

Removal of Heavy Metals Using Dolomite in Acid Mine Drainage of a Mining Environmental Liability of Hualgayoc

Colque-Leey, M., Br.¹, Murrugarra-Roncal, J., Br.², Licapa-Redolfo, G. MsC.³

^{1,2}Ingeniería De Minas, Universidad Privada Del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. N00029061@upn.pe; N00039518@upn.pe

³Universidad Privada Del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Abstract– The objective of this research was to evaluate the efficiency of dolomite in the removal of Al, Cd, Fe, Mn, Pb, Zn and As in acid mine drainage from mining environmental liabilities in Hualgayoc, using dolomite, it is possible to neutralize the pH and precipitate the metals present in the acid waters, so that they comply with the LMP, for which the acid mine drainage without treatment was initially characterized with initial concentrations of 0.367 mg/L of As; 0.372 mg/L of Cd, 122.3 mg/L of Fe, 0.111 mg/L of Pb and 69 mg/L of Zn and a pH of 2.69. A total of three treatments were had in two mining environmental liabilities with three replicates for each one, the best results were obtained with the treatment with a dosage of 30 g of dolomite and 6 hours the final concentrations were determined 0.08 mg/ L of As, 0.006 mg/L of Cd, 0.155 mg/L, < LCM (0.04 mg/L) of Pb and 10.59 mg/L of Zn reaching a pH of 7.63. At point two in the drainage, it was possible to reduce As by 75%, Cd by 97.86%, Pb by 98.2%, Fe 99.7% and Zn by 92.23% and increase the pH until reaching neutral values, with this it is being proposed a complementary treatment for the water from mining environmental liabilities.

Keywords-- Dolomite, Remediation, Acid mine drainage, Metal precipitation.

Digital Object Identifier (DOI):

<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2022.1.1.17>

ISBN: 978-628-95207-0-5 **ISSN:** 2414-6390

Remoción de Metales Pesados Empleando Dolomita en Drenaje Ácido de Mina de un Pasivo Ambiental Minero de Hualgayoc

Colque-Leey, M., Br.¹, Murrugarra-Roncal, J., Br.², Licapa-Redolfo, G. MsC.³

^{1,2}Ingeniería De Minas, Universidad Privada Del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. N00029061@upn.pe; N00039518@upn.pe

³Universidad Privada Del Norte (UPN), Cajamarca, Perú. gladys.licapa@upn.edu.pe

Resumen – La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficiencia de la dolomita en la remoción de As, Cu, Cd, Fe, Pb y Zn en drenaje ácido de mina de los pasivos ambientales mineros de Hualgayoc. El propósito del empleo de Dolomita es contar con tecnologías alternativas, que presenten una alta eficiencia y bajo costo. Inicialmente se caracterizó el drenaje ácido de mina sin tratamiento mediante un análisis de metales totales obteniéndose concentraciones iniciales para el Punto 01 de 0.367 mg/L de As; 1.379 mg/L de Cu; 0.372 mg/L de Cd; 122.3 mg/L de Fe; 0.110 mg/L de Pb y 69 mg/L de Zn, además de un pH 2.69. Se tuvieron un total de tres tratamientos agregando proporciones de 10, 20 y 30g de dolomita en dos puntos de control, los resultados óptimos se obtuvieron con el tratamiento con una dosificación de 30 g y 6 horas de sedimentación. En el Punto 01 y con tratamiento de 30g de dolomita se logró reducir el As en un 98.64%, Cu en un 95.25%, Cd en 98.39%, Pb en 96.40%, Fe 99.87% y Zn en 84.65% y aumentar el pH hasta alcanzar un valor neutro de 7.63, con ello se está proponiendo un tratamiento complementario y alternativo para las aguas de pasivos ambientales mineros.

Palabras Clave— Dolomita, Remediación, Drenaje ácido de mina, Precipitación de metales.

I. INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua es una de las principales problemáticas a nivel mundial debido a que este recurso es fuente de vida y su utilización en las diferentes industrias y en la civilización es indispensable. Las fuentes contaminantes pueden ser puntuales como por ejemplo desechos industriales, refinerías de petróleo o relaves mineros; o difusas, como escorrentías de zonas agrícolas; pero también naturales como bacterias o parásitos que necesitan oxígeno [1]

Según Guillén et al. [2] la industria minera es la principal responsable de la degradación de la calidad del agua, debido a la descarga de las aguas de los relaves que tienen según su origen diferentes características, llevando consigo altas cantidades de materiales disueltos y en suspensión.

A lo largo de la historia, la minería ha sido la principal actividad económica en el Perú por el potencial mineralógico, contando con las reservas más grandes de plata, plomo zinc y molibdeno. No obstante, en muchas zonas del país las labores mineras fueron abandonadas sin haberse llevado a cabo trabajos de rehabilitación inmediata ni cierres de mina apropiados [3]. La consecuencia de esto es la generación de pasivos ambientales mineros (PAMs) que son el mayor contaminante de las fuentes hidrológicas resultando fuertemente dañinas para los seres vivos.

Los pasivos ambientales contienen diversas sustancias, incluidas las aguas ácidas las cuales se generan debido al contacto del oxígeno y la meteorización con los yacimientos ferro sulfurosos que quedan expuestos posterior a su extracción creando un escurrimiento de soluciones ácidas sulfatadas [4]. Estos efluentes presentan un grado significativo de metales pesados (Al, Mn, Zn, Cu, Pb, Hg, Cd, Ni) que se encuentran disueltos; además, se forman por la oxidación de forma natural y se acelera cuando se aumenta la exposición de la roca o de la ganga al oxígeno y al agua [5] y [6].

Se reporta que, en el distrito de Hualgayoc, afloran varios cientos de vetas, las que se ubican en fallas geológicas con tamaños variables: 100 metros a 1 kilómetro de largo, y de 1 centímetro a 20 metros de espesor. Las de mayor producción, poseen piritita y cuarzo, con pequeñas cantidades de esfalerita, galena, tetraedrita y calcopiritita [7]. Durante los últimos años son dos las empresas mineras formales que operan en la provincia, ambas se ubican en el distrito de Hualgayoc: Gold Fields la Cima, que opera el proyecto de Cerro Corona; y la empresa Coimolache con el proyecto Tantauhuatay, de Buenaventura, que opera en Hualgayoc y Chugur; no obstante, las mineras artesanales, aunque sean de gran importancia para el adecuado desarrollo económico, trajeron consigo importantes daños al agua, aire y suelo [7].

Muchas empresas mineras hoy en día priorizan el bienestar de la comunidad que los rodea. Sin embargo, existen pasivos ambientales que han sido abandonados, como es el caso de Hualgayoc, Cajamarca. Existe una alternativa común para resolver estos tipos de casos como el uso de Cal, no obstante, es importante también conocer otras alternativas para neutralización de pH y remoción de metales pesados presentes en aguas ácidas de los pasivos ambientales, con tecnologías de fácil manejo y bajo costo, como la aplicación de dolomita, con la que se busca una alta eficiencia para lograr una mejora y un menor impacto ambiental y social.

La dolomita es un compuesto mineral de carbonato doble de calcio y magnesio, con fórmula $(CaMg_2(CO_3)_2)$ con la principal función de aumentar el pH en suelos y efluentes ácidos, asimismo logra una adsorción de iones metálicos que se encuentran diseminados. Para aplicar este tratamiento depende de las propiedades fisicoquímicas del medio en el que va a aplicar, así como el potencial de hidrógeno, la adsorción de metales pesados en solución y sedimentación de metales en suspensión [8] y [9]

Diversas investigaciones describen que los métodos de tratamiento y su eficiencia al remover metales y neutralizar el pH empleando la dolomita dependen de factores químicos y fisicoquímicos, entre sus bondades es un método alternativo para la remediación de drenaje ácido de mina de un pasivo ambiental minero, siendo su principio la precipitación de metales y por ende logrando la purificación de estas, logrando neutralizar y reducir las concentraciones de iones metálicos como Fe, Cu, Pb, Zn, etc. [9]. Por lo consiguiente, es importante el estudio de alternativas para la neutralización y remoción de metales pesados presentes en aguas ácidas de los pasivos ambientales de Hualgayoc con tecnologías de fácil manejo y bajo costo.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación y recolección de muestras

Se realizó la recolección de muestras, en el distrito de Hualgayoc, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca, siguiendo la carretera al noroeste de la ciudad de Hualgayoc, en la que se identificaron dos socavones abandonados de los que fluyen aguas ácidas entre los 3650 y 3710 m.s.n.m. En este lugar se identificaron los puntos que mejor representen el pasivo ambiental. Posteriormente se identificaron puntos estratégicos y representativos a una distancia de 2 metros entre sí en cada uno de los pasivos de los que se procederá a tomar las muestras (Fig. 1), se extrajo 4 litros de drenaje ácido de mina para cada punto representativo. Se procedió al registro de la georreferenciación e identificación del punto de monitoreo como indica la Tabla 1.

Asimismo, la muestra de DAM se etiquetó y se envió al Laboratorio Regional del Agua para su respectivo análisis siguiendo el protocolo de monitoreo vigente de aguas superficiales según la Norma Técnica Peruana NTP ISO5667 – Parte 14:2009 y NTP ISO5667- Parte 3:2001.

TABLA 1

COORDENADAS DE LAS ESTACIONES DE MONITOREO			
PUNTOS	ESTE	NORTE	ELEVACION
Estación (P1)	763869.824	9252189.679	3655.03
Estación (P2)	763692.145	9252350.837	3710.52

B. Caracterización de la muestra

Se tuvo en cuenta los parámetros como el pH, la conductividad y un análisis de metales totales. En la Tabla 2 se indican los metales, así como también las concentraciones iniciales que sobrepasan los LMP (Límites Máximos Permisibles). Por otro lado, se requirió del Laboratorio Regional del Agua de la región Cajamarca para obtener los resultados correspondientes, cuyos análisis se llevaron a cabo a través de absorción atómica.

TABLA 2

CONCENTRACIÓN INICIAL DE METALES TOTALES EN AMBAS ESTACIONES

Metales	P1 (mg/L)	P2 (mg/L)
Arsénico (As)	0.367	0.020
Cobre (Cu)	0.379	0.081
Cadmio (Cd)	0.372	0.140
Hierro (Fe)	122.3	14.89
Plomo (Pb)	0.110	0.202
Zinc (Zn)	69.00	37.25



Fig. 1. Pasivo ambiental de Hualgayoc (P1 y P2 respectivamente) con presencia de drenaje ácido de mina (DAM).

C. Dosificación de la dolomita

Se empleó 0.5kg de dolomita que fue adquirida de la empresa INSUMEX con sus respectivas especificaciones como se detalla en la Tabla 3. Además, el tipo de diseño experimental es completamente aleatorizado, con arreglo factorial 2x3, considerando 2 puntos de monitoreo (P1 y P2) y 3 tratamientos: 10, 20 y 30g de dolomita para cada punto (Tabla 4).

TABLA 3
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA DOLOMITA UTILIZADA

Descripción	Unidad	Típico
Humedad	%	< 5,00
CaO	%	30,290
MgO	%	21,500
Na	%	0,310
Fe	%	0,068
K ₂ O	%	0,050

TABLA 4
DISEÑO EXPERIMENTAL DE TRATAMIENTO

Nº	Disolución	Descripción
1	P1+10gD	500 mL de agua de P1 + 10 gramos de dolomita
2	P1+20gD	500 mL de agua de P1 + 20 gramos de dolomita
3	P1+30gD	500 mL de agua de P1 + 30 gramos de dolomita
4	P2+10gD	500 mL de agua de P2 + 10 gramos de dolomita
5	P2+20gD	500 mL de agua de P2 + 20 gramos de dolomita
6	P2+30gD	500 mL de agua de P2 + 30 gramos de dolomita

D. Procedimiento del tratamiento a escala de laboratorio

Se procedió a medir en un matraz la cantidad de 500mL del P1 para luego vaciar en un vaso de precipitado, por otro lado, se pesaron las cantidades de 10, 20 y 30 gramos de dolomita con la ayuda de la balanza analítica para posteriormente ser agregado y disuelto en el vaso de precipitado, este procedimiento se repite para el P2. Cada uno de los 6 tratamientos fueron colocados en el agitador magnético por un periodo de 30 minutos a una velocidad constante de 700 rpm y a temperatura ambiente. Luego de terminada la agitación se dejó en reposo durante 6 horas para sedimentar los metales totales o sólidos suspendidos y neutralizar el pH. Finalmente se cuantificó las concentraciones finales de los metales en el Laboratorio Regional del Agua.

E. Cálculo de remoción de metales

Para determinar la eficiencia de remoción se aplicó la ecuación 1 (Ec. 1) de remoción de metales por diferencia de concentraciones:

$$PR = \frac{DAM_{i\text{ inicial}} - DAM_{t\text{ tratado}}}{DAM_{i\text{ inicial}}} \times 100\% \dots\dots\dots Ec. 1$$

DAM_{i inicial}

PR: Porcentaje de remoción. (%)
DAM inicial: Concentración inicial del DAM. (mg/L)

DAM tratado: Concentración final del DAM. (mg/L)

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Resultados de pH

Los resultados presentados del análisis de pH en cada estación de muestreo demuestran que el efecto de la dolomita en diferentes proporciones trabaja de manera efectiva logrando un pH dentro de los LMP. Además, se observa en la Fig. 3 que el pH inicial del P2 es de 7.02 ya que durante el muestreo esta agua se encontraba menos turbia que en el P1. La neutralización se produce por las propiedades fisicoquímicas de adsorción que posee la dolomita (CaMg(CO₃)₂), reduciendo la concentración

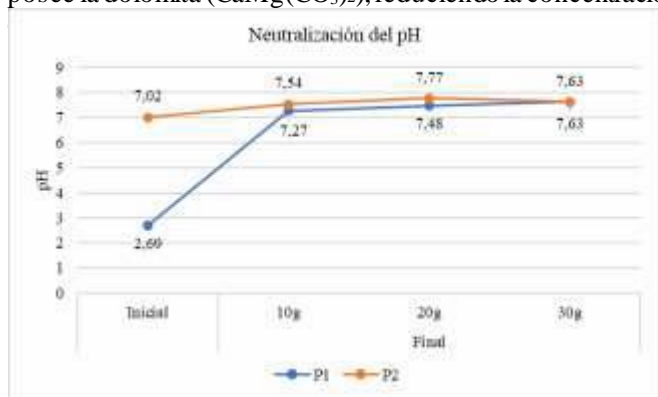


Fig. 3. Variación de pH según el tratamiento de drenaje ácido de mina

B. Resultados de Remoción de metales

Los resultados de la concentración inicial de metales se detallan en la Tabla 2, mientras que la concentración de metales posterior a los tratamientos, en la Tabla 5. Además, debido a que algunos datos que arrojó el laboratorio se encontraban por debajo del Límite Cuantificable del Método (LCM) se tomó este límite como referencia para la determinación de la eficiencia de remoción de los metales (Tabla 6), ya que son concentraciones casi inexistentes que no son percibidos por el método.

TABLA 5
CONCENTRACIÓN DE METALES PROMEDIO POSTERIOR AL TRATAMIENTO

Met.	Und.	LCM	P1			P2		
			10g Dol	20g Dol	30g Dol	10g Dol	20g Dol	30g Dol
As	mg/L	0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	<0,005	0,008
Cu	mg/L	0,018	<0,018	<0,018	<0,018	<0,018	<0,018	<0,018
Cd	mg/L	0,002	0,035	0,014	0,006	0,011	0,005	0,003
Fe	mg/L	0,023	0,194	0,107	0,155	0,073	0,065	0,045
Pb	mg/L	0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004	<0,004
Zn	mg/L	0,018	19,68	15,57	10,59	10,38	5,550	2,894

TABLA 6
PORCENTAJE DE REMOCIÓN DE CADA METAL EN CADA TRATAMIENTO

Metales	Unid.	P1			P2		
		10g Dol	20g Dol	30g Dol	10g Dol	20g Dol	30g Dol
As	%	98,64	98,64	98,64	75,00	75,00	60,00
Cu	%	95,25	95,25	95,25	77,78	77,78	77,78
Cd	%	90,59	96,24	98,39	92,14	96,43	97,86
Fe	%	99,84	99,91	99,87	99,51	99,56	99,70
Pb	%	96,40	96,40	96,40	98,02	98,02	98,02
Zn	%	71,48	77,43	84,65	72,13	85,10	92,23

TABLA 7
PROMEDIO Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR DE LA EFICIENCIA DE REMOCIÓN

Metales	P1		P2	
	Promedio	Desv. Estándar	Promedio	Desv. Estándar
Arsénico	98,64%	± 0%	70%	± 8,66%
Cobre	95,25%	± 0%	77,78%	± 0%
Cadmio	95,07%	± 4,03%	95,48%	± 2,98%
Hierro	99,87%	± 0,04%	99,59%	± 0,1%
Plomo	96,4%	± 0%	98,02%	± 0%
Zinc	77,85%	± 6,6%	83,15%	± 10,19%

Asimismo, se presenta la desviación estándar de las medidas en la tabla 7, para los dos puntos de muestreo. De los resultados obtenidos se puede afirmar lo expuesto por Romero et. al., [10], quien menciona que la dolomita es efectiva como neutralizante y es un adsorbente de cobre, eliminando arseniatos y antimoniatos, así como con otros iones en efluentes metalúrgicos de flotación y lixiviación. Sin embargo, la presente investigación se desarrolló en dos puntos del pasivo ambiental de Hualgayoc, esto no influyó de manera negativa para lograr una alta eficiencia en la neutralización de pH, pues se alcanzó una remoción de cobre sobre 95% para el P1 y debajo del 80% para el P2, en el caso del arsénico se obtuvo un valor de remoción sobre 95% para el P1 y para el P2 por debajo del 80%. La Fig. 4 muestra la reducción de la concentración de Arsénico por debajo de los Límites Cuantificables del Método.

a) *Arsénico*

Como se observa en la Fig. 4, el arsénico se logró remover por debajo de los LCM del Laboratorio Regional del Agua, si embargo se tomaron estos límites como referencia para analizar su eficiencia. La dolomita con fórmula química $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ actúa neutralizando el pH, esto provoca la adsorción y precipitación de iones metálicos, como el arsénico que puede precipitar a Arseniato de Calcio.

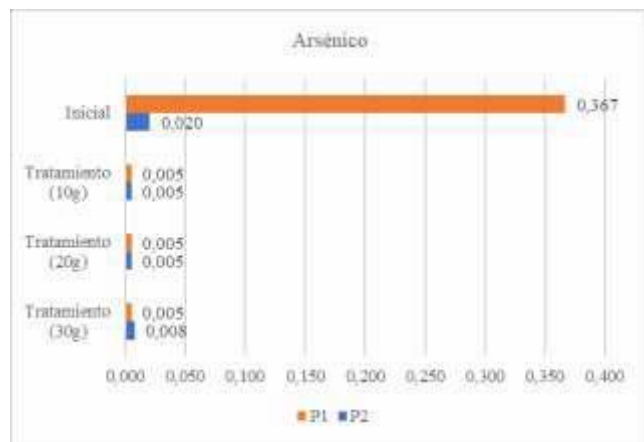


Fig. 4. Remoción de Arsénico

b) *Cobre*

En este metal los resultados demuestran que se logró remover más del 95% de los iones disueltos en el P1, pues según los resultados de laboratorio, la concentración final está por debajo de los Límites Cuantificables del Método (0.018) como se muestra en la Fig. 5, tomando este dato como referencia para analizar su eficiencia. Por otro lado, este valor supera al obtenido por Romero et. al. [10], donde se obtuvo una remoción de cobre de 94.74% en efluentes de la industria minera; además, se afirma que el Cu y otros metales precipitan como carbonatos cuando el pH se incrementa, convirtiendo iones de Cu^{+2} a Cu^0 .

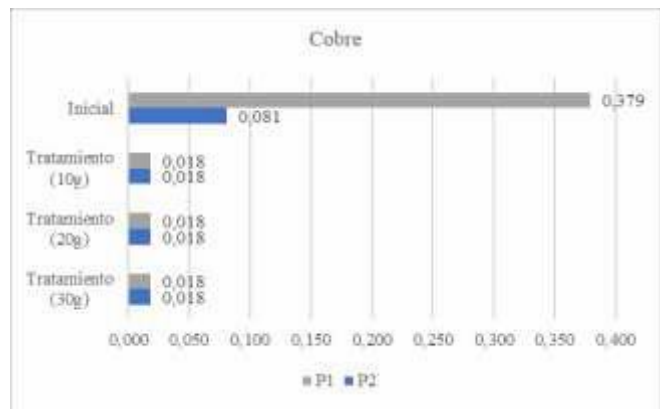


Fig. 5. Remoción de Cobre

c) *Cadmio*

El mejor resultado fue obtenido con el tercer tratamiento. Las pruebas experimentales para el Cd parten de un dato inicial de 0.372 mg/L en el P1 (Fig. 6) y en el tercer tratamiento logra llegar a 0.006 mg/L, alcanzando un porcentaje de remoción de 98.39% y para el P2 el dato inicial es 0.140 mg/L de Cd llegando a 0.003 mg/L con una remoción de 97.86%. Asimismo, Berrospi, A. [9] obtuvo la mejor remoción de Cadmio con 25g de Dolomita, obteniendo una eficiencia de 97.45%, quedando por debajo del valor obtenido en el presente estudio. Por otro lado, la Dolomita frente al Cd actúa adsorbiendo el Cd a su estructura cuando el pH asciende.

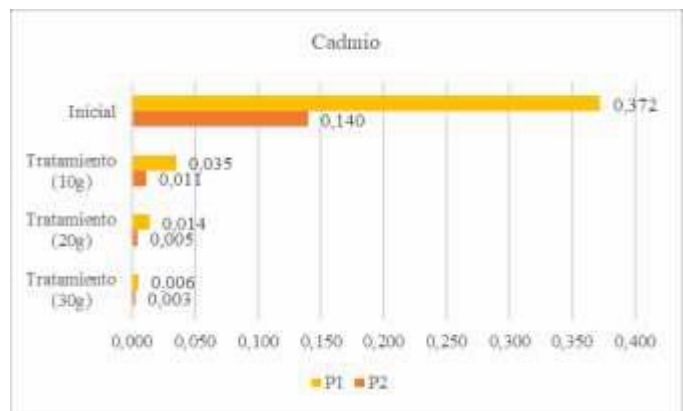


Fig. 6. Remoción de Cadmio

d) *Hierro*

El mejor resultado el P1 fue obtenido con el segundo tratamiento, las pruebas experimentales para el Hierro parten de un dato inicial de 122.3 mg/L (fig. 7) y en el segundo tratamiento con dolomita logra llegar a 0.107 mg/L, logrando un porcentaje de remoción de 99.91% y para el P2 el dato inicial es 14.89 mg/L de Fe llegando a 0.045 mg/L en el tercer tratamiento con una remoción de 99.70%. La eliminación de este metal se basa en la precipitación de hidróxidos que se produce por la neutralización de pH, en la que además se logra oxidar el Fe^{+2} a Fe^{+3} , para posteriormente ser sedimentado.

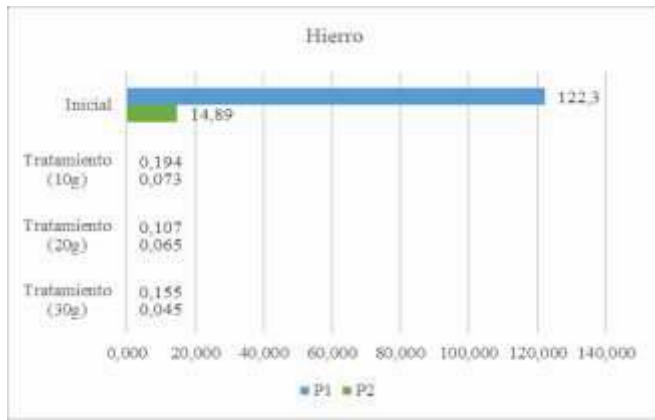


Fig. 7. Remoción de Hierro

Berros pi [9], de igual manera alcanzó una alta remoción en cobre y hierro, alcanzando cifras de remoción de 99.32% y 99.85% respectivamente, pero menor remoción en zinc (66.05%); cabe recalcar que Berros pi llevó a cabo su dosificación con 10 y 25g de dolomita, mientras que para la presente investigación se emplearon tres dosificaciones diferentes de 10, 20 y 30g, lo que permitió identificar que al adicionar 5g más de dolomita muestra una mayor remoción de metales para el caso de Zn (Fig. 9), sin embargo estos valores son solo especulativas, pues podrían variar respecto a las condiciones de la muestra.

e) Plomo

En la fig. 8 se observan los resultados de la concentración final de Pb, según los resultados de laboratorio los valores se encuentran por debajo de los LCM (0.004), por lo que se toma esta cifra como referencia para su análisis, alcanzando una eficiencia de más del 95%. La investigación realizada por Basilio [4] obtuvo una remoción para plomo de 94.21%, demostrando una menor eficiencia en el resultado de metales totales; no obstante, en la neutralización de pH, el autor Basilio alcanzó un pH de 8.11, mientras que en el presente estudio se logró una cifra máxima de 7.63 de pH con 30g de dolomita en el P1 y para el P2 se obtuvo un mayor pH con 20g de Dolomita alcanzando 7.77. Cabe señalar que el incremento en la neutralización se debió por el pH inicial que tuvo un grado de acidez mayor en las muestras iniciales.

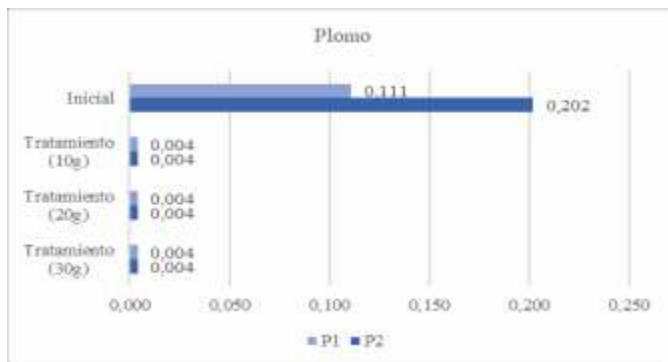


Fig. 8. Remoción de Plomo

f) Zinc

Asimismo, Ruiz [11], obtuvo una eficiencia en la remoción de 97.27% de Zn, pero con una agitación de 45 minutos, un 25% más de tiempo de agitación, en cambio en la presente investigación se obtuvo en Zn una remoción de 84.65% en el P1 y 92.23% en el P2 para el tratamiento con 30 g de dosificación de dolomita. No obstante, lo que permitió una mayor remoción de zinc para la investigación de Ruiz puede ser la influencia de un 25% más de tiempo en la agitación, ya que en la presente investigación solo se emplearon 30 minutos.

Por otro lado, al igual que para Pb, Cu y Fe, el Zinc precipita como carbonato cuando el pH se incrementa, puestos tienden a estar más disponibles en un medio ácido.

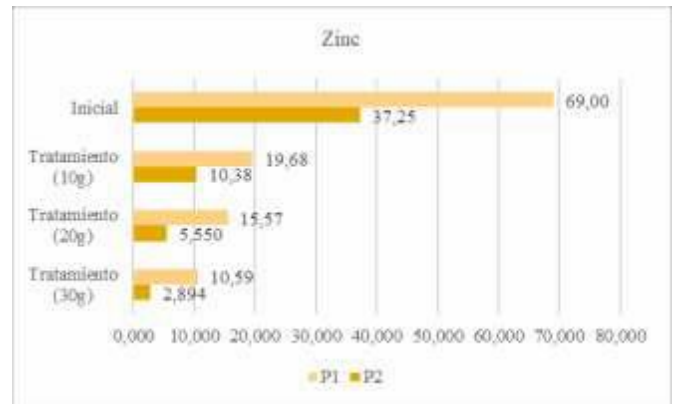


Fig. 9. Remoción de Zinc

Finalmente, se puede afirmar que la Dolomita presenta una eficiente remoción de metales pesados, por lo que se puede considerar como una tecnología alternativa al uso de la Ca1, siendo de bajo costo, fácil manejo y abundante en la corteza terrestre.

Por otro lado, respecto a una supuesta implementación a gran escala, Medina, R. [12] detalla en su investigación que la construcción de una planta de neutralización para el DAM de Paragsha, en una Gran empresa Minera como lo es Volcán utilizando Cal como agente remediante, puede requerir una inversión total de \$2'536'600.00 considerando una Planta de Cal, una planta de neutralización y clarificación, blowers de aire entre otras inversiones; pero además un costo anual de procesamiento de \$20'960'421.15 para tratar 13 627 m³/día, no obstante, es necesario impermeabilizar una cantidad de 35 millones de TM de mineral pirita para no dejarse a la intemperie ya que puede generar aún más agua ácida. La laguna en cuestión de en unos 25 millones de m³ de agua contaminada, se calcula que se trataría en 5 años con un presupuesto total de 100 millones de USD. Cabe señalar que el caudal de agua ácida del pasivo de Hualgayoc no llega a tales dimensiones, por lo que la inversión sería mucho menor. Esto podría ser posible si el estado conjuntamente con las empresas de GoldFields y Coimolache velaran por el cuidado del medio ambiente e invirtieran, pues es su responsabilidad.

IV. CONCLUSIONES

Se concluye que a través del empleo de la dolomita se reduce la concentración de metales a tal grado de quedar por debajo de los Límites Cuantificables del método (LCM), considerándose de esta manera como una tecnología alternativa al uso de la Cal, mostrando una alta eficiencia, bajo costo del suministro y fácil manejo, dando así porcentajes eficientes de remoción para los seis metales representativos en cuestión con el tratamiento de 30g de dolomita. De esta manera se obtuvo la máxima remoción de hierro, alcanzando una eficiencia de 99.87% en el P1 y 99.70% en el P2, teniendo en cuenta que este es el metal que más concentración presentó al momento del muestreo con 122.3 mg/L en el P1 y 14.89 mg/L en el P2, seguido del Zinc con 69mg/L en P1 y 37.25 en P2. Además, se alcanzó cifras de remoción de Plomo de 96.40% en el P1 y 98.02% en el P2; posteriormente Arsénico con 98.64% en el P1, pero en el P2 la cantidad fue menor al LCM. Mientras que en los demás metales como Cadmio, Cobre y Zinc alcanzaron remociones igualmente efectivas.

El agua ácida del pasivo ambiental minero de Hualgayoc tiene un pH 2.69, y una concentración metálica de As: 0.367 mg/L; Cu: 0.379 mg/L, Cd: 0.372 mg/L, Fe: 122.3 mg/L, Pb 0.202 mg/L y Zn: 69.00 mg/L representando una cantidad de agua considerable de agua que es descargada al medio ambiente sin cumplir con los LMP. Con estas características se hace urgente y necesario implementar medidas para mejorar la calidad de agua.

También se concluye, que el grado de dosificación de dolomita influye de manera directamente proporcional en la eficiencia de remoción de metales pesados; sin embargo, influye de manera inversamente proporcional en los grupos de metales ligeros, es decir, para metales como K, Ca, Mg, Ba y Na se incrementan las concentraciones al aplicar el tratamiento con mayor dosificación.

V. REFERENCIAS

- [1] R. Guadarrama Tejas, J. Kido Miranda, G. Roldan Antunez, and M. Salas Salgado, "Contaminación del agua," *Revista de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales*, vol. 2, pp. 1–10, 2016. Available: www.ecorfan.org/spain
- [2] O. Guillén, V. Córdor, M. Gonzales, and S. Iglesias, "Contaminación de las aguas del río Rímac: trazas de metales," *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 1, no. 2, pp. 127–145, Dec. 1998, doi: 10.15381/iigeo.v1i2.2313.
- [3] M. Chappuis, "Remediación y activación de pasivos ambientales mineros (PAM) en el Perú 168 MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO," 2019. Available: www.cepal.org/apps
- [4] J. C. Basilio Tavera, "Influencia de la acidez en la remoción de plomo (Pb2+) utilizando dolomita como adsorbente," Universidad Nacional Agraria de la Selva, Perú, 2015. Available: <http://repositorio.unas.edu.pe/handle/UNAS/1704>
- [5] E. López Pamo, O. Aduvire, and D. Baretino, "Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: estado actual y perspectivas de futuro," 2002. Available: https://www.igme.es/Boletin/2002/113_1_2002/4-ARTICULO%20TRATAMIENTOS.pdf
- [6] O. Aduvire, "DRENAJE ACIDO DE MINA," España, 2006. Available: http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- [7] W. Guillén Padilla, Pepe. Tejada, and Asociación Cultural ArteSano., *Hualgayoc : riqueza y tradición*. Cajamarca, 2018.
- [8] A. Guerra Alarcón and G. V. Hiyagon Arroyo, "Tratamiento de agua para remoción de plomo aplicando nanotecnología," Universidad Nacional de Ingeniería, Perú, 2012.
- [9] L. Y. Berrospi Alania and L. Rojas Vitor, "Remoción de metales pesados presentes en las aguas ácidas de la laguna Yanamate mediante la aplicación de la dolomita como agente remediante a escala experimental-2019," Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión, Perú, 2019. Available: <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/930>
- [10] A. Romero Baylón, S. Flores Chávez, and W. Arévalo, "Tratamiento de efluentes de la industria minera con dolomita," *Industrial Data*, vol. 13, no. 1, pp. 085–090, Jul. 2010, doi: 10.15381/idata.v13i1.6174.
- [11] J. A. Ruiz Salazar, "Tratamiento de aguas ácidas con dolomita para disminuir la concentración de Cu y Zn en efluentes de la planta concentradora victoria en la Provincia de Yauli– La Oroya," Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, 2018. Available: <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5369>
- [12] R. J. MEDINA QUISPE, "Diseño y operatividad de la planta de neutralización de aguas ácidas de Mina Paragsha Cerro de Pasco en Minera Volcan S.A.A.," Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 2018. Available: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/5907>

ANEXO

ANEXO 1. RESULTADOS DEL LABORATORIO PROMEDIO DE CADA TRATAMIENTO PARA METALES



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-D CON REGISTRO N° LE-084



ENSAYOS			QUÍMICOS					
Código de la Muestra			P1	P2	P1-01 ppm	P1-02 ppm	P1-03 ppm	P1-04 ppm
Código Laboratorio	80194-01		80194-01	80194-01	80194-01	80194-01	80194-01	80194-01
Matriz	Natural		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Descripción	No		No	No	No	No	No	No
Localización de la Muestra	Mueja		Mueja	Mueja	Mueja	Mueja	Mueja	Mueja
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados de Metales Totales					
Pata (Ag)	mg/L	0.010	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Aluminio (Al)	mg/L	0.020	3.305	0.010	0.113	0.112	0.076	0.133
Arsénico (As)	mg/L	0.020	0.367	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Boro (B)	mg/L	0.020	0.062	<LCM	0.033	<LCM	0.036	0.038
Bario (Ba)	mg/L	0.040	0.019	0.012	0.055	0.036	0.041	0.041
Berilio (Be)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Bromo (Br)	mg/L	0.040	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Cadmio (Cd)	mg/L	0.020	109.7	200.3	207.7	320.2	488.4	399.7
Calcio (Ca)	mg/L	0.020	0.372	0.140	0.020	0.011	0.014	0.002
Cobalto (Co)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Cromo (Cr)	mg/L	0.020	0.067	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Cobre (Cu)	mg/L	0.040	0.379	0.081	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Hierro (Fe)	mg/L	0.020	123.3	18.89	0.194	0.073	0.107	0.062
Plata (K)	mg/L	0.020	0.674	0.068	2.066	2.260	3.064	4.018
Litio (Li)	mg/L	0.020	0.013	0.012	0.020	0.017	0.020	0.021
Magnesio (Mg)	mg/L	0.020	18.21	15.62	34.10	22.50	35.33	26.59
Manganeso (Mn)	mg/L	0.020	58.65	37.12	44.83	38.88	38.45	23.46
Níquel (Ni)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Sodio (Na)	mg/L	0.020	2.026	1.133	43.03	40.77	77.07	82.59
Níquel (Ni)	mg/L	0.040	0.027	0.010	0.016	0.006	0.004	0.006
Fósforo (P)	mg/L	0.040	0.395	0.093	<LCM	0.025	0.025	0.028
Plomo (Pb)	mg/L	0.040	0.111	0.202	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Zinc (Zn)	mg/L	0.040	318.9	264.2	349.2	365.5	362.3	304.9
Antimonio (Sb)	mg/L	0.020	0.012	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Selenio (Se)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Silicio (Si)	mg/L	0.040	0.362	2.577	3.988	1.884	3.871	1.864
Estroncio (Sr)	mg/L	0.020	0.269	0.037	0.027	0.223	0.781	0.037
Talio (Tl)	mg/L	0.040	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Teluro (Te)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Vanadio (V)	mg/L	0.040	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Yodo (I)	mg/L	0.040	69.00	37.20	19.00	10.30	15.57	0.500
Cerio	mg/L	0.040	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Estaño (Sn)	mg/L	0.020	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Mercurio (Hg)	mg/L	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM

INFORME DE ENSAYO N° IE 0521345

Fuente: Laboratorio Regional del Agua, 2021

ANEXO 2. RESULTADOS DEL LABORATORIO CADA TRATAMIENTO PARA pH



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACIÓN INACAL-D CON REGISTRO N° LE-084



INFORME DE ENSAYO N° IE 0521345

ENSAYOS			FÍSICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			P1	P2	P1-01 ppm	P1-02 ppm	P1-03 ppm	P1-04 ppm
Código Laboratorio	80194-01		80194-01	80194-01	80194-01	80194-01	80194-01	80194-01
Matriz	Natural		Natural	Natural	Natural	Natural	Natural	Natural
Descripción	No		No	No	No	No	No	No
Localización de la Muestra	Mueja		Mueja	Mueja	Mueja	Mueja	Mueja	Mueja
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
pH a 20°C	pH	NA	7.69	7.82	7.27	7.54	7.48	7.77
Conductividad a 20°C	µS/cm	NA	249.0	190.0	249.0	293.0	266.0	240.0

ENSAYOS			FÍSICOQUÍMICOS					
Código de la Muestra			P1-01 ppm	P2-01 ppm	-	-	-	-
Código Laboratorio	80194-01		80194-01	-	-	-	-	-
Matriz	Natural		Natural	-	-	-	-	-
Descripción	No		No	-	-	-	-	-
Localización de la Muestra	Mueja		Mueja	-	-	-	-	-
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados					
pH a 20°C	pH	NA	7.63	7.83	-	-	-	-
Conductividad a 20°C	µS/cm	NA	2270.0	2640.0	-	-	-	-

NOTAS FINALES

(*) Los resultados obtenidos corresponden a métodos y reactivos que no han sido homologados por el INACAL-D.

(†) Los resultados son preliminares, no cumplen los requisitos de volumen, tiempo, preservación o conservación refrigerada por el método, por lo tanto no se requieren dentro del alcance de acreditación.

(‡) Los resultados obtenidos en este informe corresponden a las muestras recibidas y sometidas a ensayo o análisis o realizadas en campo por el Laboratorio Regional del Agua. Cuando la copia de muestra o muestra al momento de los resultados, agotar 2 (dos) muestras como con método.

(§) La reproducción parcial de este informe no está permitida sin la autorización por escrito del Laboratorio Regional del Agua. Este informe no será válido si presenta alteraciones o emendas.

(¶) Las muestras sobre las que se realizan los ensayos se conservan en Laboratorio Regional del Agua de acuerdo al tiempo de preservación que indica el método de ensayo y por un tiempo máximo de 10 días luego de la emisión de la informe de ensayo, luego serán eliminadas salvo pedido expreso del cliente.

(‡) Este documento es un archivo en formato de acreditación. No es necesario darle el sello de la acreditación otorgada por INACAL-DA.

(*) De presente el uso de símbolos de acreditación o la declaración de condiciones de acreditación emitido en este informe, por parte del cliente.

INFORME DE ENSAYO N° IE 0521345

Cajamarca, 27 de mayo de 2021

Fuente: Laboratorio Regional del Agua, 2021