

Evaluation of the Limestone Anoxic Drain, as a complementary technique to the closure of the BQH5 Bocamina of Colquirrumi.

Evaluación del Drenaje Anóxico Calizo, como técnica complementaria al cierre de la Bocamina BQH5 de Colquirrumi.

Ing. Jiménez Bermejo, Pedro Jesús¹; Ing. Llanos Rimarachín, José Fernando² y Msc. Sánchez Espinoza, Deicy Noemi³.
jimenezbermejopedro@gmail.com, rimarachinjose@gmail.com, deicysanchez@gmail.com;
Universidad Privada del Norte, Cajamarca – Perú

Abstract - This investigation was carried out in Bocamina 5 of Quebrada Honda (BQH5) of Colquirrumi Mining Company (CMC), district of Hualgayoc in the Cajamarca region. This underground mining work was closed with an airtight plug; however, to date due to the type of fractured rock it continues with leaks of acidic water that do not comply with the Maximum Permitted Limits (LMP) required by Peruvian legislation. The objective of this work was to evaluate if with the application of the Limestone Anoxic Drains (DAC), 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 2 anoxic limestone drainage systems were designed, to which were added reactive barriers (sea shells, organic matter and sawdust). There were a total of 6 treatments with 6 replications each, the best results were obtained with the Z treatment (large drainage with barriers) of dimensions 1.60 cm long, 40 cm wide and 15 cm high, with a bed of limestone and 10 cm barriers. The design has been made based on the metallic content of Iron with the method provided by the mining office of the Department of the Interior of the United States (USBM, 1994). In this drainage, it was possible to reduce the Al by 97%, 98%, the Cd by 99%, the Cu by 99%, Fe by 99.5% and Zn by 98% and increase the pH to neutral values. The implementation and operation of this system in the field would represent a socially acceptable and viable solution.

Resumen - Esta investigación se realizó en la Bocamina 5 de Quebrada Honda (BQH5) de Compañía Minera Colquirrumi (CMC), distrito de Hualgayoc en la región Cajamarca. Esta bocamina tuvo un cierre con tapón hermético, sin embargo, a la fecha por el tipo de roca fracturada continua con filtraciones de agua ácida que no cumplen con los Límite Máximos Permisibles (LMP) exigidos por la legislación peruana. El objetivo de este trabajo fue evaluar si con la aplicación de Drenaje Anóxico Calizo (DAC), es posible neutralizar el pH y precipitar los metales presentes en las aguas ácidas, de manera que cumplan con los LMP; para lo cual se diseñan 2 sistemas drenajes anóxicos calizos a los cuales se les agregó barreras reactivas (Conchas de Mar, Materia orgánica, y Aserrín). Se tuvieron un total de 6 tratamientos con 6 réplicas por cada uno, los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento Z (Drenaje grande con barreras) de dimensiones 1.60 cm de largo, 40 cm de ancho y 15 cm de alto, con una cama de calizas y barreras de 10 cm. El diseño ha sido realizado en base al contenido metálico de Hierro con el método proporcionado por la oficina de minas del departamento del interior de los Estados Unidos (USBM, 1994). En este drenaje se logró reducir el Al en un 97%, As en un 98%, Cd en 99%, Cu en 99%, Fe 99.5 % y Zn en 98% y aumentar el pH hasta alcanzar los valores neutros. La implementación y funcionamiento de este sistema en campo representaría una solución socialmente aceptable y viable.

Digital Object Identifier: <http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2021.1.1.264>
ISBN: 978-958-52071-8-9 ISSN: 2414-6390
DO NOT REMOVE

Evaluation of the Limestone Anoxic Drain, as a complementary technique to the closure of the BQH5 Bocamina of Colquirrumi.

Evaluación del Drenaje Anóxico Calizo, como técnica complementaria al cierre de la Bocamina BQH5 de Colquirrumi.

Ing. Jiménez Bermejo, Pedro Jesús¹; Ing. Llanos Rimarachín, José Fernando² y Msc. Sánchez Espinoza, Deicy Noemi³.
jimenezbermejopedro@gmail.com, rimarachinjose@gmail.com, deicysanchez@gmail.com;
Universidad Privada del Norte, Cajamarca – Perú

Abstract - This investigation was carried out in Bocamina 5 of Quebrada Honda (BQH5) of Colquirrumi Mining Company (CMC), district of Hualgayoc in the Cajamarca region. This underground mining work was closed with an airtight plug; however, to date due to the type of fractured rock it continues with leaks of acidic water that do not comply with the Maximum Permitted Limits (LMP) required by Peruvian legislation. The objective of this work was to evaluate if with the application of the Limestone Anoxic Drains (DAC), 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 2 anoxic limestone drainage systems were designed, to which were added reactive barriers (sea shells, organic matter and sawdust). There were a total of 6 treatments with 6 replications each, the best results were obtained with the Z treatment (large drainage with barriers) of dimensions 1.60 cm long, 40 cm wide and 15 cm high, with a bed of limestone and 10 cm barriers. The design has been made based on the metallic content of Iron with the method provided by the mining office of the Department of the Interior of the United States (USBM, 1994). In this drainage, it was possible to reduce the Al by 97%, 98%, the Cd by 99%, the Cu by 99%, Fe by 99.5% and Zn by 98% and increase the pH to neutral values. The implementation and operation of this system in the field would represent a socially acceptable and viable solution.

Resumen - Esta investigación se realizó en la Bocamina 5 de Quebrada Honda (BQH5) de Compañía Minera Colquirrumi (CMC), distrito de Hualgayoc en la región Cajamarca. Esta bocamina tuvo un cierre con tapón hermético, sin embargo, a la fecha por el tipo de roca fracturada continua con filtraciones de agua ácida que no cumplen con los Límite Máximos Permisibles (LMP) exigidos por la legislación peruana. El objetivo de este trabajo fue evaluar si con la aplicación de Drenaje Anóxico Calizo (DAC), es posible neutralizar el pH y precipitar los metales presentes en las aguas ácidas, de manera que cumplan con los LMP; para lo cual se diseñan 2 sistemas drenajes anóxicos calizos a los cuales se les agregó barreras reactivas (Conchas de Mar, Materia orgánica, y Aserrín). Se tuvieron un total de 6 tratamientos con 6 réplicas por cada uno, los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento Z (Drenaje grande con barreras) de dimensiones 1.60 cm de largo, 40 cm de ancho y 15 cm de alto, con una cama de calizas y barreras de 10 cm. El diseño ha sido realizado en base al contenido metálico de Hierro con el método proporcionado por la oficina de minas del departamento del interior de los Estados Unidos (USBM, 1994). En este drenaje se logró reducir el Al en un 97%, As en un 98%, Cd en 99%, Cu en 99%, Fe 99.5 % y Zn en 98% y aumentar el pH hasta alcanzar los valores neutros. La implementación y funcionamiento de este sistema en campo representaría una solución socialmente aceptable y viable.

I. INTRODUCCIÓN

Los drenajes ácidos de mina son aquellos que tienen pH menores a 4, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido en sulfatos y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.); por tanto, son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces, y pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones (López et al. 2002). La generación del drenaje ácido de mina (DAM) es un problema común en los yacimientos polimetálicos peruanos que requiere de especial atención en áreas donde existe mineralización sulfurosa no protegida. Este problema puede persistir durante décadas de incluso cientos de años, una vez finalizado el ciclo productivo, el (DAM) debe tratarse para neutralizarlo, eliminar los metales de la solución y poder reutilizar el agua o enviarla nuevamente al ambiente natural. (White, 1968). Para hacer frente a la problemática que representa el agua ácida, existen los tratamientos activos y pasivos; de los cuales los pasivos son los más fáciles de manejar y a su vez tienen un costo menor; éstos se basan en agentes calcáreos, organismos vivos, sistemas de filtros entre otros. Un factor muy importante es el área con la que se cuenta en campo, ya que es determinante para establecer un diseño viable que se adapte a las condiciones in situ; dentro de estos tratamientos tenemos: drenajes anóxicos de caliza, canales abiertos de caliza, humedales construidos, barreras reactivas permeables; donde el objetivo principal es la supresión de la acidez, la precipitación de los metales pesados y la eliminación de sustancias contaminantes como los sólidos en suspensión, antimoniatos, arseniatos y otros. (Aduvire, 2006). Esta investigación se enfoca en el tratamiento pasivo de tipo Drenaje Anóxico Calizo (DAC), los cuales consisten en una zanja rellena con gravas de caliza u otro material calcáreo sellada a techo por una capa de tierra arcillosa y una geo membrana impermeable para mantener unas condiciones anóxicas es decir sin contacto de Oxígeno, el agua ácida se hace circular por el interior provocando la disolución de la caliza, lo que genera alcalinidad y eleva el pH del agua. (Hedin, 1997; Skousen et al., 1994). Como se menciona anteriormente, en base al DAC se realizaron 2 diseños a nivel de laboratorio, en los cuales se establece 6 tratamientos con 6 réplicas. Estos tratamientos consisten en 2 etapas, la primera etapa es netamente con piedra caliza triturada y la segunda etapa con implementación de barreras de reactivas, en específico tres, con material de Conchas de mar, materia

orgánica y viruta de madera. De todos los tratamientos diseñados se escoge solo uno, que es el tratamiento Z (Drenaje Anóxico Calizo con barreras reactivas – Maqueta grande), éste es el que ha logrado cumplir con los LMP y también logra aumentar el pH de las aguas ácidas. El caudal 45 L/min se calculó en campo con el método de aforo volumétrico, el cual sirve para el diseño a escala real, en pruebas experimentales se trabajó con un caudal de 0.48 L/min éste determinado en función a las dimensiones de las maquetas establecidas para Laboratorio.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Ubicación del área de estudio.

Bocamina 05 de Quebrada Honda de Compañía Minera Colquirrumi, en la provincia de Hualgayoc-Cajamarca (Perú) con coordenadas UTM N 9: 251 883 y E: 765 800.

B. Materiales

TABLA 1. MATERIALES UTILIZADOS

Materiales	Cantidad (kg)	Observaciones
Piedra Caliza	38.700	69% de CaCO ₃
Materia Orgánica	3.120	Por cada barrera
Aserrín	1.200	Por cada barrera
Conchas de Mar	2.450	Por cada barrera

C. Métodos de Diseño

- Cálculo de Área Según USBM

La oficina de minas del departamento del interior de los Estados Unidos (USBM, 1994), determina el área mínima de un tratamiento pasivo utilizando la carga metálica del Hierro y la eliminación del mismo. Del Análisis ICP inicial realizado a las aguas ácidas de BQH5, se determinó la carga metálica del Fe; contando con el caudal medido en campo se realiza el cálculo para 24 horas conformantes de un día y se determina la carga metálica del Fe por día, esta sirve para determinar el área mínima de tratamiento para la remoción del mismo, la cual se puede efectuar su cálculo con la siguiente ecuación:

$$\text{Área Mínima(m}^2\text{)} = \frac{\text{Carga Metálica de Fe(g * día)}}{20\text{gm}^{-2} * \text{día}} \dots (1)$$

$$\text{Área Mínima(m}^2\text{)} = \frac{56765.06 \text{ Fe(g * día)}}{20 \text{ g m}^{-2} * \text{día}} \dots (2)$$

$$\text{Área Mínima(m}^2\text{)} = 2838.2 \text{ m}^2$$

El dato de 2838.06 m² ha sido calculado para dimensiones de campo con un caudal de 45 L/m, sin embargo para el desarrollo experimental se extrapolan los datos obteniendo un caudal de 0.01 L/m y con la ecuación (1) se puede establecer que la dimensión a escala de laboratorio resulta en un área de 0.63 m². Esta primera dimensión es trabajada en base a la mención de carga metálica del Fe establecida por USBM.

- Pearson y McDonnell (1974)

Este método toma en cuenta el factor de multiplicidad partiendo de los datos establecidos por los autores hasta aproximar a caudal que se tiene en campo 11.5 Gpm (45 L/min), según los cuales; para un flujo de 100 Gpm (Galones por minuto) se establece una longitud de 67 ft, un ancho de 10 ft y una profundidad de caliza de 3 ft estándar. Entonces podemos aproximar el área con este método, extrapolando los datos que pueden tomarse como el promedio del caudal definido entre 10-20 Gpm. Aquí resulto un diseño en un área a escala de laboratorio con 0.342 m de ancho con 0.95 de longitud.

TABLA 2. PARÁMETROS DE DISEÑO

Caudal	Longitud Del Canal (Ft)	
	1 hr	3 hr
Gpm		
100	67	201
200	134	401
300	201	602
400	267	802
500	334	1003
20	4.1875	12.5625
10	2.09375	6.28125

D. Diseño Experimental

Se diseñaron Drenajes Anóxicos Calizos con una etapa inicial sin barreras y para aumentar la eficiencia de éstas también se diseñaron los drenajes con barreras reactivas con el fin de aumentar el pH y disminuir la concentración metálica. Estos diseños a nivel de laboratorio son los que albergan por un determinado tiempo de reacción a las aguas ácidas, se realiza el control de pH antes, durante y después de dicho tiempo; así mismo de cada tratamiento se recolectan las muestras de que son analizadas en laboratorio, para determinar las concentraciones de los diversos metales. Las concentraciones antes y después de aplicación del tratamiento nos hacen saber la efectividad que representa cada uno de ellos, es así que podemos discernir entre uno y otro.

TABLA 3. DISEÑO PARA TRATAMIENTOS EXPERIMENTALES

ÍTEM	DESCRIPCIÓN
ST	Agua sin Tratar.
V	Drenaje Pequeño con Caliza
W	Drenaje Grande con Caliza.
X	Drenaje Pequeño, con Conchas de Mar.
Y	Drenaje Pequeño con Barreras.
Z	Drenaje Grande con Barreras.

E. Análisis Químico

El análisis por Inductively Coupled Plasma (ICP) se realizó en el Laboratorio Químico de CIA. Minera Coimolache S.A. Se enviaron un total de 36 muestras de agua acida preservada con ácido nítrico, en frascos de 1000 ml con sus respectivas

etiquetas de acuerdo al tratamiento efectuado. Se recibió el apoyo del mismo laboratorio para el análisis de las muestras tras la aplicación de los tratamientos.

F. Análisis estadístico.

Para el análisis estadístico Todos los datos fueron analizados usando el software Minitab versión 17. Se utilizó ANOVA (Anova One Way) y los resultados fueron reportados para un valor $P < 0.05$. Las medias fueron comparadas usando el test de significancia LSD Fisher ($P < 0.05$). Este análisis es comparado con los Límites Máximos Permisibles definidos por Ministerio del Ambiente (MINAM), que nos sirven para poder ver y comprobar la efectividad de cada tratamiento.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

- Caracterización del Agua ácida.

El agua de la bocamina 05 de quebrada honda, tiene un caudal de 45 L/min, presenta un color rojo anaranjado, un pH de 3.01, una conductividad eléctrica de 1500 $\mu\text{S/m}$ y Oxígeno disuelto 4.5. Estos resultados indican gran presencia de oxidación debido a las condiciones aerobias que presenta la BQH5, los sulfuros al hacer contacto con el agua y el oxígeno han generado elevado contenido de acidez, otra de las posibles respuestas a oxidación es la presencia de agentes bacterianos como son las bacterias Thiobacillus Ferroxidant, las mismas que mediante un proceso de bio-transformación logran oxidar el sulfuro a sulfito y el sulfito a sulfato que se evidencia en color de verde traslucido a amarillo turbio (Pérez, 2006) Además, el análisis de metales muestra que ningún metal presente en esta muestra agua cumple con los LMP, siendo el más abundante el Fe con 876 ppm, seguido por el zinc con 74 ppm y el aluminio con 1.0 ppm.

TABLA 3. LMP VS ICP

PARÁMETRO	UNIDAD	LMP	VS	ICP
pH	Ppm	7	VS	3.01
Aluminio	Ppm	-	VS	141.03
Arsénico	Ppm	0.1	VS	6.54
Cadmio	Ppm	0.05	VS	0.38
Cobre	Ppm	0.2	VS	13.04
Hierro	Ppm	2	VS	876
Zinc	Ppm	1.5	VS	74.33

Las condiciones del agua de filtración en la bocamina 05 son indicadores altamente representativos de un drenaje ácido, ya que presenta una zona parcialmente inundada con coloraciones amarillentas que indican la oxidación de sulfuros además de un espacio amplio de entrada de oxígeno. Los sulfuros expuestos a la meteorización llegan a formar drenajes ácidos, para que esto tenga lugar son necesarias condiciones aerobias, es decir la existencia de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias. (Aduviere, 2006).

Para realizar una clasificación del agua hacemos referencia al 3.01 pH que es el potencial de hidrógeno presente en las aguas de dicha Bocamina, entonces se clasifican como aguas altamente ácidas ya que están dentro del rango [1,5-4,5] (White, 1968). Estas aguas necesitan de un tratamiento debido al contenido metálico que presentan, que son dañinos a flora y fauna, los drenajes ácidos de mina, considerados en un rango de pH de 2 a 4, contienen una gran cantidad de sólidos en suspensión y un alto contenido en sulfatos y metales disueltos (Fe, Al, Mn, Zn, Cu, Pb, etc.); por tanto, son nocivos para la actividad biológica, contaminan los cauces, y pueden llegar a dañar la estructura y la cimentación de construcciones (López et al. 2002).

Reafirmamos que la concentración metálica de las aguas ácidas es elevada, en cuanto a Hierro tenemos 876 ppm, 141.03 ppm de Al, 6.54 ppm de As, 0.38 ppm Cd, 13.04 de Cu y 74,33ppm de Zn; éstos valores sobrepasan los LMP, se concluye que las aguas de filtración en estas condiciones no pueden ser descargadas al medio ambiente.

- Potencial Hidrógeno (pH)

El tratamiento donde más se incrementó el pH fue el Z (Drenaje grande con barreras) donde el cuál se incrementó hasta en un 286% respecto al pH inicial. Seguidamente tenemos los tratamientos Y que incrementó a un pH de 8.486 y W que incrementó el pH inicial a 7.297. Estos datos se encuentran dentro del rango [6.5 – 9] que es un pH neutro.

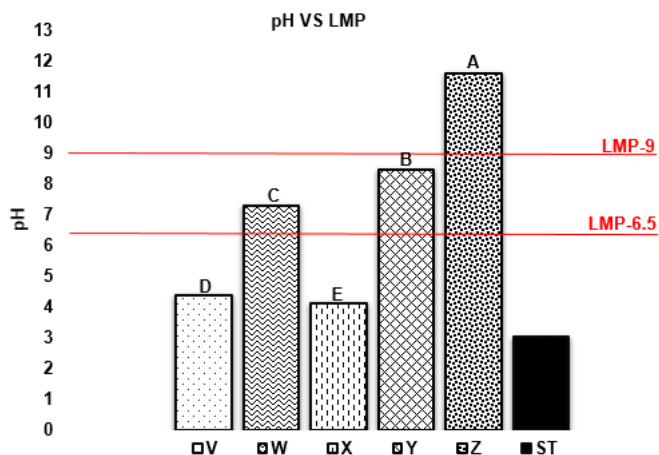


Fig. 1 Resultados de pH

Las medias de los tratamientos V, W, X, Y, Z y ST son significativamente diferentes ($P=0.00$). Cabe señalar que los Tratamientos Z y Y, exceden lo establecido por los LMP. Las pruebas experimentales para pH parten de un dato inicial de 3.01 pH sin tratamiento. Cabe mencionar que si bien este pH sobrepasa los LMP, este puede tener un efecto positivo en la precipitación de metales que no precipitan a pH neutros tal como es el caso del Al y el Mn (Del Águila, 2015). Por otro lado se explica el elevado pH debido al mayor tiempo de retención y contacto con la piedra caliza y con las barreras reactivas.

- **Aluminio (Al).**

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento **W**: **1.542 ppm**, disminuyó hasta 99% de la cantidad inicial, seguido por el tratamiento **Z**: **3.033 ppm** disminuyendo hasta 97% de la cantidad inicial.

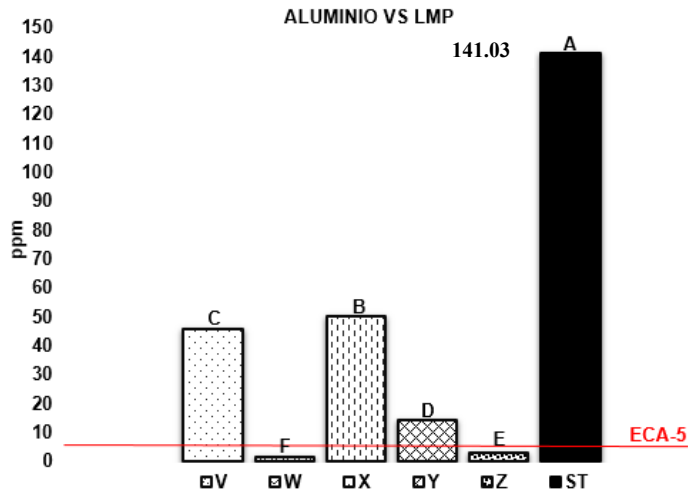


Fig. 2 Resultados de Al

Las medias de los datos son significativamente diferentes ($P=0.00$). Las pruebas experimentales para el Aluminio parten de un dato inicial de 141.034 ppm. El tratamiento W logró reducir en 99% la concentración de Al, seguido por el tratamiento Z con 97% del Al inicial, son los únicos que cumplen con el ECA establecido por el MINAM (2010). Autores como Del Águila (2015) en su investigación "Gestión de efluentes, tratamiento de aguas ácidas y precipitación de aluminio y manganeso en la planta de tratamiento de la Empresa Minera de Yanacocha" demostró que en medio básico el aluminio puede precipitar forma el ion aluminato (AlO_2^-) y que este a su vez a valores de pH entre 8 – 11. Sin embargo, otros autores señalan que el Al es estable en pH de 7 u 8, sin embargo a medida que sigue incrementando, este puede volver a ser inestable (Lii, et al; 1999). Adicionalmente podríamos decir que la efectividad para reducir el Aluminio radica en el área y tiempo de contacto de las aguas ácidas dentro de los sistemas.

- **Arsénico (As).**

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento **Z**: **0.018 ppm** (Drenaje grande con barreras), el cual es el único que logra cumplir con LMP. El único sistema que disminuyó la concentración metálica de As fue el Z (Drenaje grande con barreras) donde se logró reducir hasta en 98 % el arsénico inicial. Aunque hay diferencias entre autores acerca de la precipitación del arsénico a pH neutros (Maccur, 2001), muchas otras investigaciones (Cabrera *et al*, 2013) señalan que el ablandamiento con cal es efectivo para remover arsenito o arsenato y que esta eficiencia está en función al pH siendo que a un pH de 10.5 se puede remover hasta el 90% de As.

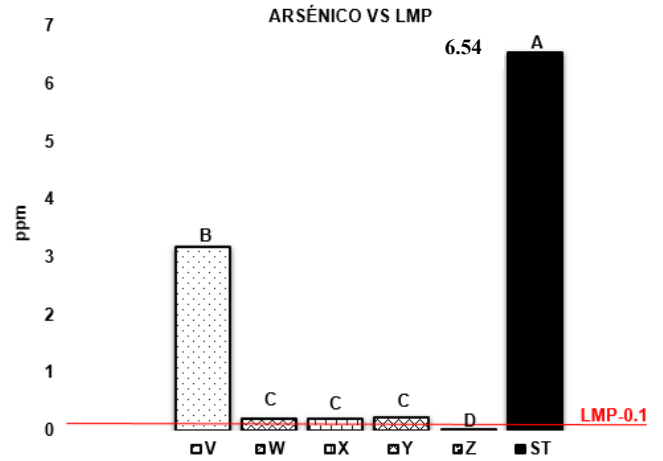


Fig. 3 Resultados de As

En nuestro caso se podría explicar una mayor remoción de arsénico, no solo por el incremento del pH sino por el efecto de las barreras de materia orgánica y de aserrín que podrían haber retenido metales debido a sus propiedades de absorción y adsorción, además de su mayor superficie, por ejemplo (Muñoz, *et al*; 2016) de muestra que el uso de aserrín logró una remoción de arsénico a pH entre 6.5 a 7 hasta en un 98.50% la cantidad de arsénico en el agua. Los otros tratamientos si bien es cierto tuvieron barreras, probablemente el nivel de pH y otros factores como el tiempo de retención no ayudó a que se puede cumplir con los LMP.

- **Cadmio (Cd).**

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento **Z**: **0.002 ppm** que disminuyó hasta el 99% del contenido inicial, siendo el único que cumplió LMP. Las medias de los datos son significativamente diferentes. Las pruebas experimentales para el Cadmio parten de un dato inicial de 0.38 ppm

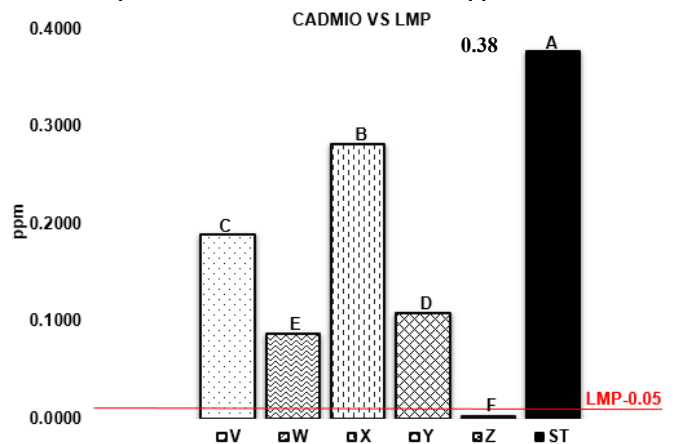


Fig. 4 Resultados de Cd

En nuestra investigación el único tratamiento que logró disminuir el cadmio a niveles que cumpla con los LMP fue el Tratamiento Z. Esto debido al pH y probablemente por la materia orgánica y el aserrín, presente en una de las barreras. Estudios como el realizado por (Silva, *et al*; 2010; Sánchez, 2015) demuestra que a mayor cantidad de materia orgánica se obtuvieron menores cantidades de cadmio.

Podemos señalar que los otros tratamientos también demostraron reducción de la concentración metálica del cadmio, sin embargo, a pesar de que disminuyeron en cantidades importantes, aun así no cumplieron con los LMP. Así por ejemplo (Lara et al; 2016) comprueba que a pH de 6-8 y con ayuda de coco, se pudo observar una remoción de 91,32 y 87,80% respectivamente para Pb y Cd después de transcurridos 4,5 h en un sistema continuo de tratamiento de aguas residuales.

- **Cobre (Cu).**

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento con el **Z: 0.056ppm** en el cual se disminuyó hasta en un 99% la cantidad de cobre, seguido por el tratamiento **Y: 0.173ppm** y **W: 0.139ppm**.

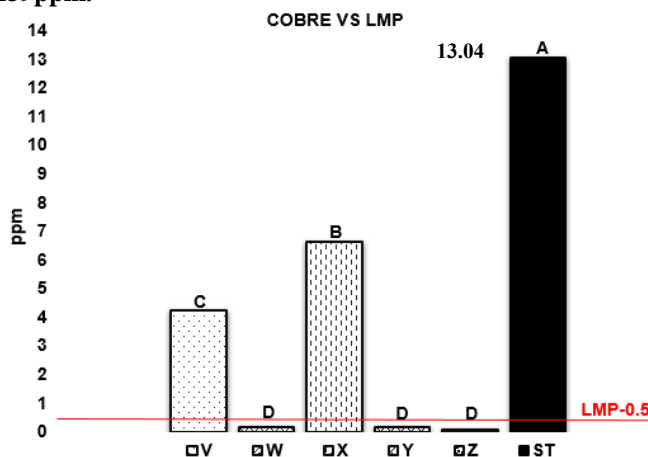


Fig. 5 Resultados Cu

Las medias de **W**, **Y** y **Z** comparten la letra D entonces no son significativamente diferentes. Las pruebas experimentales parten de 13.04ppm de Cu. Para el Cu resultaron 3 tratamientos validos los cuales fueron: **Z**, **Y** y **W**. Estos tres tratamientos también han representado los valores más altos de pH (11.6, 8.4 y 7.2 respectivamente) esto demuestra una vez más que a mayor pH existe mayor precipitación de cobre. Son muchos los estudios que han demostrado lo expuesto anteriormente, por ejemplo: Escudero *et al* (2010) demostró en su investigación titulada “Precipitación De Especies De Plomo, Cobre Y Níquel En Efluentes Contaminados” que el cobre precipita como hidróxido cúprico $Cu(OH)_2$ a pH's desde 8.5 hasta 9.5 y óxido cúprico CuO a partir de pH 8 hasta 13. Otras investigaciones como ((Lii, *et al*; 1999; Kooner, 1993; Nordstrom ,1998) demuestran que a un incremento de pH se puede precipitar y coprecipitar el Cu hasta en un 75%.

- **Hierro (Fe).**

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento con el **Z: 4.256 ppm**, el único que está por debajo de la concentración aceptada en ECA del Hierro. Las medias son significativamente diferentes. Las pruebas experimentales para el Hierro parten de un dato inicial de **876ppm**. El tratamiento Z (Drenaje grande con barreras) con **4.256 ppm**, logra reducir en 99.514 % de su concentración inicial. Cabe señalar que el LMP del hierro se evalúa como hierro disuelto, debido a las limitaciones del filtro para analizarlo como metal disuelto, se hace la comparación con el ECA III de agua. Investigaciones como la realizada por Gómez et al, 2004, demuestran un porcentaje de reducción de cobre entre un 80 y 90% al ser tratado con lechada de cal. Así mismo, “La conversión del hierro ferroso a férrico sucede rápidamente por aeración a un pH entre 7.0 a 7.5. La espontánea formación del hidróxido férrico resulta en su precipitación. La tasa de oxidación del hierro ferroso a férrico depende del valor de pH, la intensidad del sistema bicarbonatado (alcalinidad) y de la concentración de materia orgánica disuelta” (Valencia 2001).

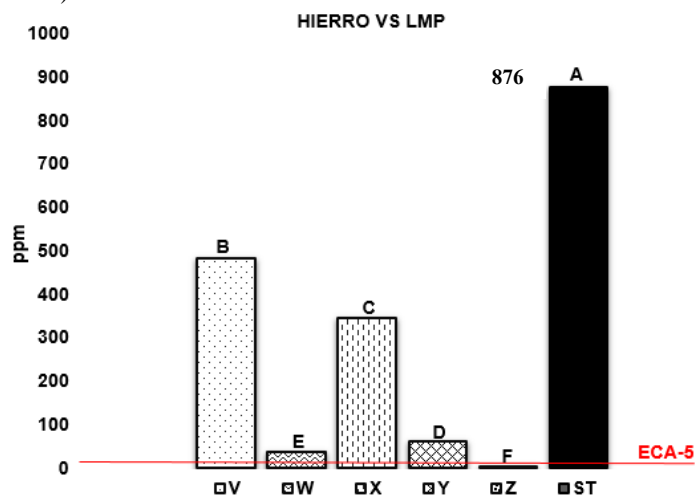


Fig. 6 Resultados Fe

- **Zinc (Zn).**

En el caso del zinc, el mejor resultado fue obtenido con el tratamiento con el Drenaje grande con barreras **Z: 1.152ppm** que reduce en 98% de la cantidad inicial. EL uso de biomasa (Materia orgánica) resulta favorable para la remoción de Zn, un estudio realizado por (Gutiérrez *et al*, 2013), indica que el mejor porcentaje de remoción de Zn (II) al 99.5% se obtuvo con un experimento conteniendo Biomasa, el mismo que trabaja con un pH=5, y un tiempo de contacto=4h lo que resultó en una capacidad de remoción fue de 9.95 mg de Zn (Gutiérrez *et al*, 2013). Con lo expuesto antes entonces concluimos que la efectividad del tratamiento **Z** estaría relacionada directamente con la barrera 2 y 3, de materia orgánica y aserrín, ya que los 2 materiales son considerados como agentes para la formación de Biomasa. En cuanto a los tratamientos restantes no cumplen con

los LMP, así que en resumen el tratamiento adecuado para este metal es el Z.

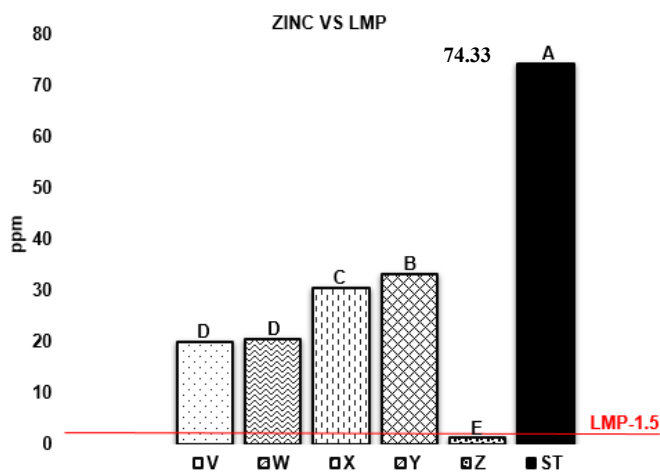


Fig. 7 Resultados de Zn

El mejor resultado fue obtenido con el tratamiento **Z: 1.152 ppm**, el único que está por debajo de la concentración aceptada en LMP del Zinc. Las medias de **W** y **V** comparten la letra **D**, entonces no son significativamente diferentes. Las pruebas experimentales parten de 74.33 ppm de Zn.

- Área para tratar el caudal de campo (45 L/min)

Teniendo en cuenta el tratamiento **Z** (Drenaje grande con barreras), se calculó el área que resulta en **59.5 m²**. Por ello se plantea hacer un sistema Drenaje Anóxico Calizo de **60 m²**. La bocamina 05 de Quebrada Honda, cuenta con un área de 23 m de largo, 1.20 de ancho desde el tapón hermético hasta el ingreso (Es necesario aprovechar este espacio). De este modo dentro de la bocamina se construiría un canal de **27.6 m²** y el restante **32.4 m²** fuera, además afuera de la bocamina se podría construir un canal incluso mucho más largo asegurando un mayor rendimiento del sistema. Estos resultados servirán a otros autores a realizar más pruebas experimentales que demuestren la efectividad de nuestro diseño, sin embargo es muy importante tomar en cuenta la carga metálica no solo del Fe sino también del Mn que es el metal que necesita más pH para precipitar. Muchos autores han diseñado sistemas tanto óxicos como anóxicos calizos para el tratamiento de efluentes mineros (Lii, *et al*; 1999; Cravota III, 1996; Trahan, 1996; Villanueva, 2013; Licapa, 2014.), pero ninguno de ellos pudo determinar cuál fue el criterio para las dimensiones. En la búsqueda de información, nos cruzamos con la investigación de Pearson y McDonnell (1974) que nos proporciona parámetros para el largo de canal y ancho de canal, además de ofrecernos un estándar para la profundidad de cama de caliza; sin embargo este no tomaba en cuenta la carga metálica de los elementos a tratar, por ello también utilizamos lo establecido por el Departamento de Minería de Los Estados Unidos

(USBM, 1994) que se basa en la carga metálica de Fe. Finalmente, podemos decir que este último método fue el que más nos ayudó en nuestro sistema, sin embargo ha sido esencial la colocación de las diferentes barreras implementadas en nuestra prueba de laboratorio.

CONCLUSIONES

- El agua ácida de la bocamina 05 de Quebrada honda cuenta con un pH 3.01, y una concentración metálica de Al: 141.03 ppm, As: 6.54 ppm, Cd: 0.38 ppm, Cu: 13.04 ppm, Fe: 876 ppm y Zn: 74.33 ppm además de un caudal de 45 L/Min lo cual representa una cantidad de agua considerable 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.
- Al realizar las pruebas experimentales a nivel de laboratorio se determinó el tratamiento **Z** (Drenaje grande con barreras) es el más adecuado para tratar las aguas de la BQH5 ya que logra cumplir con LMP establecidos para descargas de efluentes mineros, con éste tratamiento se reduce el Al en un 99%, As en un 98%, Cd en 99%, Cu en 99%, Fe 99.5 % y Zn en 98%.
- En el Análisis Estadístico de Datos, se realizó la comprobación de la Normalidad de Datos, en la cual se observó que todos los datos mostraron el valor de $p > 0.10$ es mayor a 0.05 por lo tanto la distribución de datos es normal y válido para un análisis estadístico. (Normalidad de Ryan-Joiner, similar a Shapiro – Wilk).
- El Análisis de ANOVA (Anova One Way), arrojó que de todos los tratamientos y sus réplicas el más eficiente para el tratamiento de las aguas ácidas analizadas es el Tratamiento **Z** (Drenaje Grande con Barreras). Se explica la efectividad de este tratamiento ya que es el más completo y cuenta con las barreras que proporcionan mayor remoción de metales; el material de calizas es bueno para la neutralización del pH, pero sumando las barreras reactivas se obtiene mayor remoción de los metales.

REFERENCIAS

- Aduvire, O. (2006). *DRENAJE ÁCIDO DE MINA GENERACIÓN Y TRATAMIENTO*. Madrid, España: Instituto Geológico y Minero de España. Obtenido de http://info.igme.es/SidPDF/113000/258/113258_0000001.pdf
- Cabrera, M. A., Pinos, D., & Pulla, M. F. (2013). ARSÉNICO EN EL AGUA. *REVISTA GALILEO*. Obtenido de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/30009/1/173-635-1-PB.pdf>
- Cardona Gutiérrez, A. F., Cabañas Vargas, D. D., & Zepeda Pedreguera, A. (2013). Evaluación del poder biosorbente de cáscara de naranja para la eliminación de metales pesados, Pb (II) y Zn (II). *Revista Académica Ingeniería*, 17(1), 1-9. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/467/46729718001.pdf>
- Córdoba De la Cruz, R. C., & Rojas Pérez, J. (2015). *Alcalinización con Travertino y desmineralización de aguas ácidas de*

minas en simulador de humedal a nivel de laboratorio. Repositorio Institucional de la Universidad del Centro del Perú, Huancayo, Perú. Obtenido de <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/1007>

Del Águila Guadalupe, N. (2015). *Gestión de efluentes, tratamiento de aguas ácidas y precipitación de aluminio y manganeso en la planta de tratamiento de la Empresa Minera de Yanacocha [Informe Técnico]*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú. Obtenido de https://alicia.concytec.gob.pe/vufind/Record/UUNI_d59dd3f9c77828efa4d690704d250e97

Díaz Gálvez, S. (2014). *Eficiencia de las estructuras construidas para mejorar la calidad del agua en el cierre de actividades en la mina Banco Minero y Tahona - Hualgayoc - Cajamarca [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de Cajamarca, Cajamarca, Perú. Obtenido de <https://repositorio.unc.edu.pe/handle/UNC/642>

Huanacuni Quelcahuana, A. J. (2015). *Estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto de matriz metálica rico en 80% de cobre, aleado con zinc y estearato de zinc para evaluar la dureza y el desgaste via la pulvimetalurgia [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa, Perú. Obtenido de <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/140>

Kooner, Z. (1993). Comparative study of adsorption behavior of copper, lead, and zinc onto goethite in aqueous systems. *Environmental Geology*, 21, 242-250. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00775914>

Lora Silva, R., & Bonilla Gutiérrez, H. (2010). REMEDIACIÓN DE UN SUELO DE LA CUENCA ALTA DEL RÍO BOGOTÁ CONTAMINADO CON LOS METALES PESADOS CADMIO Y CROMO. *Revista U.D.C.A.*, 13(2), 61-70. Obtenido de <http://www.scielo.org.co/pdf/rudca/v13n2/v13n2a08.pdf>

Martel Valverde, G. A. (2014). *Análisis de los factores que influyen en el conflicto socio-ambiental del proyecto minero metalúrgica Tantahuatay en el departamento de Cajamarca [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria la Molina, Lima, Perú. Obtenido de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2317>

Nina Chambe, M. (2008). *Evaluación de los métodos químico y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Caso : Mina Cerro de Pasco [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú. Obtenido de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/802>

Nordstrom, K., & Alpers, C. (1999). The geochemistry of acid mine waters. *USGS Science for a changing world*, 133-160. Obtenido de <https://pubs.er.usgs.gov/publication/70199480>

Rosas Blas, R. P., & Carranza Urbina, J. W. (2015). *Estudio técnico para el tratamiento de aguas ácidas en los drenajes de la industria minera. [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional de la Universidad de Trujillo, Trujillo, Perú. Obtenido de <https://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/3640>

Serafín Muñoz, A. H., Medina García, M. G., Vido García, F. A., Noriega Luna, B., Zamorategui Molina, A., Li, Y., & Rodríguez Castrejón, U. E. (2016). *Uso potencial de pellets para el tratamiento de aguas contaminadas con arsénico en*

comunidades de Xichú, Gto., Méxi. Comunidades de Xichú, México. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=41649432003>

Skousen, J. (1997). *OVERVIEW OF PASSIVE SYSTEMS FOR TREATING ACID MINE DRAINAGE*. West Virginia University, Virginia, US. Obtenido de http://www.wbsrc.org/uploads/2/5/6/0/25607137/97_passive_trt_overview.pdf

Valencia Espinoza, C. E. (2011). *QUÍMICA DEL HIERRO Y MANDANESO EN EL AGUA, MÉTODOS DE REMOCIÓN [Tesis de Bachiller]*. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. Obtenido de <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/754/1/ti881.pdf>

Ziemkiewicz, P. F., Skousen, J. G., & Simmons, J. (2003). Long-term Performance of Passive Acid Mine Drainage Treatment Systems. *Mine Water and the Environment*, 22, 118-129. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/s10230-003-0012-0>

ANEXOS

Anexo 1. Resultados de Laboratorio Promedio de cada Tratamiento.

REPORTE DE ENSAYO								
P-TAN-LA-31.01-01			V-0					
Laboratorio Químico Coimolache								
Despacho Laboratorio:	LCRC1901094			Fecha de Recepción: 17/04/2019				
Cliente :	Relaciones Comunicarias			Fecha de reporte: 22/04/2019				
Nº. Muestras :	32							
Referencia Cliente:	SN							
Producto descrito como:	Muestras Líquidas de aguas							
Descripción del estado:	En frascos							
Condición de la muestra:	Líquida							
Comentario Adicional :	Son muestras líquidas							
Método	ICPAMT	ICPAMIC	PAMICPAM	ICPAMT	ICPAMT	pH		
Analito	Al	As	Cd	Cu	Fe	Zn	pH	
Unidad	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm		
Min.Detección	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002	0.002		
Max.Detección								
Nº	CÓDIGO MUESTRA							
1	ST	141.030	6.540	0.380	13.040	876.036	74.330	3.010
2	V	45.659	3.178	0.188	4.427	482.810	19.844	4.370
3	W	1.542	0.200	0.087	0.140	36.895	20.277	7.292
4	X	50.125	0.187	0.281	6.626	344.235	30.505	4.104
5	Y	9.102	0.213	0.069	0.134	38.478	21.306	8.486
6	Z	3.030	0.020	0.003	0.060	4.260	1.150	11.620

Fuente: Laboratorio Químico Coimolache, 2019.