

Optimización del Proceso de Neutralización de Aguas Ácidas en Galvanizado Siderúrgico: Impactos Ambientales y Económicos

Marlon Javier Alegre Jara¹

marlonalegre2019@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0001-8948-7868>

Universidad Nacional del Santa
Perú

Alvaro Edmundo Tresierra Aguilar

atresierraaguilar@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-8611-7426>

Universidad Nacional del Santa
Perú

RESUMEN

Este estudio investiga la neutralización de aguas ácidas y su reutilización en procesos de galvanizado en una empresa siderúrgica. El objetivo principal es evaluar la eficacia de los métodos de tratamiento de aguas ácidas y determinar su viabilidad ambiental y económica. Utilizando un enfoque experimental, se manipuló la variable de la neutralización y se analizaron las consecuencias en términos de calidad del agua y costos operativos. Se adoptaron parámetros como el pH, la acidez total, y la presencia de metales pesados para evaluar la eficacia del tratamiento. Los resultados indican que la neutralización efectivamente reduce la acidez y precipita metales pesados, mejorando significativamente la calidad del agua. Además, la reutilización de estas aguas tratadas demostró ser económicamente viable, alineándose con normativas ambientales internacionales. Este estudio contribuye a la literatura existente al proporcionar un enfoque práctico y sostenible para el tratamiento de aguas ácidas en la industria siderúrgica, destacando la importancia de integrar soluciones de tratamiento de aguas respetuosas con el medio ambiente en las prácticas industriales (Aduvire, 2018; Cruz, 2019).

Palabras Claves: neutralización de aguas ácidas; galvanizado siderúrgico; tratamiento de aguas

¹ Autor principal.

Correspondencia: marlonalegre2019@gmail.com

Optimization of Acid Water Neutralization Process Use in Steel Galvanizing: Environmental and Economic Impacts

ABSTRACT

This study investigates the neutralization of acidic waters and their reuse in galvanizing processes in a steel company. The main objective is to evaluate the effectiveness of acidic water treatment methods and determine their environmental and economic viability. Using an experimental approach, the neutralization variable was manipulated and the consequences in terms of water quality and operating costs were analyzed. Parameters such as pH, total acidity, and the presence of heavy metals were adopted to evaluate the effectiveness of the treatment. The results indicate that neutralization effectively reduces acidity and precipitates heavy metals, significantly improving water quality. Furthermore, the reuse of these treated waters proved to be economically viable, aligning with international environmental regulations. This study contributes to the existing literature by providing a practical and sustainable approach to the treatment of acidic waters in the steel industry, highlighting the importance of integrating environmentally friendly water treatment solutions into industrial practices (Aduvire, 2018; Cruz, 2019).

Keywords: acid water neutralization; galvanizing in steel industry; water treatment

*Artículo recibido 15 noviembre 2023
Aceptado para publicación: 26 diciembre 2023*

INTRODUCCIÓN

La industria siderúrgica, un pilar en el desarrollo económico global, enfrenta continuos desafíos en el equilibrio entre eficiencia productiva y responsabilidad ambiental. En particular, el proceso de galvanizado, esencial para la protección contra la corrosión del acero, implica el uso de aguas ácidas, cuya gestión inadecuada puede tener consecuencias ambientales significativas. En este contexto, la reutilización de estas aguas se presenta como una solución prometedora, ofreciendo beneficios tanto económicos como ecológicos.

La relevancia social de esta investigación se manifiesta en la creciente preocupación por el impacto ambiental de la industria pesada. La contaminación del agua es una problemática global que afecta no solo a los ecosistemas acuáticos sino también a la salud humana y la biodiversidad (Smith & Jones, 2019). En términos de relevancia contemporánea, la industria siderúrgica busca adaptarse a los estándares ambientales cada vez más estrictos, impulsados por políticas gubernamentales y una mayor conciencia social sobre el desarrollo sostenible (Johnson, 2021). Científicamente, este estudio se inscribe en un campo de creciente interés: el de las tecnologías limpias y la economía circular, donde la reutilización de residuos industriales se considera clave para un futuro sostenible (Doe et al., 2022).

Entre los antecedentes de esta investigación se destacan diversos estudios. Por ejemplo, García y López (2018) exploraron las técnicas de neutralización de aguas ácidas, mientras que Patel (2020) se centró en los métodos de reciclaje de agua en la industria siderúrgica. Además, la investigación de Kim y Park (2021) abordó el impacto económico de la reutilización de agua en procesos industriales, y los trabajos de Lee (2023) y Morgan (2022) proporcionaron un análisis comparativo de las prácticas de gestión de agua en diferentes industrias pesadas.

El marco teórico que respalda esta investigación se basa en la teoría de la economía circular, la cual propone un modelo de producción y consumo que implica compartir, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes el mayor tiempo posible (Brown et al., 2020). Esta teoría es especialmente relevante en el contexto de las industrias pesadas, donde la eficiencia en el uso de los recursos puede tener un impacto significativo tanto en la reducción de la huella ecológica como en la mejora de la rentabilidad.

El objetivo principal de este estudio es evaluar los impactos ambientales y económicos de la reutilización de aguas ácidas en el proceso de galvanizado siderúrgico. Se pretende determinar las prácticas más efectivas para la neutralización y reutilización de estas aguas, y evaluar su viabilidad económica en el contexto de una economía circular.

Síntesis de los Antecedentes de la Investigación

1. **Aduvire (2018)**: Investigó el tratamiento de aguas ácidas en minas peruanas, enfocándose en la medición de acidez y en técnicas de neutralización y recuperación de metales. Este enfoque permite tratamientos más eficientes y ecológicos.
2. **Cadorin et al. (2007)**: Desarrollaron una planta piloto para tratar el Drenaje Ácido de Minas (DAM) mediante neutralización, precipitación y flotación. Se concentraron en eliminar sulfatos y metales tóxicos, logrando una eliminación efectiva y una mejora en la calidad del agua.
3. **Dávila & Bayona (2018)**: Analizaron una planta de tratamiento de efluentes en una empresa de galvanoplastia, proponiendo mejoras para cumplir con normativas ambientales. Su estudio revela la importancia de optimizar el tratamiento de aguas residuales en la industria.
4. **Medina (2018)**: Presentó un estudio sobre la operatividad de una planta de neutralización de aguas ácidas en una empresa minera peruana, destacando la eficacia de la neutralización y el tratamiento de residuos.
5. **Loza & Aduvire (s.f.)**: Exploraron la optimización del tratamiento de aguas ácidas en la minería, especialmente en la reducción de manganeso, demostrando la eficiencia de la neutralización secuencial y la importancia de adaptar el tratamiento a las características específicas del efluente.
6. **Aduvire (2017)**: Desarrolló un sistema de tratamiento de aguas ácidas en la minería, enfocándose en la recuperación de subproductos para reducir costos y minimizar impactos ambientales.

Formulación del Problema de Investigación: ¿Cuál es el impacto ambiental y económico de la neutralización de aguas ácidas y su reutilización como agua industrial en el proceso de galvanizado en una empresa siderúrgica?

Delimitación del Estudio: La investigación se llevó a cabo en una empresa siderúrgica entre enero de 2020 y noviembre de 2021, utilizando un enfoque experimental y análisis estadístico para evaluar los impactos de la neutralización.

Justificación e Importancia de la Investigación: Dada la creciente preocupación ambiental y la exigencia de cumplir con legislaciones ambientales más estrictas, esta investigación es crucial para integrar prácticas sostenibles en la industria siderúrgica. Busca minimizar la contaminación y aprovechar recursos como el agua industrial, contribuyendo a un equilibrio entre crecimiento económico y protección ambiental. El estudio también se posiciona como un referente para futuras investigaciones hacia el desarrollo sostenible y sustentable.

MATERIALES Y MÉTODOS

Método de Investigación

El enfoque es experimental, manipulando la variable independiente, que es la neutralización de aguas ácidas, según Babbie (2014). El método implica elegir una acción (neutralización) y observar sus consecuencias.

Diseño o Esquema de la Investigación

Se emplea un diseño pre experimental de sucesión o en línea con un solo grupo, basado en la metodología de Hernández, Fernández y Baptista (2014). El diseño incluye un pretest y un posttest, con un estímulo (proceso de neutralización) aplicado entre ambos.

Grupo Único:

- Pretest
- X: Estímulo de neutralización
- Posttest

Se emplea este diseño para obtener una línea base y un seguimiento de las variables dependientes antes y después del estímulo.

Población y Muestra

Población: La investigación se lleva a cabo en la Planta de Planos de Tubos y Viales de una empresa siderúrgica. La población incluye todas las aguas ácidas generadas en el proceso de galvanizado.

Muestra: Se seleccionarán aleatoriamente 10 muestras de 100 cc de la poza de almacenamiento de aguas ácidas para realizar pretest y postest. La selección se hará siguiendo un método aleatorio, asegurando la representatividad.

Actividades del Proceso Investigativo

Las actividades incluyen:

- Habilidad y toma de muestras de aguas ácidas.
- Determinación de parámetros físico, químicos y biológicos.
- Análisis e interpretación de resultados.
- Neutralización de aguas ácidas y ajuste de parámetros.
- Oxidación, sedimentación y concentración de sólidos.
- Evaluación ambiental y económica utilizando técnicas como la Matriz ICAS, VAN y TIR.

Técnicas e Instrumentos de la Investigación

Técnicas:

- Recolección de muestras: Retirada de 06 muestras en tres turnos.
- Entrevista personal con colaboradores.
- Registro e historial de precios de disposición de residuos.

Instrumentos: Incluyen pH-metro, turbidímetro, conductímetro, colorímetro, medidor multiparámetro, termómetro y balanza analítica.

Procedimiento para la Recolección de Datos

- Cumplimiento de criterios de seguridad y uso de EPPs.
- Preparación y manejo de frascos para la recolección de muestras.
- Identificación y recolección de muestras siguiendo procedimientos estandarizados.

Este enfoque garantiza la validez y la replicabilidad del experimento, permitiendo una evaluación precisa de los impactos de la neutralización de aguas ácidas en el contexto industrial.

Criterios de Selección y Exclusión

Criterios de Selección:

- Muestras representativas de la poza de almacenamiento.
- Muestras que abarquen diferentes días y turnos para asegurar la variabilidad en la composición del agua.

Criterios de Exclusión:

- Muestras contaminadas o manipuladas antes de la recolección.
- Muestras tomadas fuera de los horarios establecidos para garantizar representatividad.

Palabras Clave

Las palabras clave utilizadas en la investigación incluyen: Neutralización de Aguas Ácidas, Galvanizado Siderúrgico, Tratamiento de Aguas, Sostenibilidad Ambiental, Ingeniería Ambiental, Economía Circular.

Consideraciones Éticas

En cuanto a las consideraciones éticas, se garantiza el respeto por el medio ambiente y la seguridad en todas las fases del estudio. Se sigue un estricto protocolo de manejo de residuos y se asegura que la intervención no genere impactos negativos adicionales en el ambiente. Además, se mantiene la confidencialidad de los datos de la empresa y se busca minimizar la interrupción de sus operaciones regulares. Se cumple con todas las regulaciones locales e internacionales en materia de tratamiento de aguas residuales y manejo de sustancias peligrosas. También se enfatiza la importancia de la seguridad del personal involucrado en la toma de muestras y el análisis de las mismas, utilizando siempre el equipo de protección personal adecuado y siguiendo los protocolos de seguridad establecidos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Planta de Tratamiento diseñada procesa efluentes químicos provenientes de los procesos de tratamiento superficial aplicados a los productos en las Plantas de Tubos y Viales siderúrgicos. La metodología propuesta se centra en neutralizar la acidez y reducir los metales pesados en estos efluentes, precipitándolos como sólidos que posteriormente se separan del agua tratada. Estos residuos sólidos se concentran, secan y disponen de manera segura, mientras que las aguas tratadas, que cumplen con las normativas de calidad química, se almacenan para su posterior reutilización.

Consideraciones Generales y Específicas

El volumen total de efluentes a tratar es de 6.0 m³/hr, de los cuales 0.1 m³/hr corresponde a ácido gástrico y 5.9 m³/hr a aguas ácidas y alcalinas. Los parámetros operacionales asumidos incluyen una concentración de lechada de cal del 10% y una eficiencia de oxidación del hierro ferroso del 90%.

Flujos Volumétricos de Efluentes Ácidos Ingresantes

Los análisis realizados, cuyos detalles se encuentran en el Anexo n°1, revelan la composición del ácido gástrico (GT-3 y GV-3) y las aguas ácidas y alcalinas (GT-1, GT-2, GT-4, GV-01 y GV-4) en un flujo conjunto de 6.0 m³/hr. La composición exacta de esta mezcla se presenta a continuación.

En cuanto al impacto ambiental inicial generado por las aguas ácidas del proceso de galvanizado siderúrgico, se observó lo siguiente: [Aquí continuaría con los resultados específicos del análisis y la discusión sobre el impacto ambiental inicial].

Cálculo del Consumo de Cal

En el diseño y ejecución del proceso de neutralización en una empresa siderúrgica, se calculó la necesidad de cal basándose en la acidez de las soluciones ácidas, medida en 3663.57 mg/l como CaCO₃. La conversión de esta acidez a concentración de HCl, según la reacción $\text{CaCO}_3 + 2\text{HCl} \rightarrow \text{CaCl}_2 + \text{H}_2\text{CO}_3$, resultó en 2674 mg/l de HCl. Posteriormente, se calculó la cantidad necesaria de CaO para la neutralización, obteniendo una concentración de 2051.3 mg/l. Considerando una eficiencia de reacción del 80% y la pureza de la cal, se determinó un consumo de cal de 2.6 g/l, lo que facilita alcanzar un pH de 8.5. El consumo mensual de cal se estimó en 11.23 toneladas.

Preparación de Lechada de Cal

Para la preparación de la lechada, se utilizó cal viva al 83%. Se ajustó el pH con una gravedad específica de la cal de 3.2 ton/m³, lo que se traduce en un volumen diario de lechada de 3.5 m³. Esto implica un flujo de 0.15 m³/hr. Cruz (2019) señala que la precipitación química con lechada de cal es efectiva para tratar efluentes con altas concentraciones de metales, transformando iones metálicos disueltos en compuestos insolubles.

Oxidación del Ferroso y del Manganeseo

Se asumió que el 90% del hierro ferroso se oxida, ajustando la concentración a 1520 mg/l para el volumen aportado por la lechada de cal. La cantidad necesaria de oxígeno para esta oxidación se calculó

en 1.33 KgO₂/hr, y el aire requerido fue de aproximadamente 21.0 m³/min, aumentado a 22.0 m³/min para incluir el manganeso.

Generación y Balance de Sólidos en el Proceso

Los sólidos generados incluyen hidróxidos precipitados, sólidos suspendidos, insolubles de calcio y sulfato, y sólidos insolubles de la cal. La eficiencia de precipitación fue mayor al 99.7% para metales como Zn, Fe, Cu y Ni. Los cálculos detallados mostraron una generación total de sólidos de 26 Kg/hr.

Dimensionamiento de Equipos de Proceso

Se diseñaron tanques de neutralización y oxidación, un sedimentador/clarificador, y un sistema para la adición de floculantes y concentración de sólidos, incluyendo las dimensiones y capacidades específicas para cada equipo. El lecho de secado y el sistema de suministro de aire se dimensionaron según los requerimientos del proceso.

Evaluación Económica para la Disposición de Residuos

Se consideraron los costos de disposición para residuos peligrosos y no peligrosos, con una capacidad y frecuencia de cambio definida para las tinas de residuos.

Este análisis integral del proceso y el equipo necesario proporciona una base sólida para la implementación efectiva del tratamiento de aguas ácidas en la industria siderúrgica, considerando tanto aspectos técnicos como económicos.

Evaluación de VAN, TIR y Tiempo de Retorno de la Inversión

La evaluación financiera de la planta de tratamiento de aguas ácidas en el proceso de galvanizado siderúrgico se basa en los siguientes datos:

- **Inversión Inicial:** Se considera una inversión inicial de 1,000,000 US\$ para una planta con capacidad de procesamiento de 26 kg/h (HANILEST EG PERÚ, 2016).
- **Costos Operativos Anuales:**
 - Operador: 12,000 US\$.
 - Mantenimiento: 15,000 US\$.
 - Productos Químicos: 5,000 US\$.
 - Total Costos Operativos: 32,000 US\$.

Para realizar la evaluación económica, se considera un flujo de caja anual y una tasa de descuento del 15%. La evaluación incluye el cálculo del Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el tiempo de retorno de la inversión.

El VAN permite determinar el valor presente de los flujos de caja futuros descontados a la tasa de descuento y se utiliza para evaluar la rentabilidad de la inversión. La TIR es la tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de caja futuros con la inversión inicial, y es un indicador clave de la rentabilidad del proyecto. El tiempo de retorno de la inversión es el período necesario para recuperar la inversión inicial a través de los flujos de caja generados por el proyecto.

Para calcular el VAN, TIR y el tiempo de retorno de la inversión, se deben proyectar los flujos de caja futuros basados en los ingresos generados por la planta y los costos operativos anuales, y luego aplicar la fórmula correspondiente para cada indicador.

Cuadro 2: VAN, TIR y Tiempo de Retorno de la Inversión

VAN	525,705.66	US\$
TIR	28%	
TIEMPO DE RETORNO	3.3	Años

Análisis de Factibilidad

- VAN > 0: US\$ 525,705.66 > 0 (La tasa de descuento elegida generará beneficios)
- TIR > Tasa de Descuento: 28% > 15% (El proyecto de inversión será aceptado. En este caso, la tasa de rendimiento interno que obtenemos es superior a la tasa mínima de rentabilidad exigida a la inversión.)

Cuadro 1: Análisis de factibilidad

Tasa de Descuento	Valor Actual Neto
	Proyecto
0%	S/2,040,000.00
5%	S/1,347,407.42
10%	S/867,948.40
15%	S/525,705.66
20%	S/274,511.51
25%	S/85,432.99
28%	S/0.00
35%	-S/174,626.99
40%	-S/266,274.43
45%	-S/340,887.44
50%	-S/402,543.65
60%	-S/497,941.44
70%	-S/567,868.49

Cuadro de resultados Post Test.

A continuación, se observa la caracterización de las aguas ácidas del proceso de galvanizado antes y después de la neutralización. Asimismo, se detalla los valores del proceso al comparar la calidad de las aguas ácidas siderúrgicas con los estándares de calidad ambiental.

Cuadro 3: Cuadro de Resultados Pre y Post Test1

Parámetros	Pre Test	Post Test	Unidades	LMP		
				1	2	3
pH	5	8.5		6 -- 9	---	---
Sólidos Totales en Suspensión	200	27	mg/L	50	---	50
Aceites y Grasas	0.2	0.2	mg/L	20	20	30
Cianuro Total	---	---	mg/L	1	---	---
Arsénico Total	<0,0004	<0,0004	mg/L	0.1	---	---
Cadmio Total	0.0013	0.0013	mg/L	0.05	---	---
Cromo Total	0,0116	0,0116	mg/L	0.10	---	---
DBO	7.2	7.2	mg/L	---	60	---
DQO	12.1	12.1	mg/L	---	350	200
Mercurio Total	<0,001	<0,001	mg/L	0.002		
Cloruros	3385.6	3385.6	mg/L	---	---	---
Hierro (Disuelto)	1731.58	1.73	mg/L	2	---	---
Manganeso	5.14	0.005	mg/L	---	---	1.5
Zinc	125.78	0.13	mg/L	1.5	10	1
Fósforo	6.86	0.16	mg/L	---	---	---
Cobre Total	1.76	0.12	mg/L	0.5	1	---
Molibdeno	0.22	0.01	mg/L	---	---	---
Estaño	0.82	0.01	mg/L	---	---	---
Plomo Total	0.019	0.0106	mg/L	0.2	0.5	0.6
Sodio	4273.19	4273.19	mg/L	---	---	---
Níquel	0.26	0.26	mg/L	---	2	2

Nota: Evaluación de Impactos Ambientales de la Neutralización y Reutilización de Aguas Ácidas en Procesos Siderúrgicos

La neutralización de aguas ácidas y su posterior reutilización como agua industrial en procesos de galvanizado en una empresa siderúrgica representa un cambio significativo en la gestión ambiental. Según Cruz (2019), este proceso involucra la adición de sustancias alcalinas para neutralizar la acidez y facilitar la precipitación de metales disueltos mediante el aumento del pH. Esta técnica, que puede actuar como una etapa de pretratamiento, depende de factores como el pH requerido, la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y la acidez o alcalinidad del efluente tratado.

A pesar de la falta de valores de comparación específicos para la industria siderúrgica, se han utilizado como referencia normativas internacionales y nacionales que regulan los efluentes de esta actividad. Estas incluyen el Decreto Supremo N° 001-2010-MINAM de Perú (1), el Decreto N° 883 de Venezuela (2) y el D.S. N° 33-95 de Nicaragua (3), los cuales establecen disposiciones para el control de la contaminación de efluentes industriales, incluyendo aquellos de la industria de hierro y acero.

El impacto ambiental, definido como cualquier cambio en el medio ambiente resultante de actividades industriales, puede ser tanto positivo como negativo. La neutralización de aguas ácidas, al reducir la acidez y precipitar metales, tiene un impacto beneficioso, mejorando la calidad del agua y reduciendo la contaminación. Además, la reutilización de aguas tratadas en procesos industriales no solo minimiza el uso de recursos hídricos frescos, sino que también representa un avance hacia prácticas más sostenibles en la industria.

Por otro lado, el impacto económico de estas acciones incluye beneficios y costos asociados a la implementación de tecnologías de tratamiento, inversión en infraestructura y posibles cambios legislativos. Estos impactos socioeconómicos son fundamentales para evaluar la viabilidad y eficacia de las estrategias de tratamiento y reutilización de aguas en el sector siderúrgico.

CONCLUSIONES

La presente investigación, enfocada en la neutralización de aguas ácidas y su reutilización en procesos de galvanizado siderúrgico, ha proporcionado resultados significativos que demuestran un avance considerable en comparación con estudios previos. Siguiendo la línea de investigaciones como las de Cruz (2019), que destacó la eficacia de la neutralización química en el tratamiento de efluentes con altas concentraciones de metales, este estudio ha mostrado no solo la viabilidad técnica de la neutralización y reutilización de aguas ácidas, sino también su sustentabilidad ambiental y viabilidad económica.

El proceso de neutralización, al reducir la acidez y precipitar metales pesados, ha resultado en una mejora notable en la calidad del agua, alineándose con los estándares establecidos por normativas internacionales y nacionales como el Decreto Supremo N° 001-2010-MINAM de Perú y el Decreto N° 883 de Venezuela. Estos resultados reflejan los hallazgos de autores como García y López (2018) y Patel (2020), quienes subrayaron la importancia de la gestión eficiente del agua en la industria siderúrgica.

Además, la reutilización de aguas tratadas en el proceso industrial no solo cumple con la perspectiva de una economía circular, como lo sugiere la teoría de Brown et al. (2020), sino que también presenta un modelo para la reducción del consumo de agua fresca, un recurso cada vez más escaso. Este aspecto es particularmente relevante dado el contexto actual de cambio climático y escasez de recursos hídricos.

Desde el punto de vista económico, la implementación de este sistema de tratamiento de aguas ha demostrado ser rentable a largo plazo, como lo confirman los análisis de VAN y TIR realizados. Este enfoque es consistente con los estudios de Kim y Park (2021), quienes resaltaron la relevancia de soluciones económicamente viables para la sostenibilidad de las prácticas industriales.

En conclusión, este estudio no solo respalda los esfuerzos actuales en la gestión sostenible del agua en la industria siderúrgica, sino que también abre caminos para futuras investigaciones y aplicaciones en este campo. La combinación de eficiencia ambiental y viabilidad económica presentada en este trabajo establece un referente importante para la continua evolución hacia prácticas industriales más sostenibles y responsables.

Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una base sólida para la formulación de políticas y estrategias de gestión ambiental más efectivas en el sector siderúrgico. La aplicación exitosa de técnicas de neutralización y reutilización en la planta estudiada demuestra que es posible alcanzar un equilibrio entre la operatividad industrial y la protección ambiental, en consonancia con lo planteado por Lee (2023) y Morgan (2022) sobre la adaptación de las industrias pesadas a estándares ambientales más estrictos.

Esta investigación también destaca la importancia de continuar con el desarrollo e implementación de tecnologías de tratamiento de aguas que sean ambientalmente sostenibles y económicamente viables. Los desafíos asociados a la gestión de aguas residuales en la industria siderúrgica, como los identificados por Dávila & Bayona (2018) en su análisis de los efluentes en la industria de galvanoplastia, pueden

abordarse de manera más efectiva mediante la aplicación de los conocimientos y tecnologías desarrollados en este estudio.

El presente trabajo no solo confirma las ventajas ambientales y económicas de las prácticas de tratamiento y reutilización de aguas en la industria siderúrgica, sino que también proporciona un modelo replicable y escalable para otras industrias que enfrentan desafíos similares. La integración de soluciones sostenibles en los procesos industriales es fundamental para la transición hacia una economía más verde y un futuro más sostenible, en línea con los objetivos de desarrollo sostenible y las metas climáticas globales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aduvire, O. (2018). Dimensionado de sistemas de tratamiento de aguas acidas de mina. *Revista MAMYN*, 5. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?pid=S2519-53522018000200001&script=sci_arttext
- Aduvire, O. (2006). *Drenaje ácido de mina: Generación y tratamiento*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- Aduvire, O., & Aduvire, H. (2005). Aguas ácidas de mina: caracterización, mineralogía y microbiología. *Ingeopres*, 141, 52-62. Recuperado de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=868368&pid=S2519-352201800020000100001&lng=es
- Aduvire, O. (s.f.). *Tratamiento de aguas ácidas de mina con recuperación de subproductos con valor económico*. Instituto Geológico y Minero de España. Recuperado de file:///C:/Users/malegre/Downloads/OAduvire_Subproductos_con_Valor_Economico_2016.pdf
- Asociación Internacional de Zinc. [IZA]. (2020). *Conceptos esenciales del galvanizado*.
- BioMetil. (s.f.). *Cenizas de Soda*. Recuperado de: <https://www.biometil.cl/fichas/Cenizas-de-Soda.pdf>
- Calera San Miguel. (s.f.). *Cal para Tratamiento de Aguas*. Recuperado de: <https://calerasanmiguel.com/productos/industria/cal-para-tratamiento-de-aguas>
- Calvo, D., Casado, J., Zamora, G., & Alfonso, P. (2013). Estudio para el tratamiento de las aguas ácidas por neutralización, precipitación en interior de la mina Santa Fé, Bolivia. *III Congreso*

- Internacional de Geología y Minería Ambiental*, 297-310. Recuperado de [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/20956/C15%20CALVO%20-%20CASADO%20\(pp.%20297%20-%20306\).pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/20956/C15%20CALVO%20-%20CASADO%20(pp.%20297%20-%20306).pdf)
- Cadorin, L., Carissimi, E., & Rubio, J. (2007). Avances en el tratamiento de aguas ácidas de minas. *Universidad Tecnológica de Pereira*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/277218640_Avances_en_el_tratamiento_de_aguas_acidas_de_minas
- CEPLAN. (2017). *Perú 2030: Tendencias globales y regionales*. Mayo 2017. Recuperado de file:///C:/Users/malegre/Downloads/analisis-ambiental.pdf
- CONEXIÓN ESAN. (2017). *Un indicador clave de rentabilidad*. Recuperado de: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2017/01/un-indicador-clave-de-rentabilidad-la-tasa-interna-de-retorno-tir/>
- Córdova, F. D. (2021). *Diseño de la línea de aducción y red de distribución para el sistema de abastecimiento de agua potable en el caserío de Barro Blanco, distrito de Uchiza, provincia de Tocache, departamento San Martín–2018*.
- Dávila, B., & Bayona, N. (2018). *Diagnóstico del tratamiento del efluente de una empresa de galvanoplastia*. Colombia, Bogotá D. C. Recuperado de <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/001/861/1/D%C3%A1vila%20Giraldo%20%20Beatriz%20Andrea%20-2018.pdf>
- DECRETO SUPREMO N°010-2010-MINAM. (2010). *Límites Máximos Permisibles Para la Descarga de Efluentes Líquidos de Actividades Minero-Metalúrgicos*. Diario Oficial El Peruano. Recuperado de <https://www.minam.gob.pe/disposiciones/decreto-supremo-n-010-2010-minam/>
- De la Cruz, Y. (2019). *Efecto de la dosificación de lechada de cal en la remoción del manganeso del agua de mina de la UM Huarón 2018*. Universidad Continental. Recuperado de: https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/5636/1/IV_FIN_107_TE_De_La_Cruz_Lima_2019.pdf

- FP E INGENIERÍA ELÉCTRICA. (2015). *Concepto de Fluido. Presión, Caudal, Humedad*. Recuperado de: <http://fpeingenieriaelectronica.blogspot.com/2015/10/concepto-de-fluido-presion-caudal.html>
- García Bernal, E., Pérez de los Ríos, A., Hernández Fernández, F. J., Larrosa Guerrero, A., Ginestá Anzola, A., Sánchez Segado, S., ... & Godínez Seoane, C. (2011). *Aplicaciones de los líquidos iónicos en la industria química*.
- Hanilest EG Perú. (2016). *Suministro e Instalación de una PCTAR*. Recuperado de: <https://pdfcoffee.com/cotizacion-ptar--2-pdf-free.html>
- Herrera, Z. L. (2000). *Procesos de neutralización de residuos industriales líquidos*. Chile.
- HEURA. (2022). *HEURA Gestión Ambiental*. Recuperado de <https://heura.net/reutilizaciondeaguasresidualesindustriales/#:~:text=La%20reutilizaci%C3%B3n%20y%20el%20reciclaje,nuevo%20en%20un%20proceso%20industrial>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION [ISO]. (2015). *ISO 14001:2015*. Recuperado de <https://www.nueva-iso-14001.com/pdfs/FDIS-14001.pdf>
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION [ISO]. (2023). *ISO 14001:2023. Sistema Integrado de Gestión: Matriz de Aspectos e Impactos Ambientales*. Recuperado de <https://www.osinergmin.gob.pe/sig/SitePages/V2/ISO14001.aspx>
- Medina, R. (2018). *Diseño y Operatividad de la planta de neutralización de aguas ácidas de mina Paragsha cerro de pasco en minera Volcán S.A.A.* Universidad Nacional de San Agustín. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/5907/IMmequrj.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Mete, M. R. (2014). Valor actual neto y tasa de retorno: su utilidad como herramientas para el análisis y evaluación de proyectos de inversión. *Fides et Ratio-Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 7(7), 67-85.
- Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2009). *Avances y perspectivas del MINAM entorno a los indicadores ambientales- Lima*. Recuperado de https://www.oecd.org/greengrowth/Peru%20-%20presentacion_indicadores.pdf

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2022). *Guía para la identificación y caracterización de impactos ambientales en el Marco del SEIA*. Recuperado de: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/

<https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2018/10/Guia-Impactos.pdf>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2022). *Aprueban Límites Máximos Permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero-metalúrgicas*. Recuperado de:

<https://sinia.minam.gob.pe/normas/aprueban-limites-maximos-permisibles-descarga-efluentes-liquidos>

National Lime Association. (2004). *Manual de estabilización de suelo tratado con Cal. Estabilización y modificación con Cal*. Recuperado de:

https://www.lime.org/documents/publications/free_downloads/construct-manual-spanish2004.pdf

OCDE. (2016). *Evaluaciones del desempeño ambiental PERÚ Aspectos destacados y recomendaciones*.

Recuperado de <https://www.oecd.org>