soluciones cianuradas, el proceso Merrill-Crowe se ha establecido como tecnología estándar en la industria minera. Este sofisticado proceso comienza con una solución cargada de metales que debe cumplir con parámetros estrictos de claridad, medidos en Unidades Nefelométricas de Turbidez (NTU), donde se requiere un valor inferior a 1 para garantizar la ausencia de partículas en suspensión que podrían interferir con el proceso.

La solución clarificada y con bajo contenido de oxígeno disuelto (menos de 1 ppm) pasa entonces a la etapa de precipitación, donde se añade zinc metálico en polvo. Este zinc reacciona con los iones de oro y plata en solución, formando complejos metálicos que precipitan. Los sólidos obtenidos en este proceso son posteriormente tratados térmicamente en hornos especializados llamados retortas, donde se eliminan posibles residuos de mercurio. La etapa final de fundición, que opera a aproximadamente 1300°C con la adición de fundentes específicos, permite la separación y purificación de los metales preciosos, obteniéndose finalmente lingotes de alta pureza.

Generación y Caracterización de Efluentes Cianurados

Las operaciones mineras que emplean lixiviación en pilas a tajo abierto generan volúmenes considerables de soluciones residuales que contienen diversos compuestos cianurados. Estos efluentes presentan características particulares que los convierten en un desafío ambiental significativo. Las soluciones típicamente contienen cianuros en diversas formas químicas, tanto libres como complejados con metales pesados, y se mantienen en un rango de pH alcalino (entre 10 y 11) para garantizar la estabilidad del sistema.

La toxicidad de estos efluentes varía considerablemente según la forma química específica del cianuro presente. Según la clasificación propuesta por Marsden y House (2006), podemos identificar cuatro categorías principales de compuestos cianurados según su grado de toxicidad y reactividad. El cianuro libre, compuesto por ácido cianhídrico (HCN) y el ion cianuro (CN⁻), representa la forma más tóxica y peligrosa. Los cianuros de fácil disociación, que incluyen

complejos metálicos (excepto con hierro), pueden liberar cianuro libre bajo ciertas condiciones ambientales. Por otro lado, los complejos más estables, principalmente con hierro, presentan una toxicidad significativamente menor. Finalmente, el cianuro total engloba todas las formas anteriores y representa la carga cianurada completa del efluente.

En los relaves mineros es frecuente encontrar complejos de cianuro con metales como níquel, zinc, hierro, cobalto, cobre y cadmio. Estos compuestos, que según estudios como los de Mas et al. (2009) presentan alta toxicidad para los seres vivos, representan un riesgo ambiental considerable, particularmente por su potencial de afectar ecosistemas acuáticos y terrestres, contaminar fuentes de agua potable y acumularse en cadenas tróficas.

Técnicas de Degradación y Tratamiento de Cianuros

Frente a los riesgos asociados con los efluentes cianurados, la industria minera ha desarrollado diversas estrategias de tratamiento. Entre los métodos disponibles destacan la degradación natural, que aunque económica resulta extremadamente lenta y dependiente de condiciones ambientales específicas; la oxidación con ozono, tecnología efectiva pero con altos costos operativos; y diversos procesos de oxidación química que emplean reactivos como el peróxido de hidrógeno.

Un caso paradigmático de implementación de estas tecnologías se encuentra en Minera Coimolache, donde se ha establecido un sistema avanzado de tratamiento que combina el uso de peróxido de hidrógeno al 50% como agente oxidante principal con cobre obtenido de las mismas soluciones residuales como catalizador. Este proceso de detoxificación transforma eficientemente el cianuro libre en cianato (OCN^-), compuesto de significativamente menor toxicidad. La etapa final de sedimentación asistida con floculantes permite la remoción de los complejos insolubles, garantizando que los efluentes tratados cumplan con los estándares ambientales más exigentes.

Operaciones Integrales en Minera Coimolache

El sistema de procesamiento implementado en Minera Coimolache representa un ejemplo de integración tecnológica en la minería moderna. La operación emplea un sofisticado sistema hidrometalúrgico que incluye dos bombas centrífugas de 450 HP con capacidad para manejar flujos de $1,000 \text{ m}^3$ por hora, dirigiendo las soluciones hacia un Pad de Lixiviación de 12 hectáreas

de extensión. El manejo de las soluciones se realiza a través de un sistema de tres pozas especializadas con capacidades estratificadas: la Poza Pregnant (40,000 m³) para soluciones cargadas, la Poza Intermedia (40,000 m³) para procesos de transición, y la Poza de Mayores Eventos (120,000 m³ de capacidad total, operando normalmente al 50% de su capacidad).

Este diseño permite mantener un balance hídrico preciso durante la mayor parte del año. Sin embargo, durante la temporada de lluvias (entre octubre y marzo), el sistema enfrenta desafíos operativos significativos. El aumento en los volúmenes de agua puede elevar los niveles en las pozas hasta un 55% de su capacidad, activando protocolos de emergencia y requiriendo la operación a máxima capacidad de la planta de tratamiento de efluentes. Esta situación crítica pone a prueba los sistemas de contención y tratamiento, con el riesgo potencial de desbordes que podrían afectar cuerpos de agua cercanos como el río Puente de la Hierba, con consecuencias ambientales y sociales significativas.

Control de Calidad y Cumplimiento Normativo

El éxito del sistema de tratamiento de efluentes en Minera Coimolache depende fundamentalmente de un riguroso sistema de control de calidad. El jefe de turno de la planta supervisa constantemente los parámetros operativos, apoyado por un laboratorio químico que realiza análisis continuos de las concentraciones de cianuro libre y otros parámetros críticos. Este monitoreo permanente permite ajustar en tiempo real los procesos de tratamiento, garantizando que los efluentes finales cumplan con los estándares establecidos en la Resolución Ministerial N° 011-96-EM/VMM.

Los límites establecidos por esta normativa permiten clasificar el agua tratada como Tipo III, adecuada para riego de vegetales y consumo animal. Este nivel de calidad se alcanza mediante un proceso de oxidación química cuidadosamente controlado, donde el cianuro libre se transforma en cianato, seguido de etapas de sedimentación y filtración que remueven los complejos metálicos residuales. El resultado es un efluente que, aunque proviene de actividades minero-metalúrgicas, puede ser descargado de manera segura en el medio ambiente sin representar riesgos para los ecosistemas acuáticos o las comunidades humanas aledañas.

Una Minería Sustentable

La experiencia de Minera Coimolache demuestra que es posible conciliar la extracción de metales preciosos con la protección ambiental mediante el uso

responsable de tecnologías avanzadas de tratamiento de efluentes. El manejo adecuado del cianuro en la minería moderna requiere no solo de procesos técnicamente sólidos, sino también de sistemas de gestión integral que incluyan monitoreo continuo, planes de contingencia para eventos climáticos extremos y un compromiso firme con el cumplimiento normativo.

Este modelo de operación, que combina eficiencia productiva con responsabilidad ambiental, sirve como referencia para la industria minera global en su camino hacia prácticas más sostenibles. El desafío actual consiste en continuar innovando en tecnologías de tratamiento, optimizar los procesos existentes y mantener el más alto estándar en la gestión de riesgos ambientales, asegurando que la extracción de recursos minerales pueda coexistir armónicamente con la protección de los ecosistemas y el bienestar de las comunidades.

Capítulo 2

Optimización del Tratamiento de Efluentes Cianurados en Minería

Estrategias para la Gestión de Desbalances Hídricos y Reducción de Costos

Por el desbalance de volúmenes de soluciones cianuradas por efecto de las lluvias, se observó la necesidad de degradar el cianuro libre contenido en soluciones a la poza de mayores eventos y así bajar el nivel de ésta, la cual podría generar derrames de soluciones cianuradas y así evitar que ocurra una contaminación hacia las aguas libres de cianuro, dentro y fuera de las instalaciones de la mina en la cual se realiza la detoxificación de cianuro en los periodos lluviosos que son por un tiempo de 6 meses ocurriendo octubre hasta marzo y se realiza de manera continua durante las 24 horas.

La minera tiene su planta de tratamiento de efluentes que funciona desde el año 2011 detoxificando el cianuro mediante el método de destrucción por oxidación con peróxido de hidrogeno y con la ayuda de un catalizador de cobre. El pH se regula por encima de 10 con lechada de cal. Se tratan 90 m³/h por cada

tren que genera un gasto económico de aproximadamente 3,40 dólares por metro cubico tratado.

La planta contiene 5 tanques, el primero con un volumen de 4,8 m³ y los 4 siguiente con 46,9 m³; siendo los 2 primeros los reactores y los restantes actúan de almacenadores residentes para degradar los valores son menores a 0,2 ppm de CN libre en un tiempo determinado, utilizando al peróxido de hidrógeno como oxidante. La capacidad máxima de tratamiento del sistema es de 200 m³/h que equivale a un costo de \$ 3,41/m³, operando continuamente con los parámetros optimizados.

Fundamentos Científicos del Proceso de Detoxificación

Según la hipótesis de la investigación, se pretende evaluar cuál es el efecto de las diferentes concentraciones de peróxido de hidrogeno en la cinética de detoxificación de soluciones de cianuro, tiempo reacción de detoxificación de soluciones de cianuro, que al final su efecto se notará en las mediciones de los niveles de cianuro libre permisibles por el MEM (Ministerio Energía y Minas), que debe ser menor a 1 ppm (<1 ppm) para no ser contaminante.

Con el estudio se busca determinar que, a más concentración de peróxido de hidrogeno, la reacción es más rápida y con ellos se contribuye a la reducción de tiempo y costos para las empresas mineras.

En la actualidad, la Compañía Minera Coimolache (CMC) utiliza peróxido de hidrógeno (H₂O₂) al 50% para la destrucción de cianuro en la Planta de Tratamiento de Efluentes de Procesos. Se mantiene una dosis de 1,2 y 1,3 kg de H₂O₂ el 50% para una planta con capacidad de 200 m³/h cada uno, además, se mantienen dosis promedio de hidrosulfuro de sodio (NaSH) DE 150 ml/min y de cloruro férrico (FeCl) de 450 ml/min utilizados para la remoción de metales pesados y la coagulación de precipitados respectivamente.

La explotación de oro realizado a través de la minería es la generadora de elevadas cantidades de desechos y residuos que son vertidos a los ecosistemas (Anning et al., 2019, pp. 117-1126).

Las primordiales fuentes de residuos de la industria del oro son los relaves mineros. La toxicidad de los efluentes depende de la composición fisicoquímica del mineral tratado, el reactivo utilizado y los métodos de procesamiento empleados, así como el tamaño de partícula utilizado. La mayoría de los efluentes están compuestos por metales pesados, metaloides, cianuro, metales radiactivos y minerales sulfurados (Roche et al., 2017; Uppal et al., 2017, pp. 76-85).

Después de generarse los relaves mineros, se presume que los elementos

químicos en solución disminuyan de manera natural, pero con la presencia del cianuro se forman complejos con los metales como cianuros de cobalto ($[\text{Co}(\text{CN})_6]^{4-}$), cianuros de oro ($[\text{Au}(\text{CN})_2^-]$) y los cianuros de $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$, $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}$ entre otros, que son perjudiciales para los cuerpos de agua, lo cual puede afectar a estas fuentes de agua debido a su tiempo de permanencia (Aranguri LLerena y Reyes López, 2019, pp. 1-9). Muy frecuentemente encontramos los complejos de cianuro en las colas de las plantas de lixiviados de oro como son Ni, Zn, Fe, Co, Cu y Cd, y el cianuro se encuentra en forma de iones como CN^- y HCN a consecuencia de tener un alto poder de hidrólisis. Estos lixiviados son muy tóxicos para los seres vivos (Dong et al., 2021; Krylova et al., 2021, pp. 1331-1339).

Datos bibliográficos reportan varios casos de mortandad de animales y seres humanos a consecuencia del consumo de agua con contenido de cianuro entre ellos tenemos el envenenamiento de elefantes en África (Muboko et al., 2014, pp. 92-93), avensamiento de un poblador en Francia (Labat et al., 2004, pp. 215-217) y los envenenamientos en Irán (52 casos) (Akhgari et al., 2015, pp.2-10).

Aguas abajo después del lixiviado, el peróxido de hidrogeno es utilizado para detoxificar el cianuro en aguas residuales o efluentes con contenido de cianuro y es este compuesto el que más utilizan la industria minera para detoxificar los relaves mineros y/o efluentes con contenido de cianuro. También se utiliza el peróxido de hidrogeno en el tratamiento de aguas residuales de plantas de coque, efluentes de las actividades metalúrgicas, y en los talleres de laminados, etc. (Evonik leading beyond chemistry, 2020; Baharun et al., 2020, pp. 1365-1378).

El empleo del peróxido de hidrogeno para tratar las aguas de efluentes tiene como principal ventaja de que no libera sustancias toxicas que generen la contaminación de los efluentes y por eso es conocido como un producto químico limpio (Griffiths et al., 1987; Kitis et al., 2005, pp. 2237-2341).

El proceso para tratar efluentes con peróxido de hidrogeno fue insertado por la empresa Degussa Corporation. Ciertas patentes de los procesamientos de detoxificación de cianuro con peróxido de hidrógeno son de autoría de Degussa Group: "Process for the treatment of effluents containing cyanide and/or other oxidizable substances" (Griffiths et al., 1992) y "Process for the removal of cyanide from wastewaters" (Ahsan et al., 1990).

En nuestro país, las empresas mineras realizan su tratamiento de aguas cianuradas utilizando agua oxigenada que es el nombre comercial del peróxido de hidrogeno con la ayuda de un catalizador de sulfato de cobre pentahidratado, en la cual se da una reacción de oxidación del cianuro para transformarla en cianato (OCN), luego de ello se realiza un proceso de floculación con la finalidad de sedimentar los complejos insolubles. En la minera Coimolache se detoxifica del cianuro libre utilizando peróxido de hidrogeno a una concentración de 50% y con ayuda de un catalizador de cobre que se obtiene de las mismas soluciones. Este

método de detoxificación permite la oxidación del cianuro y que éste se reduzca a concentraciones por debajo de los LMP exigidos por las normas ambientales vigentes del país.

En el diagrama de la Figura 1, se muestra la recirculación de la solución de cianuro de manera continua hacia el PAD de lixiviación en donde el caudal varío de 850 a 910 m³ /h, pudiendo tener un menor caudal de acuerdo a la cantidad de oro requerido. A medida que ocurre el proceso la fuerza del cianuro se incrementa en el área de Merrill Crowe de tal forma que nos asegure la precipitación del oro, en la cual la concentración de cianuro se eleva de 100 a 120 mg/L. Con el ultimo valor se garantiza una mayor cantidad de extracción de plata y con la concentración de 100 mg/L se garantiza la precipitación del oro.

El desbalance hídrico que se provoca por la caída de lluvias de la zona ocasiona que se realicen tratamientos para los excesos de soluciones con altas cantidades de cianuro con el objetivo de reducir y vigilar los niveles permitidos en los eventos mayores que puedan generar la contaminación de las aguas libres que están de manera interna y externa de la mina. Por ello es que se utiliza el método de detoxificación de cianuro utilizando la solución barren o pobre para enviarlo al PAD durante un periodo de tiempo máximo a tres meses, que dependerá de las lluvias que sucedan en la zona y con ello provocar la destrucción dl cianuro diariamente.

La minera tiene su planta de tratamiento de efluentes que funciona desde el año 2011 detoxificando el cianuro mediante el método de destrucción por oxidación con peróxido de hidrogeno y con la ayuda de un catalizador de cobre. El pH se regula por encima de 10 con lechada de cal. Se tratan 90 m³/h por cada tren que genera un gasto económico de aproximadamente 3,40 dólares por metro cubico tratado.

Actualmente la minera tiene 5 tanques en la cual los 2 primeros funcionan como reactores y los otros tres tienen la función de elevar el tiempo de residencia con el objeto de mantener las concentraciones de cianuro menores a 0,2 ppm. En una operación continua, se trabaja con un caudal máximo de 200 m³/h de agente oxidante utilizando los parámetros optimizados.

La finalidad de esta investigación es realizar una comparación de dos tratamientos para detoxificar los relaves mineros con contenido de cianuro utilizando peroxido de hidrogeno que nos permita reducir las concentraciones de cianuro y llevarlos a valores que cumplan con los Límites Máximos Permisibles exigidos por Ministerio de Energía y Minas (MEM) cuyo valor máximo de cianuro es de 1,00 mg/L.

Con este estudio se busca demostrar que utilizando otras concentraciones de peróxido de hidrogeno es posible aumentar la velocidad de reacción y ello contribuirá a un ahorro de tiempo y costos para las actividades mineras.

Metodología de Investigación y Protocolos Experimentales

Esta investigación adopta un diseño prospectivo, longitudinal, comparativo y experimental para evaluar sistemáticamente el impacto de diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno (50% vs 70%) en la cinética de detoxificación. El protocolo experimental incluye:

- **Monitoreo continuo de parámetros operativos:** Caudales, pH, concentraciones de cianuro libre, dosificación de reactivos.
- **Análisis comparativo de cinéticas de reacción:** Tiempos de residencia, eficiencias de remoción, consumo de reactivos.
- **Evaluación económica:** Costos por metro cúbico tratado, ahorros potenciales por optimización.
- **Verificación de cumplimiento normativo:** Garantizar que los efluentes tratados cumplan con el LMP de 1.00 ppm establecido en la Resolución Ministerial N°11-96-EM/VMM.

El sistema de recirculación de soluciones en el PAD de lixiviación opera con caudales variables (850-910 m³/h), ajustándose dinámicamente a los requerimientos metalúrgicos. La concentración de cianuro se modula entre 100-120 mg/L para optimizar la precipitación de oro y plata en el circuito Merrill-Crowe, creando condiciones ideales para la recuperación metálica pero generando simultáneamente el desafío de manejar excedentes cargados con cianuro.

Resultados Esperados y Beneficios Potenciales

La implementación de concentraciones más elevadas de peróxido de hidrógeno (70%) promete múltiples ventajas operativas:

- **Reducción de tiempos de tratamiento:** Mayor velocidad de reacción permitiría procesar volúmenes mayores en periodos más cortos.
- **Optimización de costos:** Menor consumo de reactivos por unidad de volumen tratado.
- **Mayor capacidad de respuesta:** Crucial durante emergencias por lluvias intensas.
- **Cumplimiento ambiental reforzado:** Mayor margen de seguridad respecto a los LMP.

Estas mejoras serían particularmente valiosas durante los periodos críticos de desbalance hídrico, cuando la planta debe operar a máxima capacidad para

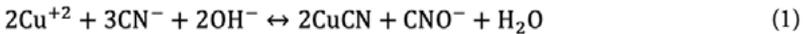
evitar derrames. El uso estratégico de solución barren (pobre en metales) como medio de transporte para el cianuro hacia el PAD durante periodos extendidos (hasta tres meses) complementaría este esquema optimizado de gestión.

Las etapas seguidas para tratar las soluciones cianuradas fueron las siguientes:

Etapa 1. Catalización

Para catalizar la reacción de peróxido de hidrogeno es posible utilizar iones de cobre o activador de CN. Mayormente las empresas mineras utilizan como catalizadores, compuestos hidratados de cobre para el tratamiento de sus efluentes (Sanyaolu et al., 2021, pp. 436-443).

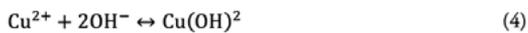
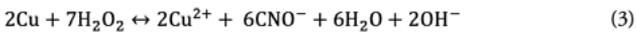
En este trabajo de investigación, se omitió adicionar la solución al % de cobre ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), al primer tanque debido a la presencia del complejo CuCN en las soluciones cianuradas que ingresan a las pozas provenientes del PAD de lixiviación es el que proporciona, el catalizador de cobre (II). Debemos tener en cuenta que el cobre tiene dos estados de valencia, como ion cuproso y como ion cúprico, en la cual el ion cúprico es muy inestable cuando reacciona con cianuro y parte de este ion se reducirá y precipitará como el ion cuproso. Además, al ser una reacción catalítica, el cobre acelera la degradación del CN^- por peróxido de hidrógeno (Fernandez & Moreno, 2023).



Además, habiendo exceso de concentración de cianuro disuelto, el ion cuproso se estabiliza como complejo triciano cuprito y entonces no precipitará.



Con la adición del catalizador cobre se logra la oxidación del cianuro por la presencia del peróxido de hidrogeno y de los complejos del metal cianuro $\text{Cu}(\text{CN})_3^{-2}$. El mecanismo de reacción se da de la siguiente manera:



Etapa 2. Oxidación

La oxidación del cianuro utilizando el peróxido de hidrógeno es de un solo paso, pues no tiene la formación de intermedios tóxicos. La reacción se da por la oxidación de los cianuros libres y la disociación en ácidos débiles al utilizar el agente oxidante (H_2O_2) conjuntamente con el sulfato de cobre pentahidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) que actúa como catalizador. La reacción catalítica es homogénea pero igualmente se debe aplicar agitación para la mezcla de reactivos para evitar precipitado en los tanques (Barrientos, 2018).

Se adiciona el peróxido de hidrogeno al 50% en una relación de 2,25 Kg de peróxido por cada Kg de CN. El pH debe ser regulado a un valor de 11,0 a 11, 2 utilizando hidróxido de sodio o soluciones básicas de cal.



Etapa 3: Hidrólisis

La hidrolisis del cianato se da con la finalidad de obtener iones amonio y carbonatos. Las ecuaciones (7) y (8) describen la reacción de hidrólisis



Se debe tener en cuenta que las probabilidades de reacción dependen del valor de pH de la solución.

También hay que tener en cuenta que la formación de amoniaco a concentraciones superiores a 1,00 ppm se considera toxico para la vida acuática, pero su presencia se da generalmente en forma de amonio (NH_4^+), que tiene menos toxicidad al pH de los cuerpos de agua (Griffiths et al., 1987).

Cuando se agrega exceso de agente oxidante en las soluciones, esta se descompone muy eficazmente en forma de oxígeno y agua, con lo cual es muy favorable al medio ambiental.



Metodología

La investigación se ajusta a un tipo de estudio prospectivo, longitudinal, comparativo y cuasi experimental.

Material de Estudio

Objeto de estudio

Las concentraciones de cianuro libre, con diferentes concentraciones de peróxido en la planta de tratamientos de efluentes de Minera Coimolache, Hualgayoc (Cajamarca, 2018).

- Variable independiente: Concentraciones de peróxido
- Variable dependiente: Concentraciones de cianuro libre

Problema

¿Tienen las diferentes concentraciones de peróxido igual efecto cinético sobre las concentraciones de cianuro libre en las soluciones cianuradas de una minera Coimolache?

Hipótesis de la investigación

Las diferentes concentraciones de peróxido no tienen igual efecto cinético sobre las concentraciones de cianuro libre en las soluciones cianuradas de minera Coimolache

Objetivo General

Comparar el efecto cinético de diferentes concentraciones del peróxido sobre las concentraciones de cianuro libre en las soluciones cianuradas.

Objetivos Específicos

- Determinar el efecto cinético del peróxido a una concentración del 50% sobre las concentraciones de cianuro libre en las soluciones cianuradas.
- Determinar el efecto cinético del peróxido a una concentración del 70% sobre las concentraciones de cianuro libre en las soluciones cianuradas.
- Definir ecuaciones cinéticas para cada tratamiento.

Población

Estuvo conformada por el total de tanques con muestras de soluciones cianuradas sometidas a diferentes concentraciones de peróxido

Muestra

Conociendo la viabilidad y variabilidad de los datos se considera un tamaño de muestra con cinco repeticiones por cada tratamiento.

Métodos y Técnicas

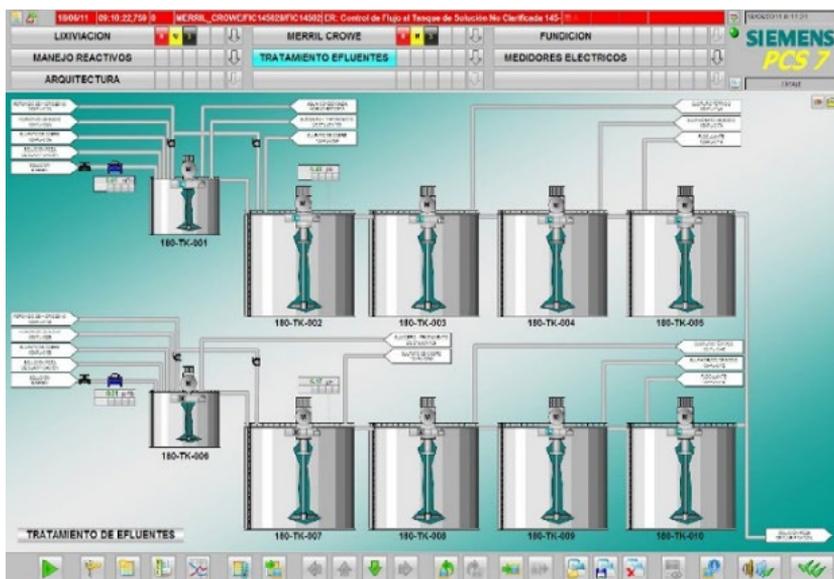
El estudio estuvo conformado por un total de 5 muestras de soluciones cianuradas sometidas a detoxificación contenidas en tanques.

La planta está conformada por dos tanques de reacción y tres tanques de residencia haciendo un total de 5 tanques en serie (Figura 1).

En la presente investigación se buscó evaluar la concentración de peróxido al 50% y 70% y sus efectos sobre las concentraciones cianuro libre.

Esta situación es compatible con la vida y afrontar el desbalance de soluciones en épocas de lluvia; la gestión de las aguas de desecho de las industrias mineras debe considerar en su proceso la descomposición del ion cianuro libre por su gran toxicidad para los seres vivos.

Figura 1. Foto del proceso de la planta de tratamientos de efluentes Coimolache-Cajamarca.

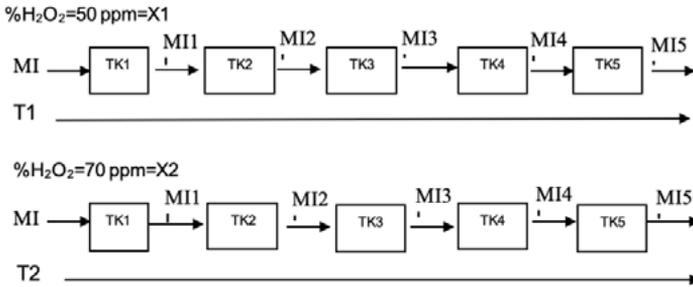


Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Diagrama elaborado en el programa SIEMENS PCS 7

El primer tanque tiene un volumen operativo de 4,8 m³ y los siguientes cuatro tanques son de 46,9 m³. El agente oxidante del proceso trabaja con un caudal máximo de 100 m³/h por tren de manera continua lo que representa un costo de aproximadamente \$ 1,71 por m³ y con la optimización del total de los parámetros.

Figura 2. Diagrama de bloques del proceso de detoxificación de cianuro



Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Diagrama elaborado en el programa SIEMENS PCS 7

Donde:

X1 y X2 = Concentración de peróxido

MI – MI5 = Concentración de cianuro libre en cada tanque

T1 y T2 = Tiempo de detoxificación

Los tiempos de reacción y residencia, la concentración de cianuro en la entrada y salida de cada tanque para los tratamientos a 50% y 70% de H₂O₂, son mostrados en la Tabla A-1 y Tabla A-2, respectivamente. Las mismas que se encuentran en los anexos.

Este estudio estuvo conformado por el total de 05 muestras de soluciones cianuradas sometidas a detoxificación, en cada salida de los tanques.

Operacional: Es el tiempo en minutos para obtener un nivel de cianuro libre <1.

Por volumetría:

1. Preparación de solución valorada de nitrato de plata 0,01N

Disolver en agua 1,7 gr de AgNO₃ previamente secado durante máximo una hora a 110 °C y diluir exactamente a 1 litro. Almacenar la solución en un frasco ámbar para protegerlo de la luz solar.

2. Estandarización del Método de titulación con solución de AgNO_3 :

Tomar alícuotas de 25 ml de solución de cloruro de sodio 0,01N en tres vasos de 250 ml, diluir aproximadamente a 50 ml enjuagando las paredes del vaso, agregar un ml de K_2CrO_4 al 5% y titular con solución de AgNO_3 0,01N hasta que aparezca el primer color rojo (pardo rojizo).

Durante la titulación el contenido del vaso se agita enérgicamente a fin de que se establezca el equilibrio de adsorción.

Preparación de rodamina:

Disolver 0,2 gr de 5-(4-dimethylaminobenzylidene) rhodanine en 100 ml de acetona.

Cálculo de Cianuro Libre

$$\text{mg CN}^- \text{ libre} = \frac{(V_1 - V_2)N \times 0,052 \times 106}{A} \quad (10)$$

Donde:

V_1 = Volumen de AgNO_3 0,01 N, ml

V_2 = Volumen de AgNO_3 0,01N, ml gastado en el blanco, ml.

N = Normalidad de la solución valorada de AgNO_3

A = Alícuota de muestra, ml.

Para encontrar la ecuación que desarrolla la cinética del proceso, se recurre a la estequiometría de la reacción:



$$-d[\text{CN}^-]/dt = k[\text{CN}^-] \quad \dots\dots\dots (12)$$

Considerando la ecuación cinética de Mamani, análogamente se evalúa mediante el método integral la concentración y el tiempo, para la degradación de cianuro en la planta de tratamiento en minera Coimolache, Hualgayoc Cajamarca.

Capítulo 3

Optimización del Tratamiento de Cianuro en Efluentes Mineros

Evaluación Comparativa de Diferentes Concentraciones de Peróxido de Hidrógeno

El presente estudio se desarrolló con el objetivo principal de evaluar la eficacia comparativa de dos concentraciones diferentes de peróxido de hidrógeno (50% y 70%) en la reducción de cianuro libre presente en aguas residuales mineras. La investigación se enfocó no solo en determinar la capacidad de cada concentración para disminuir los niveles de cianuro por debajo de los límites máximos permisibles establecidos por el Ministerio de Energía y Minas, sino también en analizar la relación entre la concentración del agente oxidante y el tiempo requerido para completar el proceso de detoxificación. Para garantizar la validez científica de los hallazgos, se implementó un riguroso análisis estadístico que permitió corroborar los resultados obtenidos en cada uno de los tratamientos evaluados.

Fundamentos Cinéticos del Proceso de Oxidación

El mecanismo de degradación del cianuro libre a cianato mediante oxidación química con peróxido de hidrógeno ha sido objeto de diversos estudios previos. En su investigación, Mamani Endara Oscar estableció que este proceso sigue una cinética de segundo orden cuando se utiliza sulfato de cobre como catalizador. Sin embargo, los resultados obtenidos en las operaciones reales de la planta de tratamiento de efluentes de Minera Coimolache revelaron un comportamiento diferente, demostrando que el modelo de orden cero presenta un mejor ajuste

a los datos experimentales, como lo evidencia el coeficiente de determinación (R^2) obtenido. Este hallazgo tiene implicaciones significativas para el diseño y optimización de los sistemas de tratamiento a escala industrial.

Eficiencia en la Reducción de Concentraciones de Cianuro

Los resultados obtenidos en este estudio confirman la notable eficiencia del peróxido de hidrógeno como agente detoxificante, logrando reducir consistentemente las concentraciones de cianuro libre a valores inferiores a 0.5 ppm, muy por debajo del límite máximo permisible establecido por las regulaciones ambientales. Estos hallazgos concuerdan con antecedentes documentados en la literatura técnica, donde se reporta la capacidad del peróxido de hidrógeno para disminuir concentraciones iniciales de cianuro que oscilan entre 10 y 80 ppm hasta valores menores a 0.8 ppm. Un aspecto clave del proceso es el mantenimiento de un pH alcalino en el rango de 9 a 11, condición que favorece la eficiencia de la reacción de oxidación y contribuye a la estabilidad del sistema.

Evaluación Comparativa de los Esquemas de Dosificación

El estudio comparó dos esquemas operativos diferenciados por la concentración de peróxido de hidrógeno empleada. En el primer tren de tratamiento, se utilizó una dosis promedio de 600 ml/min de H_2O_2 al 70%, equivalente a un flujo másico de 0.77 kg/min, lo que resultó en una relación de 0.58 kg de H_2O_2 por metro cúbico de solución tratada. Por su parte, el segundo tren operó con una dosis de 1000 ml/min de H_2O_2 al 50%, correspondiente a 1.21 kg/min, alcanzando una relación de 0.91 kg de H_2O_2 por metro cúbico tratado. Esta comparación permitió evaluar no solo la eficiencia de remoción sino también el consumo específico de reactivos en cada configuración.

Dinámica del Proceso en los Tanques de Tratamiento

El sistema de tratamiento demostró un tiempo total de reacción y residencia de 2 horas y 20 minutos (141.31 minutos), característica que lo hace particularmente adecuado para manejar flujos másicos elevados de efluentes cianurados. El análisis de la distribución de la degradación a lo largo de los diferentes tanques reveló patrones interesantes: mientras que en los tanques de reacción (TK-1 y TK-2) se produce la interacción inicial entre el peróxido de hidrógeno (solvente) y el cianuro libre (soluto), son los tanques de residencia (TK-3, TK-4 y TK-5) donde

ocurre la mayor parte de la eliminación efectiva del cianuro. Esta configuración permitió a la planta de tratamiento de Coimolache-Cajamarca procesar un volumen total de 1680 m³ de efluentes en un período aproximado de 21 horas de operación continua.

Análisis de Resultados y Validación Estadística

Los datos recopilados en las Tablas A-1 y A-2 proporcionan evidencia detallada de la evolución de las concentraciones de cianuro libre a medida que las soluciones avanzan a través de los diferentes tanques del sistema. Las muestras, tomadas sistemáticamente a la salida de cada unidad, permitieron construir un perfil completo de la eficiencia de remoción en cada etapa del proceso. La Tabla 1 resume comparativamente los resultados obtenidos con ambos esquemas de tratamiento (50% y 70% de H₂O₂), ofreciendo una visión integral del desempeño de cada configuración. El análisis estadístico aplicado a estos datos no solo confirmó la reproducibilidad de los resultados, sino que también permitió establecer correlaciones significativas entre las variables operativas y la eficiencia de detoxificación.

Implicaciones Operativas y Recomendaciones

Los hallazgos de esta investigación tienen importantes implicaciones para la optimización de plantas de tratamiento de efluentes cianurados en la industria minera. La demostración de que concentraciones más elevadas de peróxido de hidrógeno pueden mejorar la eficiencia del proceso sin comprometer el cumplimiento normativo abre posibilidades interesantes para el rediseño de protocolos operativos. Se recomienda realizar estudios adicionales para evaluar el impacto económico de implementar estas modificaciones, considerando tanto el costo de los reactivos como los posibles ahorros derivados de la reducción en los tiempos de tratamiento. Asimismo, sería valioso investigar el efecto sinérgico de ajustar otras variables operativas, como el pH o la concentración del catalizador, en conjunto con las diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno.

La Tabla 1, resume los resultados obtenidos de ambos procesos de degradación con 50% y 70% H₂O₂, respectivamente.

Tabla 1. Efecto de concentraciones de H₂O₂ en detoxificación

Concentración de Peróxido (%)	pH	Tiempo de detoxificación (min.)	Concentración final de cianuro libre (ppm)
50	10,425	141,31	0,4685
70	10,425	141,30	0,0390

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Con los datos obtenidos en las **Tabla 1**, se puede apreciar que el pH tiene el mismo valor medio en las dos concentraciones de peróxido y que permite asumir que dicho factor configura a una constante en el presente trabajo de investigación; en cuanto al tiempo de detoxificación reportan valores muy similares y que permite asumir también una incidencia casi nula en los resultados.

Tabla 2. Prueba de normalidad de la concentración de cianuro libre sometida a concentración de H₂O₂ al 50%.

TRATAMIENTO POR TK	Estadístico	Valor-p
TK1	0.89804	0.281624
Tk2	0.932389	0.542653
TK3	0.863078	0.131462
TK4	0.816468	0.0443127
TK5	0.949889	0.712345

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La **Tabla 2**, muestra la prueba de W de Shapiro-Wilk S de los datos de concentración de cianuro libre en los 5 TKs que fueron objeto a un análisis de normalidad en la cual los **Valor-p** superan a 0,05 lo que nos indica que los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal, quedando entonces aptos para una aplicación adecuada del análisis de varianza (ANOVA).

Tabla 3. Resumen Estadístico para concentración de cianuro utilizando H₂O₂ al 50%

TK	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
TK1	8	26.4	1.59015	23.2	28.4	5.2
TK2	8	20.25	1.68438	17.3	23.2	5.9
TK3	8	12.7762	1.388	11.34	15.76	4.42
TK4	8	6.12	0.582997	5.6	7.14	1.54
TK5	8	0.4475	0.104163	0.3	0.6	0.3
Total	40	13.1987	9.53872	0.3	28.4	28.1

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La Tabla 3 muestra los resultados estadísticos para los datos de la concentración final de cianuro libre encontrados en cada uno de los 5 niveles de TKs. Nos presenta las inferencias estadísticas de los resultados de concentración de cianuro libre con una estimación puntual e interválica con un nivel de confianza de 95%. Asimismo, los valores de la desviación estándar revelan que, el tratamiento a 50% de H₂O₂ en el TK5 muestra menor dispersión de los datos.

Tabla 4. Análisis ANOVA para cianuro con H₂O₂ 50%

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos	3495.0	4	873.749	571.60	0.0000
Intra grupos	53.5009	35	1.5286		
Total (Corr.)	3548.5	39			

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

Existe una diferencia significativa en la reducción de concentración de cianuro libre de los 5 niveles de los TKs cuando utilizamos peróxido de hidrogeno al 50%. Esto se puede inferir debido a que los resultados de la Tabla 4, muestran un

valor-p inferior a 0,05. Por lo tanto, la hipótesis nula estadística (H_0) de igualdad de niveles promedios de concentración de cianuro se rechaza, y se acepta la hipótesis alternativa de no igualdad de niveles promedios de concentración de cianuro planteada; se puede observar que se reducirá los niveles de cianuro libre al pasar por los 5 niveles de los TKs

Tabla 5. Prueba Tukey para cianuro por TK

TK	Casos	Media	Grupos Homogéneos
TK5	8	0.4475	X
TK4	8	6.12	X
TK3	8	12.7762	X
TK2	8	20.25	X
TK1	8	26.4	X

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

En la Tabla 5 se muestra que las medias son estadísticamente diferentes entre los niveles de los TKs y que en el Tk5 se encontró la menor concentración final de cianuro libre cuando se detoxifica con peróxido de hidrogeno al 50% con un nivel de confianza de 95%.

Tabla 6. Normalidad de cianuro con H_2O_2 70%

TRATAMIENTO POR TK	Estadístico	Valor-P
TK1	0.737347	0.0651598
Tk2	0.822794	0.0515101
TK3	0.762229	0.119565
TK4	0.9157	0.400823
TK5	0.899306	0.289093

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La Tabla 6, muestra la prueba de W de Shapiro-Wilk S de los datos de la concentración de cianuro libre tratados con H_2O_2 al 70% en los 5 TKs que fueron objeto a un análisis de normalidad en la cual los **Valor-p** superan a 0.05 lo que nos

indica que los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal, quedando entonces aptos para una aplicación adecuada del análisis de varianza. (ANOVA).

Tabla 7. Estadísticos de cianuro con H_2O_2 70%

TK	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	Rango
TK1	8	25.2375	1.96973	21.2	26.8	5.6
TK2	8	16.6525	1.91483	12.8	18.1	5.3
TK3	8	7.9925	1.91483	4.14	9.44	5.3
TK4	8	0.52	0.25253	0.2	0.86	0.66
TK5	8	0.045	0.0177281	0.02	0.08	0.06
Total	40	10.0895	9.9152	0.02	26.8	26.78

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La Tabla 7 muestra los diferentes resultados estadísticos para los datos de la concentración final de cianuro libre encontrados en cada uno de los 5 niveles de TKs después del tratamiento con H_2O_2 al 70%. Nos muestra la inferencia estadística de los resultados de concentración de cianuro libre con una estimación puntual e interválica con un nivel de confianza de 95%. Se consideró al Tk 5 con menor dispersión y varianza respecto al resto.

Tabla 8. nálisis ANOVA: cianuro y H_2O_2 70%

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-p
Entre grupos	3755.2	4	938.799	416.24	0.0000
Intra grupos	78.9397	35	2.25542		
Total (Corr.)	3834.14	39			

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

Existe una diferencia significativa en la reducción de concentración de cianuro libre de los 5 niveles de los TKs cuando utilizamos peróxido de hidrogeno al 70%. Esto se puede inferir debido a que los resultados de la Tabla 8, muestran un **Valor-p** inferior a 0,05. Por lo tanto, la hipótesis nula estadística (H_0) de igualdad de niveles promedios de concentración de cianuro se rechaza, y se acepta la hipótesis alternativa de no igualdad de niveles promedios de concentración de cianuro planteada; se puede observar que se reducirá los niveles de cianuro libre al pasar por los 5 niveles de los TKs

Tabla 9. Prueba de múltiples rangos para concentración de cianuro por TK Porcentaje Tukey HSD.

TK	Casos	Media	Grupos Homogéneos
TK5	8	0.045	X
TK4	8	0.52	X
TK3	8	7.9925	X
TK2	8	16.6525	X
TK1	8	25.2375	X

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

En la Tabla 9 se muestran que las medias son estadísticamente diferentes entre los niveles de los TKs y que en el TK4 y Tk5 se encontró la menor concentración final de cianuro libre cuando se detoxifica con peróxido de hidrogeno al 70% con un nivel de confianza de 95%.

Tabla 10. Prueba de normalidad de los datos de concentración de cianuro libre entre los últimos TKs sometida a concentración de H_2O_2 al 50% y 70%

Prueba	Estadístico	Valor-p
Estadístico W de Shapiro-Wilk	0.949889	0.712345

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La Tabla 10, muestra la prueba de W de Shapiro-Wilk S de los datos de la concentración de cianuro libre tratados con H_2O_2 al 50% y 70% en el TK5 que fueron objeto a un análisis de normalidad en la cual los **Valor-p** superan a 0,05 lo que nos indica que los datos obtenidos se ajustan a una distribución normal, quedando entonces aptos para una aplicación adecuada del análisis de varianza. (ANOVA).

Tabla 11. Resumen Estadístico para concentración de cianuro utilizando H_2O_2 al 50% y 70%

CONC. H_2O_2	Recuento	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
50%	8	0.4475	0.104163	0.3	0.6
70%	8	0.045	0.0177281	0.02	0.08
Total	16	0.24625	0.220027	0.02	0.6

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

La Tabla 11 muestra los resultados estadísticos para los datos de la concentración final de cianuro libre encontrados en el TK5 después del tratamiento con H_2O_2 al 50% y 70%. En ella se presenta la inferencia estadística de los resultados de concentración de cianuro libre, con una estimación puntual e interválica con un nivel de confianza de 95%. Asimismo, el tratamiento con 70% muestra menor desviación estándar que el correspondiente al 50%.

Tabla 12. Anova de datos de Concentración de Cianuro final cuando se utiliza H_2O_2 al 50% y 70%.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Entre grupos	0.648025	1	0.648025	116.09	0.0000
Intra grupos	0.07815	14	0.00558214		
Total (Corr.)	0.726175	15			

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

Existe una diferencia significativa en la reducción de concentración de cianuro libre entre los tratamientos con H_2O_2 al 50% y 70%. Esto se puede deducir debido a que los resultados de la Tabla 12, muestran un **Valor-p** inferior a 0,05. Por lo tanto, la hipótesis nula estadística (H_0) de igualdad de niveles promedios de concentración de cianuro se rechaza, y se acepta la hipótesis alternativa de no igualdad por lo que se afirma que existen efectos estadísticamente significativos entre los tratamientos con H_2O_2 al 50% y 70%.

Tabla 13. Prueba de múltiples rangos para concentración de cianuro tratados con H_2O_2 al 50% y 70%. Porcentaje Tukey HSD.

CONC. H_2O_2	Casos	Media	Grupos Homogéneos
70%	8	0.045	X
50%	8	0.4475	X

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. Datos obtenidos utilizando el software STATGRAPHICS Centurion XVI.I

En la Tabla 13 muestran que las medias son estadísticamente diferentes entre los tratamientos con H_2O_2 al 50% y 70%. Se encontró que la menor concentración final de cianuro libre se obtiene cuando se detoxifica con peróxido de hidrogeno al 70% con un nivel de confianza de 95%.

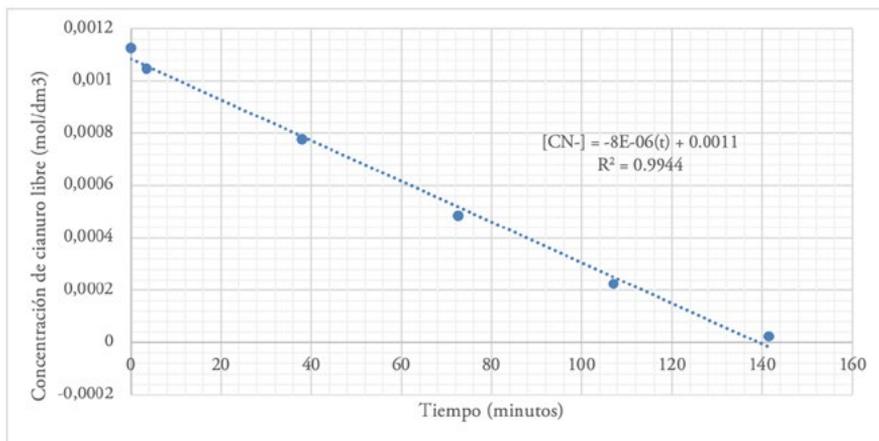
Tabla 14. Cuadro de datos de la reacción orden cero $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm ³)
0	29,3	0,001126923
3,56	27,2	0,00104615
37,99	20,2	0,00077692
72,64	12,58	0,00048385
107,10	5,84	0,00022462
141,55	0,58	2,2308E-05

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. 1 mol de CN^- = 26 g aproximadamente; 1 litro = 1 dm³; 1 000 mg = 1 g.

Figura 3. Evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Tabla 14 y Figura 3 muestran la evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 50%. Se ajusta la regresión de la cinética de orden 0, por la cercanía de la regresión lineal a 1 ($R^2 = 0,9944$).

Según la ecuación de la gráfica de orden cero:

$$[CN] = -8E-06(t) + 0,0011$$

El valor de $k = -8E-06 \text{ mol/dm}^3 \cdot \text{min}$ y un $CN_0 = 0,0011 \text{ mol/dm}^3$

Utilizando la ecuación cinética encontrada utilizando peróxido de hidrogeno al 50% determinamos que el tiempo de detoxificación del cianuro libre ($[CN]=0$) en planta sería de 137,50 minutos.

Tabla 15. Cuadro de datos de la reacción orden uno $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%

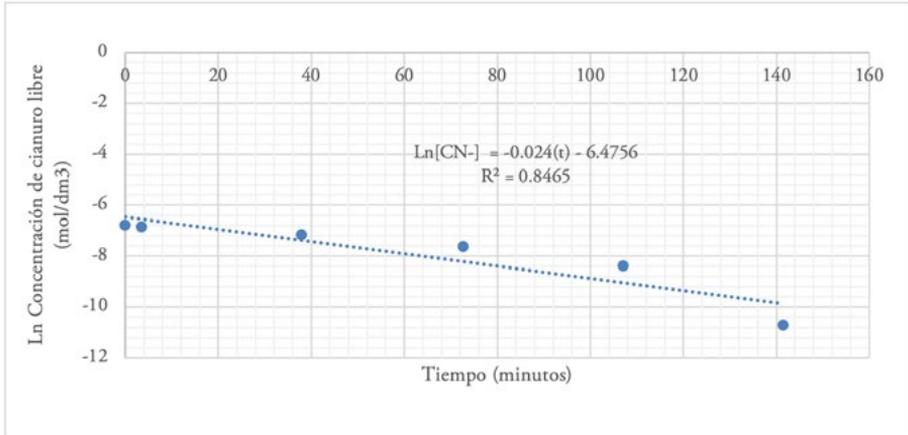
Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm³)	Ln (CN)
0	29,3	0,001126923	-6,7882643
3,56	27,2	0,00104615	-6,86263484
37,99	20,2	0,00077692	-7,16016921
72,64	12,58	0,00048385	-7,63374357
107,10	5,84	0,00022462	-8,40112102

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm ³)	Ln (CN)
141,55	0,58	2,2308E-05	-10,710579

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. 1 mol de CN⁻ = 26 g aproximadamente; 1 litro = 1 dm³; 1 000 mg = 1 g.

Figura 4. Evaluación de reacción de orden $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 50%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Tabla 15 y la Figura 4 muestra la evaluación de reacción de orden uno ($\alpha=1$) proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 50% con un $R^2 = 0,8564$. Por lo tanto, no se acepta ya que es menor al coeficiente de determinación del orden cero ($\alpha=0$).

Según la ecuación de la gráfica de orden uno:

$$\text{Ln} [\text{CN}^-] = -0,024(t) - 6,4756$$

El valor de $k = -0,024 \text{ mol/dm}^3 \cdot \text{min}$ y un $\text{Ln} (\text{CN}^-)_0 = -6,4756 \text{ mol/dm}^3$

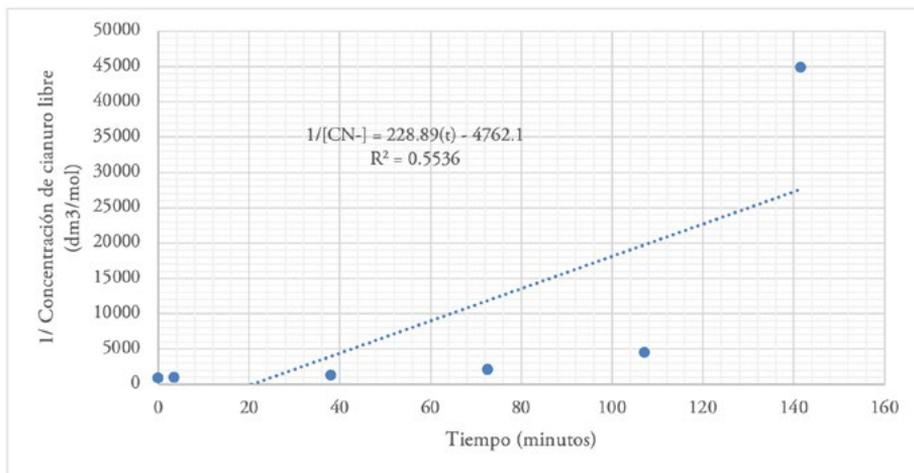
Tabla 16. Cuadro de datos de la reacción orden dos $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 50%.

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm ³)	1/CN
0	29,3	0,001126923	887,372014
3,56	27,2	0,00104615	955,882353
37,99	20,2	0,00077692	1287,12871
72,64	12,58	0,00048385	2066,77266
107,10	5,84	0,00022462	4452,05479
141,55	0,58	2,2308E-05	44827,5862

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. 1 mol de CN⁻ = 26 g aproximadamente; 1 litro = 1 dm³; 1 000 mg = 1 g.

Figura 5. Evaluación de reacción de orden $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 50%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Tabla 16 y Figura 5 muestran la evaluación de reacción de orden dos ($\alpha=2$) proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 50% con un $R^2 = 0,5536$. Por lo tanto, no se acepta ya que es menor al coeficiente de determinación del orden cero ($\alpha=0$).

Según la ecuación de la gráfica de orden dos:

$$1/[CN^-] = 228,89x - 4762,1$$

El valor de $k = -228,89 \text{ dm}^3/\text{mol} \cdot \text{min}$ y un $1/(CN^-_0) = -4762,1 \text{ dm}^3/\text{mol}$

Con la evaluación para las tres órdenes de reacción de cero, uno y dos; se establece a partir de los datos experimentales en la planta de la Compañía Minera Coimolache (CMC) que la mejor orden de reacción es la de orden cero ($\alpha=0$) con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9944.

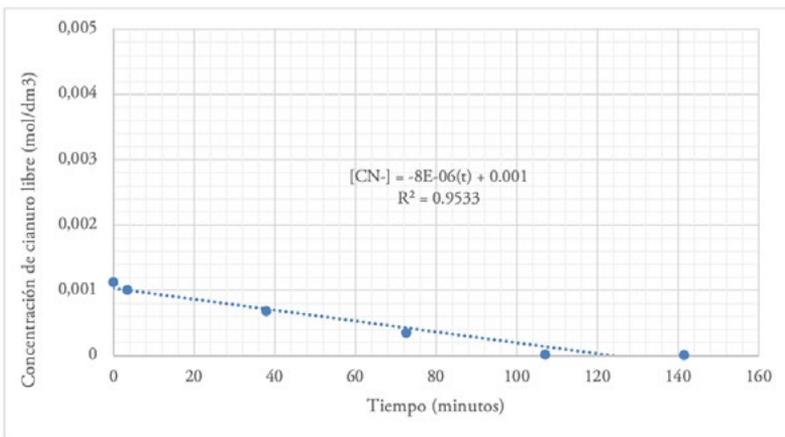
Tabla 17. Cuadro de datos de la reacción orden cero $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 70%

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm3)
0	29,30	0,00112692
3,56	26,20	0,00100769
37,99	17,60	0,00067692
72,64	8,94	0,00034385
107,10	0,40	1,5385E-05
141,55	0,06	2,3077E-06

Fuente: Flores Franco (2024).

Nota. 1 mol de CN^- = 26 g aproximadamente; 1 litro = 1 dm3; 1 000 mg = 1 g.

Figura 6. Evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Figura 6 muestra la evaluación de reacción de orden $\alpha=0$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 70%. Se ajusta la regresión de la cinética de orden 0, por la cercanía de la regresión lineal a 1 ($R^2 = 0,9533$)

Según la ecuación de la gráfica de orden cero:

$$[\text{CN}^-] = -8\text{E-}06(t) + 0,001$$

El valor de $k = -8\text{E-}06 \text{ mol/dm}^3 \cdot \text{min}$ y un $\text{CN}^-_0 = 0,001 \text{ mol/dm}^3$

Utilizando la ecuación cinética encontrada utilizando peróxido de hidrogeno al 70% determinamos que el tiempo de detoxificación del cianuro libre ($[\text{CN}^-]=0$) en planta seria de 125 minutos.

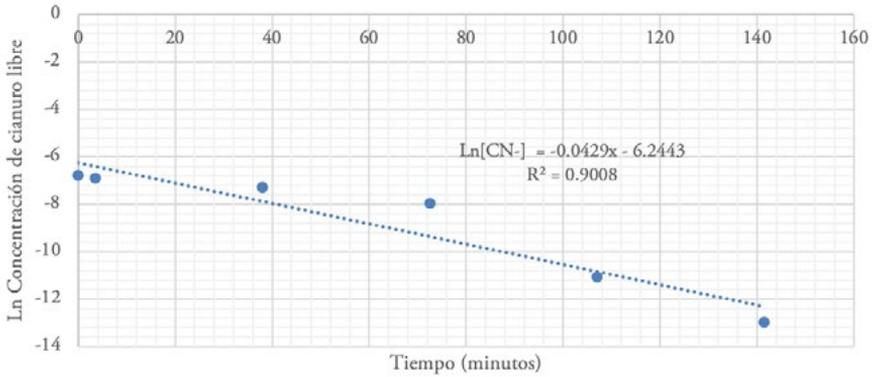
Tabla 18. Cuadro de datos de la reacción orden uno $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrógeno al 70%

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm ³)	Ln (CN)
0	29,30	0,00112692	-6,7882643
3,56	26,20	0,00100769	-6,90009241
37,99	17,60	0,00067692	-7,29795291
72,64	8,94	0,00034385	-7,97531623
107,10	0,40	1,5385E-05	-11,0821425
141,55	0,06	2,3077E-06	-12,9792625

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. 1 mol de $\text{CN}^- = 26 \text{ g}$ aproximadamente; 1 litro = 1 dm³; 1 000 mg = 1 g.

Figura 7. Evaluación de reacción de orden $\alpha=1$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Tabla 18 y Figura 7 muestra la evaluación de reacción de orden uno ($\alpha=1$) proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 70% con un $R^2 = 0,9008$. Por lo tanto, a pesar de que el coeficiente de determinación se acerca a 1, no se acepta ya que es menor al coeficiente de determinación del orden cero ($\alpha=0$).

Según la ecuación de la gráfica de orden uno:

$$\mathbf{\text{Ln} [\text{CN}^-] = -0,0429(t) - 6,2443}$$

El valor de $k = -0,0429 \text{ mol/dm}^3 \cdot \text{min}$ y un $\text{Ln} (\text{CN}^-)_0 = -6,2443 \text{ mol/dm}^3$

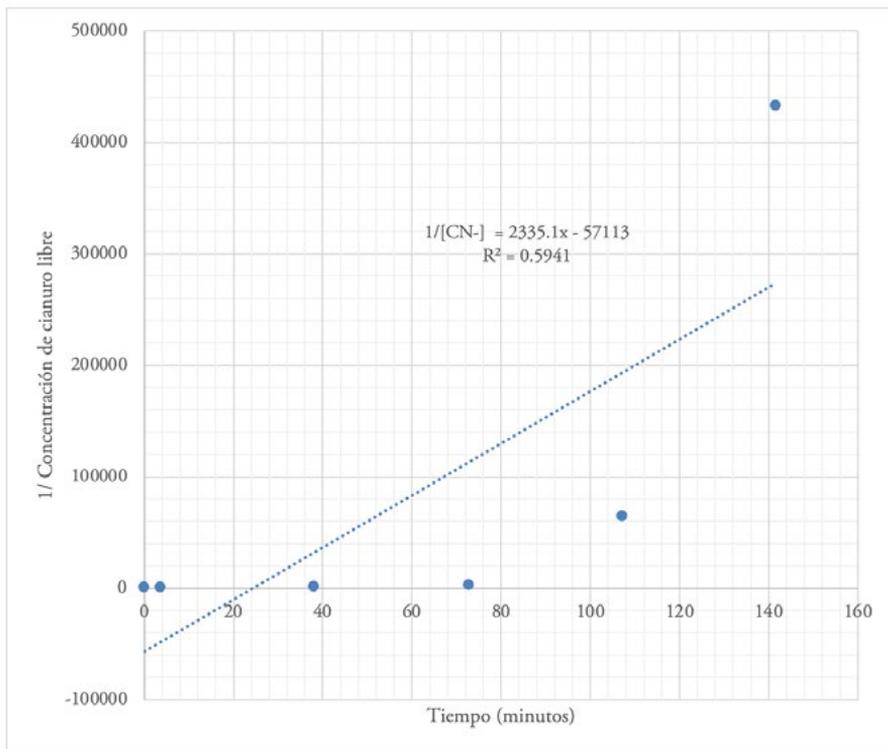
Tabla 19. Cuadro de datos de la reacción orden dos $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%

Tiempo (minutos)	CN (mg/l)	CN (mol/dm ³)	1/CN
0	29,30	0,00112692	887,372014
3,56	26,20	0,00100769	992,366412
37,99	17,60	0,00067692	1477,27273
72,64	8,94	0,00034385	2908,2774
107,10	0,40	1,5385E-05	65000,000
141,55	0,06	2,3077E-06	433333,333

Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

Nota. 1 mol de $\text{CN}^- = 26 \text{ g}$ aproximadamente; 1 litro = 1 dm³; 1 000 mg = 1 g.

Figura 8. Evaluación de reacción de orden $\alpha=2$ proceso de degradación de cianuro libre con peróxido de hidrogeno al 70%



Fuente: Fernández Essenwanger (2024). Realizado en hoja de cálculo de Microsoft Excel

La Tabla 19 y Figura 8 muestran la evaluación de reacción de orden dos ($\alpha=2$) proceso de degradación de cianuro libre con peróxido al 50% con un $R^2 = 0,5941$. Por lo tanto, no se acepta ya que es menor al coeficiente de determinación del orden cero ($\alpha=0$).

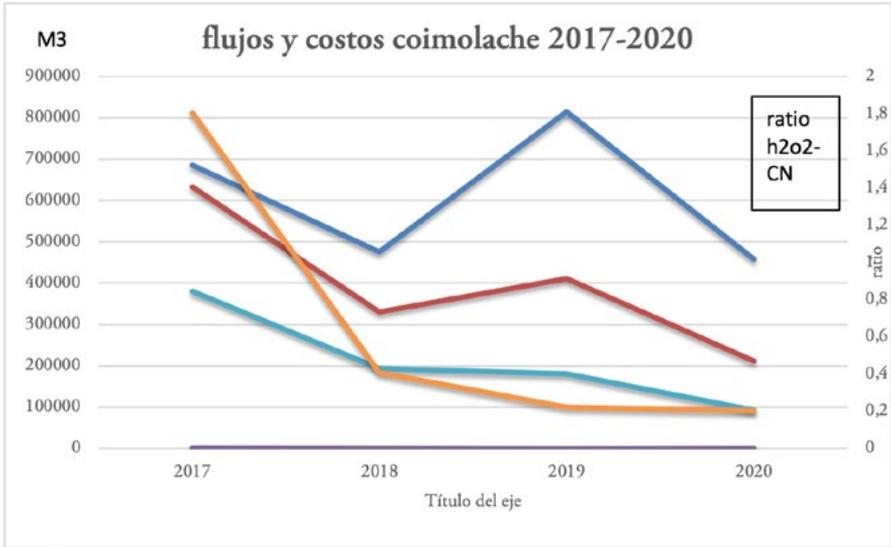
Según la ecuación de la gráfica de orden dos:

$$1/[CN] = 2\,335,1x - 57\,113$$

El valor de $k = 2\,335,1 \text{ dm}^3/\text{mol} \cdot \text{min}$ y un $1/[CN]_0 = -57\,113 \text{ dm}^3/\text{mol}$

Con la evaluación para las tres órdenes de reacción de cero, uno y dos; se establece a partir de los datos experimentales en la planta de la Compañía Minera Coimolache (CMC) que la mejor orden es cero ($\alpha=0$) con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9533.

Figura 9. Evaluación de Flujos y Costos



Fuente: Fernández Essenwanger (2024).

La **Figura 9** nos muestra la Evaluación de costos de tratamientos de flujos de soluciones cianuradas en el año 2018 es de \$ 194,003.5 con un flujo de 475,609 m³ y en el año 2019 es de \$ 180,695.68 con un flujo de 814,972 m³ en planta de tratamiento de efluentes de minera Coimolache.

Conclusiones

La presente investigación realizado, en minera Coimolache, ha permitido establecer las siguientes conclusiones:

El peróxido al 70% facultó la degradación de cianuro libre de una concentración de 29,3 ppm, con un flujo de 80 m³/h en un tiempo de 1,83 horas (110,38min) con una temperatura de operación general de 13,4 °C, un flujo de peróxido de 600 ml/min y una concentración del catalizador cobre (II) del complejo CuCN de 7,618 ppm promedio; proporcionando un ahorro de 36% en la dosificación.

La detoxificación con peróxido al 70%, en la salida del cuarto tanque, cumple con el LMP de cianuro libre <1,0 ppm. y proporciona mayor remoción de cianuro libre a la salida del quinto tanque, menor o igual a 0,06 ppm.

Para la concentración de 70% de peróxido de hidrógeno, el modelo cinético de orden cero es $[CN^-] = -8,322E-06(t) + 0,001032$, con un coeficiente de determinación de 0,9533 y un tiempo de detoxificación de 125 minutos.

La concentración de 50% de peróxido de hidrógeno, presenta el mayor ajuste lineal de orden cero para el modelo cinético $[CN^-] = -8E-06(t) + 0,0011$ con un coeficiente de determinación de 0,9944 y un tiempo de detoxificación de 137,50 minutos.

El uso de peróxido de hidrógeno para el tratamiento de aguas residuales cianuradas permite la reducción de la concentración de esta sustancia hasta niveles aptos para su vertimiento en cuerpos de agua; sin generar perjuicios al medio ambiente.

Recomendaciones

Siendo el peróxido, el reactivo degradador del cianuro libre más económico, se recomienda evaluarlo con un 75%. La teoría de colisiones describe que las moléculas deben colisionar para reaccionar. En esta investigación se comprobó esta teoría y al aumentar la concentración, la velocidad aumentó.

Se recomienda colocar un tren de 5 tanques de 70% y otro de 75% para evaluar los tiempos.

Esta investigación también puede ser aplicada en la planta de tratamientos de efluentes de minera Coimolache, La Zanja, Aruntani, ya que presentan las mismas características.

Evaluar otros procedimientos con diferentes concentraciones de peróxido de hidrógeno para degradación del cianuro libre.

Evaluar otras concentraciones con diferentes químicos degradadores de la planta de tratamiento de efluentes de minera Coimolache.

Referencias

- Amaouche, H., Chergui, S., Halet, F., Yeddou, A. R., Chergui, A., Nadjemi, B., Ould-Dris, A. (2019). Removal of cyanide in aqueous solution by oxidation with hydrogen peroxide catalyzed by copper oxide. *Water Sci Technol*, 80(1), 126-133. <https://doi.org/10.2166/wst.2019.254>
- Ahsan, Q., Griffiths, A., Haug, E., y Norcross, R. (1990). Process for the removal of cyanide from wastewaters (Patent Núm. 4966715). En US Patent (Núm. 4966715). <https://patents.google.com/patent/US4966715A/en>
- Aranguri LLerena, G., y Reyes López, I. A. (2018). Cyanide degradation from mining effluent using two reagents: Sodium metabisulphite and the metabisulphite mixture with hydrogen peroxide. *TECCIENCIA*, 13(25), 1–9. <https://doi.org/10.18180/tecciencia.2018.25.1>
- Baharun, N., Ling, O. P., Rezaei Ardani, M., Ariffin, K. S., Yaraghi, A., Abdullah, N. S., Putra, T. A. R., y Ismail, S. (2020). Effect of hydrogen peroxide and lead (II) nitrate on gold cyanide leaching of Malaysian mesothermal deposit gold ore. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 56(5), 905–918. <https://doi.org/10.37190/ppmp/126629>
- Barrientos Lezcano, J.C. (2018). *Estudio de la reacción de oxidación química de cianuro para el tratamiento de aguas residuales de una empresa minera* [Trabajo de grado, Universidad EAFIT].
- Box, G., Hunter, S., y Hunter, W. (2008). *Estadística para Investigadores, Diseño, innovación y descubrimiento*. Editorial Reverte edición Barcelona.
- Carranza, R., y Lozano, D. (2013). *Influencia del Peróxido de Hidrogeno sobre la degradación de Cianuro, del Cloruro Férrico durante la precipitación del arsénico del sulfhidrato de sodio durante la precipitación del mercurio, presentes en la planta de tratamiento de efluentes de la compañía minera Coimolache S.A.* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Trujillo].
- Díaz, D., y Condori, I. (2009). *Proceso de detoxificación de soluciones cianuradas, usando el método INCO en efluentes mineros* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional de Ingeniería].
- Dong, K., Xie, F., Wang, W., Chang, Y., Lu, D., Gu, X., y Chen, C. (2021). The detoxification and utilization of cyanide tailings: A critical review. *Journal of Cleaner Production*, 302(126946). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126946>

- Estrada-Montoya, C. C., Restrepo Franco, G. M., y Galeano Vanegas, N. F. (2020). Evaluation of cyanide and heavy metals removal in liquid effluents from small mining's gold benefit, by adsorption with activated carbon and hydrogen peroxide in Segovia, Antioquia. *Dyna*, 87(212), 9–17. <https://doi.org/10.15446/dyna.v87n212.79716>
- Fernandez Essenwanger, G. R., & Moreno Eustaquio, W. (2023). Influencia de la concentración de peróxido de hidrógeno en la detoxificación de relaves mineros cianurados. *Revista CIENCIA Y TECNOLOGÍA*, 19(2), 27-36. <https://doi.org/10.17268/rev.cyt.2023.02.02>
- Fernández, G. (2015). *Concentraciones de cobre y su efecto en los niveles de cianuro libre de las soluciones cianuradas por detoxificación* [Tesis de Maestría, Universidad Nacional de Trujillo].
- Griffiths, A. D., Dr. Ahsan, Q. M., Norcross, R., Knorre, H. D., y Merz, F. W. (1992). *Process for the treatment of effluents containing cyanide and/or other oxidizable substances* (Patent Núm. 0355417: B1). European Patent.
- Griffiths, A., Knorre, H., Gos, S. y Higgins, R. (1987). The detoxification of gold-mill tailings with hydrogen peroxide. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 87(9), 279- 283.
- Hou, D., Liu, L., Yang, Q., Zhang, B., Qiu, H., Ruan, S., Chen, Y., y Li, H. (2020). *Decomposition of cyanide from gold leaching tailings by using sodium metabisulphite and hydrogen peroxide*. Wiley. <https://doi.org/10.1155/2020/5640963>
- Evonik (2022, 06 de diciembre). Hydrogen peroxide for mining. Evonik.com. <https://lc.cx/h5eNtl>
- Kitis, M., Akcil, A., Karakaya, E., y Yigit, N. O. (2005). Destruction of cyanide by hydrogen peroxide in tailings slurries from low bearing sulphidic gold ores. *Minerals Engineering*, 18(3), 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2004.06.003>
- Krylova, L. N., Seliverstov, A. F., y Ryabtsev, D. A. (2021). Cleaning of industrial waters containing cyanides by using a combination of ozone and hydrogen peroxide. *Metallurgist (USSR)*, 64(11–12), 1331–1339. <https://doi.org/10.1007/s11015-021-01123-y>
- Labat, L., Dumestre-Toulet, V., Goullé, J. P., y Lhermitte, M. (2004). A fatal case of mercuric cyanide poisoning. *Forensic Science International*, 143(2–3), 215–217. <https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2004.02.039>

- Montgomery, D. (2005). *Diseño y análisis de experimentos*. Limusa Wiley.
- Mamani Endara, O. A. (2007) *Implementación de Procesos de destrucción de Cianuro con Sulfato Ferroso y Peróxido de Hidrógeno*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- Marsden, J., y House, E. (2006). *The Chemistry of Gold Extraction*. Editorial SME.
- Mas, M., Aguirre, F., Amaya, G., Torres, F., y Marchevsky, N. (2009). *Procesos de destrucción de complejos cianurados*. Universidad Nacional del Cuyo.
- Muboko, N., Muposhi, V., Tarakini, T., Gandiwa, E., Vengasayi, S., y Makuwe, E. (2014). Cyanide poisoning and African elephant mortality in Hwange National Park, Zimbabwe: A preliminary assessment. *Pachyderm*, 55, 92–94.
- Ngulube, M. (2016). Elimination cyanide with hydrogen peroxide (H_2O_2) and calcium hypochlorite ($Ca(OCl)_2$) on Gold Mine waste from north luwu, south Sulawesi. *American Journal of Environmental Protection*, 5(4), 97. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20160504.14>
- Pérez, B. F. (2007). *Desarrollo de un nuevo método para la eliminación de cianuro de aguas residuales de mina*. Universidad de Oviedo.
- Rai, A., Chakrabarty, J., y Dutta, S. (2021). Phycoremediation of pollutants from coke-oven wastewater using *Tetraspora* sp. NITD 18 and estimation of macromolecules from spent biomass. *Journal of Water Process Engineering*, 39(101746). <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101746>
- Rapid Response Assessment, A. (s/f). Mine tailings storage: Safety is no accident. Amazonaws.com. <https://lc.cx/sc4M86>
- Razali, N. M., y Wah, Y. B. (2011). Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. <https://lc.cx/T9sGT3>
- Roche, C., Thygesen, K., Baker, E. (2017). *Mine Tailings Storage: Safety Is No Accident. A UNEP Rapid Response Assessment*. United Nations Environment Programme and GRID-Arendal, Nairobi and Arendal.

- Sanyaolu, N. O., Ibikunle, A. A., Kareem, F. A., Ogunmoye, A. O., Ogundare, S. A., Atewolara-Odule, O. C., Hashim, A. M., Akinwunmi, F., Adewuyi, S., Shittu, T., Eromosele, C. O., y Torto, N. (2021). Catalytic detoxification of aqueous cyanide using copper crown electrospun chitosan nanofiber. *Journal of Chemical Society of Nigeria*, 46(2). <https://doi.org/10.46602/jcsn.v46i2.615>
- Syahrul, S., Rumiko, K., Akiko, T., Tantut, S., Ruka, S., Fithria, A. (2016). Prevalence of underweight and overweight among school-aged children and its association with children's sociodemographic and lifestyle in Indonesia. *International Journal of Nursing Sciences*, 3(2), 169-167. <https://doi.org/10.1016/j.ijnss.2016.04.004>
- Pesántez, D., De La Torre, E., y Guevara, A. (2010). Influencia del ion cúprico y del cobre metálico en la oxidación del cianuro libre con aire y carbón activado. *Revista Politécnica*. 29(1), 1-7.
- Tu, Y., Han, P., Wei, L., Zhang, X., Yu, B., Qian, P., y Ye, S. (2019). Removal of cyanide adsorbed on pyrite by H₂O₂ oxidation under alkaline conditions. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 78, 287-292. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.013>
- Tyagi, M., Rana, A., Kumari, S., y Jagadevan, S. (2018). Adsorptive removal of cyanide from coke oven wastewater onto zero-valent iron: Optimization through response surface methodology, isotherm and kinetic studies. *Journal of Cleaner Production*, 178, 398-407. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.016>
- Uppal, H., Tripathy, S. S., Chawla, S., Sharma, B., Dalai, M. K., Singh, S. P., Singh, S., y Singh, N. (2017). Study of cyanide removal from contaminated water using zinc peroxide nanomaterial. *Journal of Environmental Sciences (China)*, 55, 76-85. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2016.07.011>



Religación
Press
Ideas desde el Sur Global



ISBN: 978-9942-561-13-8



9 789942 561138