



UNIVERSIDAD
PRIVADA
DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de Ingeniería Ambiental

“EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA BOCAMINA PROSPERIDAD CON MÉTODO QUÍMICO EMPLEANDO CAL A NIVEL DE LABORATORIO”

Trabajo de investigación para optar al grado de:

Bachiller en Ingeniería Ambiental

Autores:

Wilmer Aguirre Cieza
Rogelio Huaman Flores

Asesor:

MSc. Juan Carlos Flores Cerna

Cajamarca - Perú

2019

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El asesor *MSc. Juan Carlos Flores Cerna*, docente de la Universidad Privada del Norte, Facultad de Ingeniería, ha realizado el seguimiento del proceso de formulación y desarrollo de la investigación de los estudiantes:

- Aguirre Cieza, Wilmer.
- Huaman Flores, Rogelio.

Por cuanto, **CONSIDERA** que el trabajo de investigación titulado: EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA BOCAMINA PROSPERIDAD CON MÉTODO QUÍMICO EMPLEANDO CAL A NIVEL LABORATORIO para aspirar al grado de bachiller por la Universidad Privada del Norte, reúne las condiciones adecuadas, por lo cual, **AUTORIZA** los interesados para su presentación.

MSc. Juan Carlos Flores Cerna

Asesor

ACTA DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

La Ing. *Juan Carlos Flores Cerna*, ha procedido a realizar la evaluación del trabajo de investigación de los estudiantes: AGUIRRE CIEZA WILMER y HUAMAN FLORES ROGELIO, para aspirar al grado de bachiller con el trabajo de investigación: EFICIENCIA DEL TRATAMIENTO DEL DRENAJE ÁCIDO DE MINA EN LA BOCAMINA PROSPERIDAD CON MÉTODO QUÍMICO EMPLEANDO CAL A NIVEL LABORATORIO.

Luego de la revisión del trabajo en forma y contenido expresa:

Aprobado

Calificativo: Excelente [20 - 18]

Sobresaliente [17 - 15]

Bueno [14 - 13]

Desaprobado

Ing./Lic./Dr./Mg. Nombre y Apellidos

Evaluador

DEDICATORIA

A Dios por guiarnos nuestro camino, y al
apoyo moral de nuestros familiares, para llegar a
nuestra meta trazada.

AGRADECIMIENTO

A nuestros maestros de nuestra Alma Mater que nos inculcan sus conocimientos, con el sano propósito de forjar profesionales con calidad humana y profesionalismo.

Tabla de contenido

ACTA DE AUTORIZACIÓN PARA PRESENTACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	2
ACTA DE EVALUACIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO	5
ÍNDICE DE TABLAS	7
ÍNDICE DE FIGURAS	8
RESUMEN	9
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	10
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA	22
CAPÍTULO III: RESULTADOS	28
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	32
REFERENCIAS	35
ANEXOS	37

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados químicos del drenaje ácido de mina.....	28
Tabla 2 Ficha de observación para la bocamina Prosperidad.....	28
Tabla 3 Comparación de los resultados del DAM con los LMP	29
Tabla 4 Neutralización del DAM con lechada de cal al 10%	29
Tabla 5 Concentración de metales en el agua tratada con cal al 10%	30
Tabla 6 Eficiencia de remoción de metales en el agua tratada.....	31
Tabla 7 Ficha de observación	38
Tabla 8 Formato para la prueba de neutralización del DAM	38
Tabla 9 Formato para los valores de concentración de metales en el DAM.....	39
Tabla 10 Formato para valores de eficiencia de remoción de metales con lechada de cal al 10%	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Elementos que intervienen en la formación del DAM.....	15
Figura 2 Hidrólisis de metales.....	17
Figura 3 Solubilidad de diversos cationes en función del pH.	18
Figura 4 Diagrama de Flujo empleo método químico con cal para tratamiento de DAM. .	27
Figura 5 Neutralización del DAM con lechada de cal al 10%	30
Figura 6 Concentración final de metales después del tratamiento con lechada de cal al 10%	30
Figura 7 Eficiencia de remoción de metales con lechada de cal al 10%	31

RESUMEN

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado en base a un problema debido al drenaje ácido de mina DAM emitida en forma natural dentro de la bocamina Prosperidad, pasivo ambiental de la antigua Mina San Nicolás, en Hualgayoc, Cajamarca.

La caracterización química del DAM, indicó que puede causar grandes impactos sobre las aguas, suelos, flora y fauna; por lo que se hace el estudio de tratamiento del DAM con el método químico empleando cal, cuyos resultados de neutralización y precipitación de metales pesados con lechada de cal al 10% p/v en pruebas a nivel laboratorio, dan resultados satisfactorios y pueden generar aguas de calidad para bebida de animales y riego de plantas, que cumplen con los Límites Máximos Permisibles (LMP) para descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM).

Para el tratamiento químico se han obtenido elevados porcentajes de remoción de metales pesados (mayor al 95% a un pH de 10.5), sin embargo debido a que la neutralización se realiza con cal, la desventaja que presenta este método de tratamiento es la presencia de iones calcio en los lodos de sedimentación, que tienen que ser extraídos y acumulados en un lugar adecuado, para ser reutilizados. Se requiere 0.197 kg de cal/m³ de agua ácida, utilizando una pureza de la cal del 98% como CaO.

PALABRAS CLAVES: Bocamina, Metales Pesados, DAM, LMP, remoción de metales.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

La generación del drenaje ácido de mina (DAM) es un problema común en los yacimientos polimetálicos en el Perú, porque perjudica severamente la vida acuática de los ríos y la ecología de su entorno. En áreas donde existe mineralización con sulfuros no protegida, el principal problema de la calidad de agua por la actividad minera es generalmente debido a los efectos del drenaje ácido de mina no controlado. Una vez que se genera el DAM es difícil y costoso su control, los efectos son a largo plazo, aún a perpetuidad, y afectarán, tanto al uso de aguas superficiales, debido a sus propiedades tóxicas sobre la fauna acuática como a las fuentes de aguas subterráneas debido a la migración de los lixiviados tóxicos (Nina M., 2008).

Se puede apreciar los distintos casos de contaminación de cauces de ríos en nuestro país por mencionar algunos de ellos la contaminación del río Huallaga por fuentes de contaminación actuales y potenciales de las minas Pilar, Atacocha, San Miguel y Milpo que aportan sus DAM a dicho río, aunque ya cuentan con un Programa de Adecuación Medio Ambiental (PAMA), esto no quiere decir que ya no contaminen el río Huallaga. Otro caso de contaminación más cercano, es el de la cuenca del río Rímac que alberga una población grande y un amplio rango de actividades socio económicas que incluye la actividad minera establecida desde hace mucho tiempo; la generación hidroeléctrica; suministro de agua a comunidades incluyendo Lima; la irrigación de tierras agrícolas y la recepción de aguas de desecho tanto domésticas como industriales. La actividad minero metalúrgica en la cuenca del Río Rímac se sitúa

principalmente en las provincias de Huarochiri y Lima, siendo los distritos de Chilca, San Mateo, Matucana, Surco, Huanza y Carampoma los de mayor concentración de labores. Los centros mineros más destacados de la zona se encuentran ubicados en Casapalca, Tamboraque, Millontingo, Pacococha, Colqui, Venturosa, Caridad, Lichicocha y Cocachacra (Nina M., 2008).

En Cajamarca, la provincia de Hualgayoc comprende los distritos de Bambamarca, Hualgayoc y Chugur, pero todos los Pasivos Ambientales Mineros (PAM) están prácticamente concentrados en Hualgayoc, distrito minero de antigua data. La actividad minera está presente desde hace 250 años, producto de ello han destruido toda clase de vida animal y vegetal en las cuencas de los ríos Hualgayoc-Arascorgue y Tingo-Maygasbamba, esta continua contaminación es producto de los 1253 pasivos ambientales (desperdicios mineros dejados por empresas mineras y el Estado) abandonados por quienes durante más de dos siglos y medio dejaron a la deriva relaves mineros con alto contenido de plomo, manganeso, cianuro y otras sustancias contaminantes utilizadas en esta actividad.

El agua que consumen los pobladores de Hualgayoc y comunidades aledañas, provienen de los ríos Tingo-Maygasbamba y Hualgayoc-Arascorgue. El Río Tingo Maygasbamba es un recurso importante y necesario para la comunidad de Tingo – Hualgayoc. El agua de este río es utilizada por la comunidad para regadío y consumo de animales, por lo que es importante analizar las descargas de drenaje ácido de la Minera San Nicolás y determinar el grado de contaminación en la calidad de agua (Diario El Comercio, 2012).

La agencia de noticias de Servicios de Comunicación Intercultural (SERVINDI), el 15 de mayo del 2016 informó que, las organizaciones sociales de Bambamarca en la provincia de Hualgayoc, iniciaran el lunes 16 de mayo un paro indefinido a fin de exigir la remediación de los pasivos ambientales que existen en las cabeceras de cuenca, frenar la expansión minera y descontaminar los ríos Tingo–Maygasbamba y Hualgayoc–Arascorgue.

La Comisión Ambiental Municipal de Bambamarca, en compañía de representantes de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), visitó, la segunda semana de julio, las instalaciones de la Minera San Nicolás, donde pudo constatar que la empresa sigue vertiendo aguas, presuntamente ácidas, en la quebrada que está en la zona. Durante dicha actividad, fue levantada un acta por la cual se acordó realizar una segunda visita, así como tomar acciones legales contra la compañía. Por su parte, la Autoridad Nacional del Agua (ANA) midió el caudal de agua de la quebrada La Eme y pudo comprobar, una vez más, dichos vertimientos (Noticias SER, 2015).

La Minera San Nicolás se ubica a 23 km al noroeste del distrito de Hualgayoc, del departamento de Cajamarca. Esta actividad minera al cerrar sus operaciones en el año 2016, dejó como pasivo ambiental el drenaje de aguas ácidas subterráneas del interior de mina del socavón Prosperidad, el cual está en contacto con la lluvia y el flujo va al Río Tingo Maygasbamba; por otro lado debido a que no se cuenta con un manejo y control adecuado desde el tiempo de su operación y paralización, es de suma importancia realizar su caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina y

realizar un tratamiento con cal a nivel laboratorio, en la cual compararemos con los límites máximos permisibles (LPM) para su evaluación tecnológica ambiental.

1.2. Formulación del problema

¿Cuál es la eficiencia del tratamiento del drenaje ácido de mina, en la bocamina Prosperidad con método químico empleando cal a nivel laboratorio?

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Determinar la eficiencia del tratamiento del drenaje ácido de mina, en la bocamina Prosperidad con método químico empleando cal a nivel de laboratorio.

1.3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar el drenaje ácido de mina en la bocamina Prosperidad.
- Evaluar los resultados de Laboratorio del drenaje ácido de mina de la bocamina Prosperidad, comparándolos con los Límites Máximos Permisibles según la Legislación Peruana vigente.
- Determinar el grado de reducción de metales pesados con el método químico empleando cal.

1.4. Antecedentes

Las aguas ácidas son aquellas soluciones sulfatadas, con alto contenido de metales y con un pH menor a 7. Estas aguas se pueden formar tanto en el interior como en la superficie, por oxidación de la pirita (FeS_2 u otros sulfuros) en presencia de humedad, expuesta a las condiciones atmosféricas, pudiendo acceder al sistema hidráulico subterráneo, contaminando acuíferos, o surgir como efluentes que vierten en cursos de agua superficial (Carrasco L. , 2013).

La formación del drenaje ácido es un proceso natural favorecido por la disponibilidad de minerales sulfurosos: “Durante la explotación de determinados yacimientos (carbón, sulfuros metálicos, hierro, uranio y otros) quedan expuestos a la meteorización grandes cantidades de minerales sulfurosos que pueden llegar a formar drenajes ácidos. Para que esto tenga lugar son necesarias unas condiciones aerobias, es decir la existencia de cantidades suficientes de agua, oxígeno y simultáneamente la acción catalizadora de bacterias” (Aduvire, 2006).

En otras palabras, la exposición de materiales sulfurosos a la intemperie (es decir al contacto con agua y aire) hace que estos materiales reaccionen, creando ácido sulfúrico en un proceso continuo que puede durar cientos de años. Al mismo tiempo, al incrementar el nivel de acidez en el agua, ciertas bacterias actúan como elemento catalizador acelerando los procesos de oxidación y acidificación, lixiviando aún más los materiales y por ende produciendo más drenaje ácido.

Nordstrom y Alpers (1999) describen el proceso de oxidación de la pirita como el principal responsable de la formación de aguas ácidas; esta oxidación se ve favorecida

en áreas mineras debido a la facilidad con la que el aire entra en contacto con los sulfuros a través de las labores mineras de acceso y por los poros existentes en las pilas de estériles y residuos- así como al incremento de la superficie de contacto de las partículas. Dichos autores consideran que los factores que más afectan a la generación del drenaje ácido de mina son el volumen, la concentración, el tamaño de grano y la distribución espacial de la pirita.

Tal como lo muestra la Figura 1, la generación de agua ácida se da por la existencia de los siguientes cuatro elementos:

- Mineral sulfuroso (mayormente pirita)
- Oxidante (oxígeno proveniente del aire o de procedencia química)
- Agua (como líquido o humedad)
- Bacterias como elemento catalizador (principalmente *Thiobacillus ferrooxidans*)

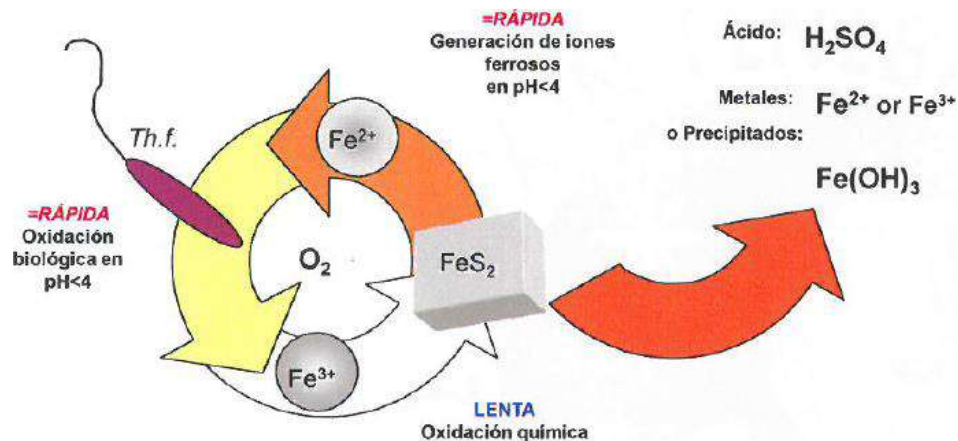


Figura 1. Elementos que intervienen en la formación del DAM
Fuente: Kuyucak, 2006

Es preciso reiterar, que al ser un proceso continuo, la producción de drenaje ácido puede durar cientos de años independientemente de si la mina se encuentra en operación o no, por tanto una vez que el drenaje se ha generado, el costo de su

tratamiento es elevado. Así mismo, dada la acidez y las concentraciones elevadas de metales que contiene, los drenajes ácidos afectan la vida humana, los animales, los suelos y las plantas e incluso por su toxicidad y poder corrosivo producen deterioros en estructuras y maquinarias.

CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS ÁCIDAS DE MINA

La caracterización precisa del drenaje ácido de mina es muy importante para efectuar la correcta selección y dimensionamiento de los dispositivos operacionales que configuran el conjunto del tratamiento (López P., 2002). Una adecuada caracterización debe incluir la medida precisa y representativa del caudal y de al menos los parámetros químicos siguientes: pH, alcalinidad total, acidez o alcalinidad neta (expresadas todas como CaCO_3); además de contenidos de Fe^{2+} , Fe total, Al, Mn, SO_4^- y conductividad (Hyman y Watzlaf, 1995). Estos autores consideran deseable analizar también el Ca, Mg, Na, Cl, K, Br y Zn, lo que permite en la mayoría de los casos efectuar un correcto balance iónico. El conjunto de estas medidas se ha de registrar al menos durante un año hidrológico.

TRATAMIENTO QUÍMICO DE LOS DRENAJES ÁCIDOS DE MINA:

Se basan en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal sólida, cal hidratada, caliza triturada, soda cáustica, carbonato de sodio o amoníaco; con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados. Estos metales precipitan como hidróxidos insolubles en un intervalo de pH que suele estar comprendido entre 8.5 a 10. El hierro ferroso se convierte en hidróxido ferroso a pH superior a 8.5 y el manganeso (Mn) se transforma

en insoluble cuando el pH es superior a 9.5. El aluminio (Al) precipita en el agua a un pH de 5.5 pero se vuelve otra vez soluble a pH superior a 8.5. A un pH controlado alrededor de 9.5 precipitan metales tales como hierro (Fe), zinc (Zn) y cobre (Cu). Otros metales tales como el níquel (Ni) y cadmio (Cd) requieren un pH mayor, en el rango de 10.5 a 11 para precipitar los hidróxidos (Ver figura 2). Por estas razones, dependiendo de la clase de metales y su concentración en las aguas ácidas se elegirá el método de tratamiento químico más apropiado (Aubé & Zinck, 2003).

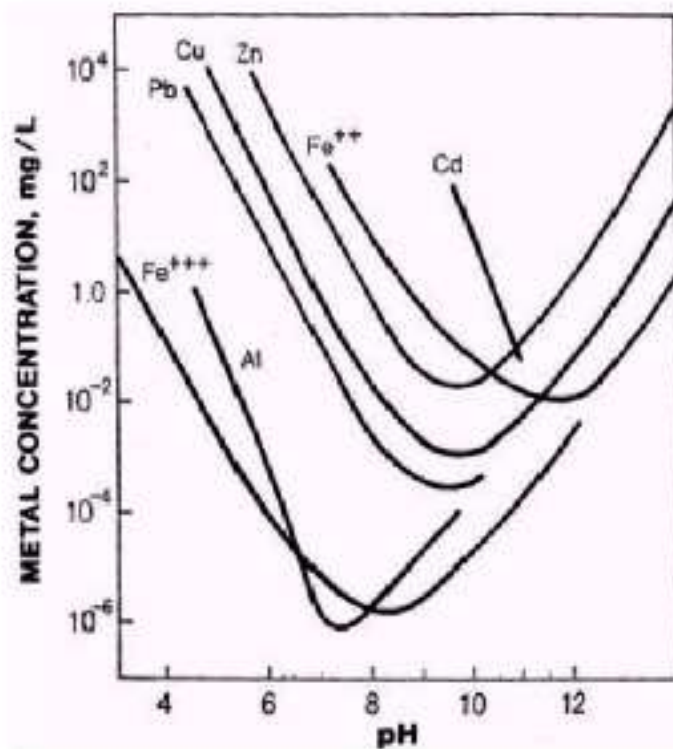


Figura 2. Hidrólisis de metales
Fuente: Aubé & Zinck (2003)

La principal diferencia entre los procesos de tratamiento con cal es el método empleado para separar los sólidos y los lodos que se forman. El efluente químico resultante es muy similar para todos los procesos de tratamiento con cal (Aubé & Zinck, 2003).

En la figura 3 se muestra una curva de solubilidad de los metales pesados comunes y su solubilidad VS en pH de la solución. Las líneas que se muestran son las curvas teóricas de solubilidad de los diferentes metales y una forma característica de estas líneas es la forma en “U” que tienen, denotando un mínimo de solubilidad en un valor específico de pH.

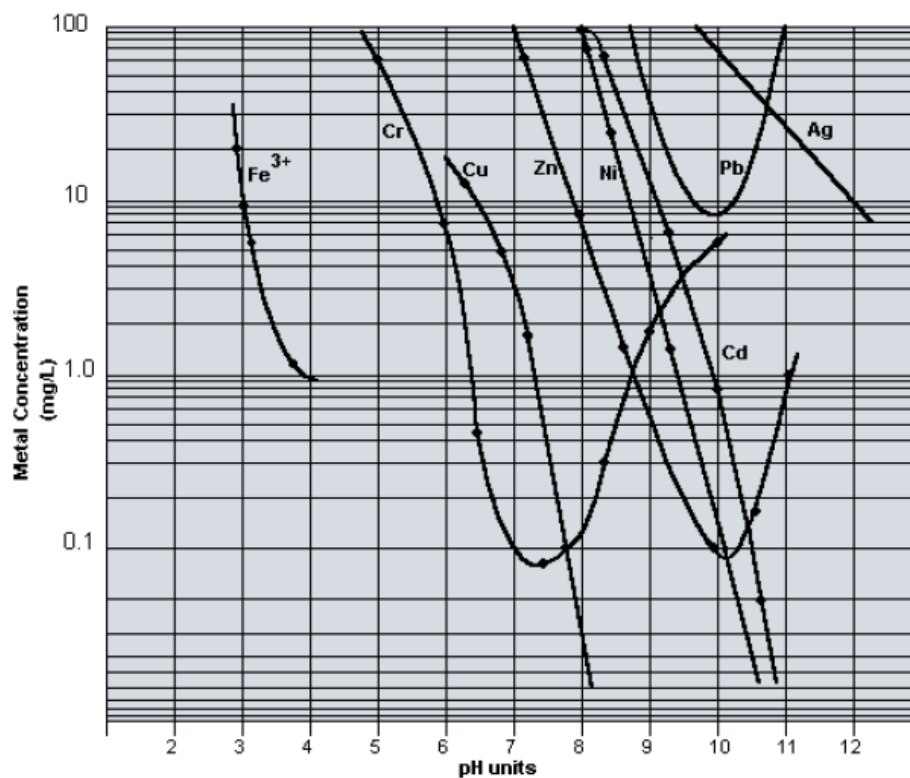


Figura 3. Solubilidad de diversos cationes en función del pH

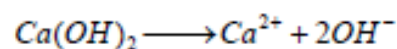
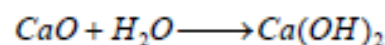
Fuente:

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf

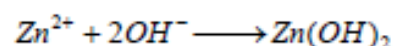
TRATAMIENTO CON CAL

Se suele utilizar cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ que es particularmente útil para tratar grandes caudales en condiciones de alta acidez. Cuando se pretende eliminar el hierro, en el propio proceso de agitación se incorpora la aireación necesaria para lograr la oxidación del hierro ferroso (Fe^{+2}) hasta transformarse en hierro férrico (Fe^{+3}) y conseguir la mayor eliminación de éste. Los lodos que se obtienen presentan una gran cantidad de sulfato cálcico (CaSO_4), que desde los decantadores pueden bombearse a una balsa de almacenamiento o en algunos casos, escurrir el agua en filtros prensa para una manipulación más cómoda de los sólidos. Esta técnica tiene una limitación cuando se requiere alcanzar un pH muy alto para precipitar metales como el manganeso (Aduvire, 2006).

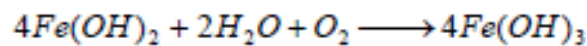
La disolución de la cal es el primer paso del proceso de neutralización. La cal debe ser hidratada y es normalmente alimentada al proceso como una pasta. La cal hidratada diluida entonces incrementará el pH. Las dos siguientes ecuaciones ilustran esas reacciones:



El incremento del pH entonces promueve la generación de iones hidroxilo (OH^-), los cuales precipitan los metales. La siguiente reacción muestra la reacción de precipitación del Zn por ejemplo:



Entre los metales que precipitan se encuentra el hierro ferroso $Fe(OH)_2$. Desafortunadamente, los hidróxidos ferrosos no son tan estables como los hidróxidos férricos, cuando el lodo es expuesto a aguas ácidas o precipitación natural. Por esta razón, a menudo se aplica aireación para oxidar el hierro a la forma más estable, mediante la siguiente ecuación:



Un producto común de la neutralización con cal es el yeso. La precipitación del yeso ocurre cuando el DAM es a menudo rico en sulfatos y el calcio adicionado de la cal promueve un buen producto de solubilidad sobre la saturación. La reacción que ocurre es la siguiente:



Otro producto común de la neutralización con cal es el carbonato de calcio. El carbono inorgánico de esta reacción puede provenir del mismo DAM o ser resultado del dióxido de carbono del aire, el cual es disuelto durante la aireación. Este dióxido de carbono se convierte a bicarbonato y luego parcialmente a carbonato debido al pH alto. La fracción de carbonato precipitará con altos contenidos de calcio del lodo en forma de calcita (carbonato de calcio). Esta calcita puede jugar un rol importante en la estabilidad de producto final de lodos debido a que este promueve el potencial de neutralización al lodo. Este es también un indicador de la eficiencia del proceso con cal: un proceso de neutralización más eficiente producirá menos calcita. (Aubé & Zinck, 2003).



Los metales precipitados obtenidos durante todo el proceso son desechos típicamente identificados como “lodos”. Este lodo debe ser dispuesto en un ambiente de manera aceptable. Como los costos de disposición de lodos pueden ser muy elevados, usualmente se justifica una mayor inversión de capital debido a los significativos ahorros en costos de operación (Aduvire, 2006).

(Nina M. ,2008) en su investigación sobre el tratamiento del drenaje ácido de la mina de Cerro de Pasco empleando el método biogénico respecto al método químico ensayado a escala de laboratorio, concluye que “de las experiencias realizadas a escala de laboratorio determinaron que el método biogénico para el tratamiento del drenaje ácido de la mina Cerro de Pasco es más eficiente técnicamente consiguiéndose remover 99.99% de cobre, 99.99% de hierro, 96.67% de plomo, 99.94% de zinc, y 97.55% de sulfatos respecto al método químico en el cual se alcanzaron porcentajes de remoción de 99.99% de cobre, 99.99% de hierro, 96.67% de plomo, 99.92% de zinc y 70.98% de sulfatos”, además con el método biogénico en 2 etapas no fué necesaria la adición de cal ni hidróxido de sodio para incrementar el pH y ambientalmente es más eficiente por el hecho de que con el método biogénico no se generan lodos de hidróxidos inestables sino sulfuros de los metales precipitados que incluso pueden ser recuperados para su comercialización; por tanto se acepta la hipótesis.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es Aplicada, con Diseño Descriptivo, No Experimental, Transversal. La investigación es Aplicada porque según Murillo (2008), busca la aplicación o utilización de los conocimientos adquiridos, a la vez que se adquieren otros, después de implementar y sistematizar la práctica basada en investigación.

Según Hernández, Fernández y Baptista (2010), la investigación es No Experimental, porque se realiza sin manipular deliberadamente variables; y es Transversal porque la muestra del DAM de la bocamina Prosperidad, ha sido tomada en una sola fecha del año.

2.2 Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

2.2.1 Población:

Agua del drenaje ácido de mina (DAM) del pasivo ambiental de la Empresa Minera San Nicolás y del agua de río Tingo Maygasbamba, provincia de Hualgayoc, departamento de Cajamarca.

2.2.2 Muestra:

- Muestras de drenaje ácido de mina DAM de la bocamina Prosperidad.
- 200 gramos de cal viva de la Calera Resurrección de Bambamarca.

Las muestras de drenajes ácidos de mina se tomaron en 4 puntos del canal dentro de la bocamina, con los cuáles se formó un compósito

representativo del tipo de drenaje ácido de mina que sale diariamente de la bocamina. La pirita es el mineral que se encuentra en mayores cantidades en la mina san Nicolás, por lo cual los drenajes ácidos de mina se caracterizan por tener valores bajos de pH, con concentraciones de sulfato y metales pesados elevados.

2.2.3 Materiales:

- Botellas de plástico boca ancha de 500 ml para muestras líquidas.
- Etiquetas de identificación.
- EPP (botas, chaleco, casco, lentes, guantes quirúrgicos)
- Ácido clorhídrico diluido al 5 % para preservación de muestras líquidas.
- Una bolsa de hielo en trozos.
- Caja de tecnopor para trasladar las muestras.
- GPS Garmín.
- Fotocopias.
- USB.
- Laptops.
- Balde plástico de 2 litros de capacidad.
- Lapiceros y plumón indeleble grueso.
- Cámara fotográfica.
- Jeringa descartable de 10 ml.
- Vasos pyrex de 1 litro de capacidad.
- Un equipo Prueba de jarras (jar test)

2.3 Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1 Técnicas de recolección de datos:

➤ Observaciones in situ

En campo se realizó la observación directa del DAM en la bocamina, para tener en cuenta que se tiene un pasivo ambiental sin remediación.

➤ Procedimiento para el experimento

- La muestra líquida se colectó en un cooler con empaque de hielo a fin de preservar las condiciones originales de la misma.
- En el momento de la toma de muestras se midió el pH, luego en el LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA DE CAJAMARCA, se filtró la mezcla compuesta representativa del DAM para el análisis de As, Cu, Fe, Zn y Pb, por espectroscopia de absorción atómica.
- Se registró los resultados experimentales de aguas de mina reportados por el Laboratorio Químico, los cuales fueron determinados por análisis químicos instrumentales.
- Se realizó cálculos químicos de volumen de solución neutralizante (cal) necesario para neutralizar el agua acida de mina.
- En un balde plástico de 2 litros de capacidad, se agregó 100 gramos de cal viva con un litro de agua industrial y se agitó la pulpa vigorosamente para mantener una lechada de cal al 10% p/v.

- Se adquirieron 2 vasos pyrex de un litro de capacidad, en cada uno de ellos se agregó una muestra de agua ácida (1 litro), el primero será la muestra base y el otro la réplica, para cada uno de los procesos; luego se llevó a cabo un mezclado utilizando el método de Letterman y Villegas (1976), que consiste en una mezcla rápida por 20 min a 400 rpm, a fin de desestabilizar las cargas superficiales de las partículas.
- Pasados los 20 minutos de mezcla, se dejó sedimentar por 30 minutos y se midió el pH.
- Luego se agregó al vaso con DAM, volúmenes de 0.50 ml de lechada de cal con una jeringa descartable, se agitó por 20 min a 400 rpm, se dejó sedimentar por 30 minutos y se midió el pH.
- Este último paso se repitió hasta obtener un pH final de 12.
- Se registró los datos de volúmenes de cal agregada.
- Terminada la prueba se dejó sedimentar completamente los lodos, separándolos por filtrado y el agua remanente se envió al laboratorio químico para realizar el análisis de metales según LMP.

2.3.2 Instrumentos

- Ficha de observación (Tabla 7).
- Formato para la prueba de neutralización del DAM (Tabla 8).
- Formato para los valores de concentración de metales en el DAM (Tabla 9).
- Formato para valores de eficiencia de remoción de metales con lechada de cal al 10% (Tabla 10).

2.3.3 Análisis de datos

Eficiencia de remoción de metales

La eficiencia de remoción de metales se calculó utilizando la ecuación:

$$\% = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100$$

Donde:

C_i: Concentración inicial del metal en el agua.

C_f: Concentración final del metal en el agua después del tratamiento con
lechada de cal al 10%.

Con los resultados se procesó y analizó toda la información obtenida y se
recomendó el procedimiento de neutralización de aguas acidas con cal.

2.3.4 Método

El diagrama de flujo para estas pruebas fue el siguiente:

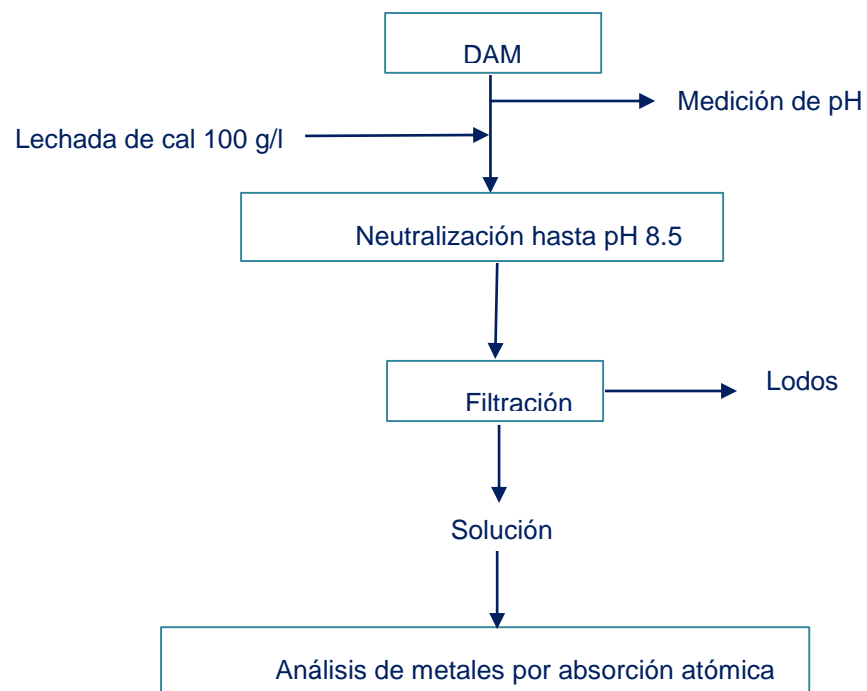


Figura 4. Diagrama de Flujo empleo método químico con cal para tratamiento de DAM

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

3.1 Caracterización fisicoquímica del drenaje ácido de mina de la bocamina Prosperidad

Estos resultados se presentan en la tabla 1 y 2.

Tabla 1

Resultados químicos del drenaje ácido de mina

Punto de muestreo	Muestra	Arsénico (As)	Cobre (Cu)	Hierro (Fe)	Plomo (Pb)	Zinc (Zn)	pH a 25 °C
Muestra del agua de drenaje ácido de mina a la salida del socavón prosperidad	M-1	17.045	41.110	763.100	0.327	89.520	3.14

Fuente: LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA de Cajamarca.

Tabla 2

Ficha de observación para la bocamina Prosperidad

Ficha de observación			
Existe drenaje		si	no
Caudal		Bajo	medio alto
Turbidez	Baja	medio	alto
color de sedimentación	Roja	naranja amarillenta	verde

Fuente: Elaboración Propia.

3.2 Comparación de los resultados químicos del drenaje ácido de mina con los Límites Máximos Permisibles según la Legislación Peruana vigente.

Los resultados del análisis químico determinado en el punto de muestreo, se compara con el Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM que aprueba los Límites Máximos Permisibles LMP (Tabla 2) para la descarga de efluentes líquidos de Actividades Minero – Metalúrgicas.

Tabla 3

Comparación de los resultados del DAM con los LMP

ANÁLISIS QUÍMICO DEL DRENAJE DE MINA			D.S. N° 010-2010-MINAM	
Localización de la Muestra		Agua de drenaje ácido de mina a la salida del socavón Prosperidad	Límite Máximo Permisible Para descarga de efluentes líquidos de actividades minero - metalúrgicas	
			Parámetro	Límite en cualquier momento
Arsénico (As)	mg/L	17.045	Arsénico (As)	0.10
Cobre (Cu)	mg/L	41.110	Cobre (Cu)	0.50
Hierro (Fe)	mg/L	763.100	Hierro (Fe)	2.00
Plomo (Pb)	mg/L	0.327	Plomo (Pb)	0.20
Zinc (Zn)	mg/L	89.520	Zinc (Zn)	1.50
° pH a 25°C	pH	3.14	° pH a 25°C	6-9

Fuente: Elaboración Propia.

3.3 Grado de reducción de metales pesados con el método químico empleando lechada de cal.

Tabla 4

Neutralización del DAM con lechada de cal al 10%

Reactivo:	lechada de cal al 10 % peso/volumen							
Volumen de solución:	1000	ml						
Peso de cal:	100000	Mg						
Neutralización con lechada de cal al 10%								
Volumen añadido de cal (ml)	Peso de cal añadido (mg)	pH						
0	0	3.14						
0.50	50	5.40						
1.00	100	5.62						
1.50	150	7.24						
2.00	200	10.66						
2.50	250	10.96						
3.00	300	11.14						
3.50	350	11.40						
4.00	400	11.47						
4.50	450	11.55						
5.10	510	11.69						
5.50	550	11.74						
6.10	610	11.76						
6.40	640	11.80						
7.00	700	11.89						
7.90	790	11.95						
8.20	820	11.97						
8.50	850	11.99						
8.80	880	12.02						
<table border="1" style="margin: auto;"> <thead> <tr> <th>pH</th> <th>Peso de cal añadido (mg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>10.66</td> <td>200</td> </tr> <tr> <td>10.50</td> <td>197</td> </tr> </tbody> </table>			pH	Peso de cal añadido (mg)	10.66	200	10.50	197
pH	Peso de cal añadido (mg)							
10.66	200							
10.50	197							

Kg CaO/m³ agua ácida 0.197

Fuente: Elaboración propia.

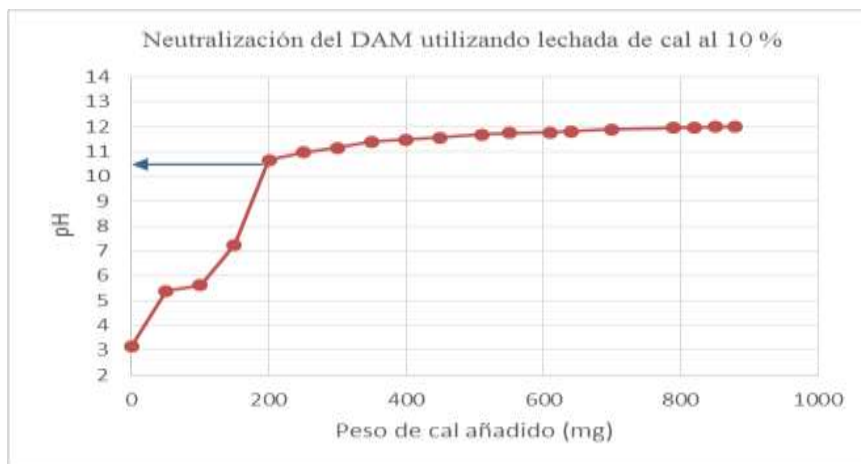


Figura 5. Neutralización del DAM con lechada de cal al 10%
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5

Concentración de metales en el agua tratada con cal al 10%

pH	Concentración de metal (ppm)				
	Arsénico	Cobre	Hierro	Plomo	Zinc
9.00	12.0000	0.0030	0.8000	0.2000	1.5291
9.50	11.8000	0.0030	0.1000	0.1200	0.9086
10.00	4.6000	0.0030	0.1000	0.0100	0.9853
10.50	0.8000	0.0030	0.1000	0.0100	0.5888
11.00	0.1000	0.0030	0.1000	0.0100	0.6233
11.50	0.0800	0.0030	0.1000	0.0100	0.3256

Fuente: Elaboración propia.

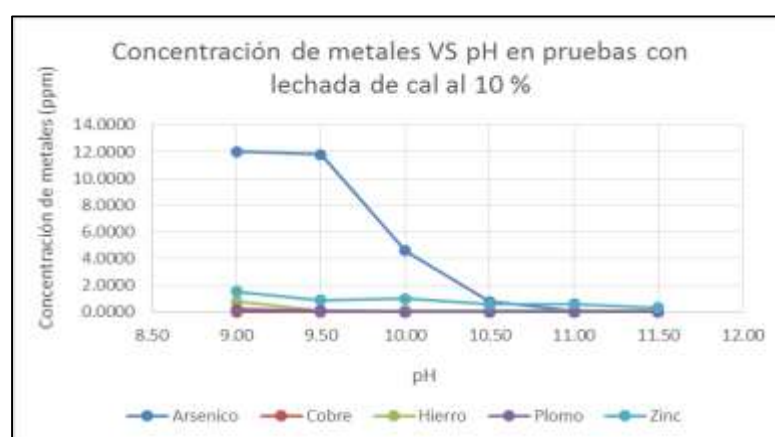


Figura 6. Concentración final de metales después del tratamiento con lechada de cal al 10%
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 6

Eficiencia de remoción de metales en el agua tratada

pH	Eficiencia de remoción de metales (%)				
	Arsénico	Cobre	Hierro	Plomo	Zinc
9.00	29.5981	99.9927	99.8952	38.8379	98.2919
9.50	30.7715	99.9927	99.9869	63.3028	98.9850
10.00	73.0126	99.9927	99.9869	96.9419	98.8994
10.50	95.3065	99.9927	99.9869	96.9419	99.3423
11.00	99.4133	99.9927	99.9869	96.9419	99.3037
11.50	99.5307	99.9927	99.9869	96.9419	99.6363

Fuente: Elaboración propia.

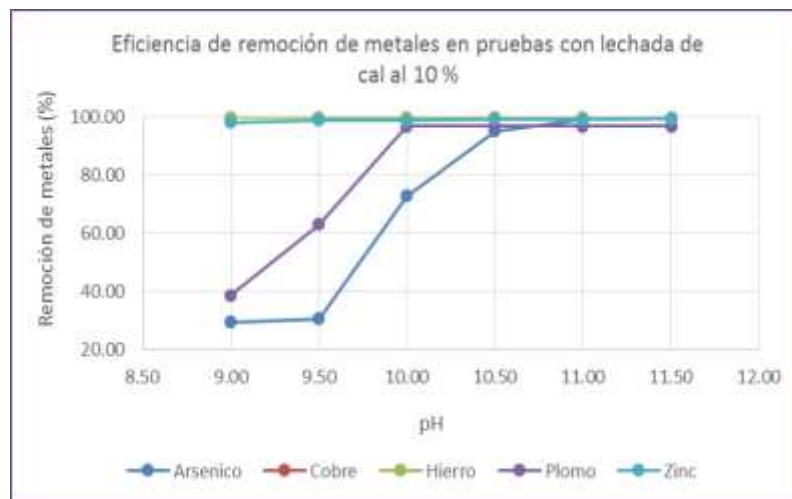


Figura 7. Eficiencia de remoción de metales con lechada de cal al 10%
Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1 Discusión

El drenaje ácido de mina (DAM) de la bocamina Prosperidad fué caracterizado por su color anaranjado amarillento (ver tabla 2) y por análisis químico, corroborando su carácter ácido ($\text{pH}=3.14$) debido a la abundancia de piritita (principal generador de los DAM), alta concentración de metales pesados.

En la Tabla 1, se observa que el DAM en Arsénico (As) registra el valor de 17.045 mg/L, el Cobre (Cu) registra 41.110 mg/L, el hierro (Fe) registra 763.110 mg/L, el plomo (Pb) registra 0.327 mg/L, el zinc (Zn) registra 89.520 mg/L; la concentración de estos metales exceden a lo establecido por los Límites Máximos Permisibles LMP (tabla 3), por lo que es necesario realizar tratamiento del agua previo al riego de vegetales y bebida de animales.

Se observa en la tabla 4, la dosificación de cal hasta neutralización del pH. En la tabla 5 y figura 6 los valores de concentración de metales según el pH alcanzado en el agua tratada con lechada de cal al 10%. La remoción del Arsénico a valores de pH menores que 10 no es satisfactoria; el cobre, hierro, plomo y zinc tienen concentraciones muy bajas y va disminuyendo su concentración hasta mantenerse con valores muy bajos (menor a LMP) a lo largo de la prueba.

Como se puede observar en la tabla 6 y figura 7, la mayoría de las eficiencias de remoción de metales a un pH de 9 sobrepasan en 95%, pero hay ciertas eficiencias como el del arsénico y el plomo que a un pH de 10.5 llegan al 95%. La eficiencia máxima de remoción de los metales en estudio se evidencia que: a un pH de 9 se consiguió remover 99.99% de cobre, a un pH de 9.50 se removió 99.99% de hierro, a un pH de 10 se removió 96.94% de plomo y a un pH de 11.50 se removió 99.53% de arsénico y 99.64% de zinc.

Por lo tanto la remoción de los metales con lechada de cal al 10%, confirma el estudio presentado en la figura 3, donde se muestra la curva de solubilidad de los metales pesados comunes y su solubilidad VS en pH de la solución, que en este estudio se logra remover el 95% los cationes de metales pesados a un pH de 10.5.

En la tabla 4 se puede observar que se necesitan 0.197 kg de cal/m³ de agua ácida para llegar al pH de 10.5, con una pureza de la cal del 98% como CaO).

4.2 Conclusiones

Las pruebas realizadas a nivel de laboratorio determinaron que el método químico empleando cal para el tratamiento del drenaje ácido de mina (DAM) de la bocamina Prosperidad, es eficiente técnicamente consiguiéndose remover metales mayor al 95% a un pH de 10.5. Ambientalmente no es eficiente por el hecho de que se generan lodos de hidróxidos inestables.

El DAM fue caracterizado por análisis químico corroborando de esta manera su carácter ácido debido a la abundancia de pirita (principal generador del DAM) y metales pesados en la bocamina Prosperidad. La concentración de estos metales pesados excede a lo establecido de los Límite Máximo Permisible para descarga de efluentes líquidos de actividades minero metalúrgicas (D.S. N° 010-2010-MINAM), por lo que es necesario realizar tratamiento del agua previo al riego de vegetales y bebida de animales.

Para el tratamiento químico se han obtenido elevados porcentajes de remoción de metales pesados (mayor al 95% a un pH de 10.5), sin embargo debido a que la neutralización se realiza con cal, la desventaja que presenta este método de tratamiento es la presencia de iones calcio en los lodos de sedimentación, que tienen que ser extraídos y acumulados en un lugar adecuado, para ser reutilizados

Se necesitan 0.197 kg de cal/m³ de agua ácida para llegar al pH de 10.5, con una pureza de la cal del 98% como CaO).

REFERENCIAS

Aduvire Osvaldo (2006). Drenaje Ácido de Mina: Generación y Tratamiento. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España. Edición IGME. Código: SID-63187. Publicación Electrónica 136pp.

Aubé B. & Zinck J. (2003). Lime Treatment of Acid Mine Drainage in Canada, Presentado y publicado en “Brazil-Canada Seminar on Mine Rehabilitation”, Florianópolis, Brasil, Diciembre 1-3.

Carrasco Venegas L. (2013). Estudio Técnico del tratamiento de aguas ácidas. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Químico. Universidad Nacional del Callao. Callao, Perú.

Diario El Comercio (2012). “Más de 1.200 pasivos ambientales en Hualgayoc esperan ser remediados”. Nota del Lunes 09 de Enero.

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C. & Baptista Lucio, P. (2010). Metodología de la Investigación. 5ta Edición, McGraw-Hill / Interamericana Editores, Chile.

Letterman R & Villegas R. (1976). Optimizing Flocculator Power Input. American Society of Civil Engineers. *Journal of the environmental Engineering Division*.

López Pamo, E. et al. (2002). Tratamientos pasivos de drenajes ácidos de mina: Boletín Geológico y Minero, 113 (1): 3-216.

Murillo. (2008). La investigación aplicada: una forma de conocer las realidades con evidencia científica. Revista educación.(vol. 33, núm. 1, pág. 155-165). Costa Rica.

Nina Chambe M. (2008). Evaluación de los métodos químicos y biogénico para el tratamiento de drenaje ácido de mina a escala de laboratorio. Tesis para optar el grado académico de Magíster en Ciencias Ambientales. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Lima, Perú.

Noticias Ser (2015). “Minera San Nicolás sigue vertiendo aguas presuntamente ácidas”. Nota del 22 de Julio.

Servindi (2016). “Hartos de la contaminación minera inician paro en Bambamarca”. Nota del 15 de mayo.

http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leia/padilla_s_mf/capitulo2.pdf

ANEXOS

INSTRUMENTOS

Tabla 7

Ficha de observación

Ficha de observación			
Existe drenaje		si	no
Caudal	Bajo	medio	alto
Turbidez	Baja	medio	alto
color de sedimentación	Roja	Naranja amarillento	verde

Fuente: Elaboración propia, 2018

Tabla 8

Formato para la prueba de neutralización del DAM

Neutralización con lechada de cal al 10%		
Volumen añadido de cal (ml)	Peso de cal añadido (mg)	pH

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 9

Formato para los valores de concentración de metales en el DAM

Concentración de metal (ppm)					
pH	Arsénico	Cobre	Hierro	Plomo	Zinc

Fuente: Elaboración propia.


Tabla 10

Formato para valores de eficiencia de remoción de metales con lechada de cal al 10%


Eficiencia de remoción de metales (%)					
pH	Arsénico	Cobre	Hierro	Plomo	Zinc

Fuente: Elaboración propia.

INFORME DE ENSAYE DEL DRENAJE ACIDO DE MINA




LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL-DA CON REGISTRO N° LE-084



Registro N° LE-084

INFORME DE ENSAYO N° IE 0518251

ENSAYOS			QUÍMICOS			
Código Cliente	Bocamina					
Código Laboratorio	8616291-04					
Matriz de Agua	RESIDUAL					
Descripción	INDUSTRIAL					
Localización de la Muestra	Sector mina A-320/385 E-701142					
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados Metales Totales			
Plata (Ag)	mg/L	0.021	<LCM			
Aluminio (Al)	mg/L	0.025	59.36			
Arsenico (As)	mg/L	0.035	17.045			
Boro (B)	mg/L	0.027	<LCM			
Bario (Ba)	mg/L	0.001	0.013			
Berilio (Be)	mg/L	0.002	<LCM			
Cadmio (Cd)	mg/L	0.124	208.1			
Cadmio (Cd)	mg/L	0.002	0.855			
Cobalto (Co)	mg/L	0.002	0.028			
Cromo (Cr)	mg/L	0.008	0.067			
Cobre (Cu)	mg/L	0.026	41.18			
Hierro (Fe)	mg/L	0.020	752.1			
Mercurio (Hg)	mg/L	0.005	<LCM			
Níquel (Ni)	mg/L	0.010	2.647			
Plomo (Pb)	mg/L	0.003	0.158			
Litio (Li)	mg/L	0.018	51.69			
Manganeso (Mn)	mg/L	0.005	87.59			
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.003	<LCM			
Sodio (Na)	mg/L	0.027	3.035			
Níquel (Ni)	mg/L	0.006	0.197			
Fósforo (P)	mg/L	0.024	1.575			
Plomo (Pb)	mg/L	0.004	0.327			
Antimonio (Sb)	mg/L	0.007	0.156			
Selenio (Se)	mg/L	0.001	<LCM			
Silicio (Si)	mg/L	0.104	12.71			
Estadío (Sr)	mg/L	0.001	<LCM			
Estadío (Sr)	mg/L	0.002	1.273			
Talio (Tl)	mg/L	0.005	<LCM			
Talio (Tl)	mg/L	0.004	1.445			
Vanadio (V)	mg/L	0.004	0.494			
Zinc (Zn)	mg/L	0.023	89.52			



Cajamarca, 17 de Mayo de 2018.

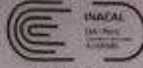
Página 3 de 5

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO
L. 1076 43.00070 SAN CRISTOBAL 1001 31.000209 CAJAMARCA - PERU

Fuente: Laboratorio Regional del Agua-CAJAMARCA

INFORME DE ENSAYE DE AGUAS

LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA
LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL
ORGANISMO PERUANO DE ACREDITACION INACAL - DA
CON REGISTRO N° LE-084



Registro N° LE - 084

INFORME DE ENSAYO N° IE 0518251

ENSAYOS			QUIMICOS					
Código Cliente			Arriba	Planta	Abejo	Galeras	Peña Blanca	Postera
Código Laboratorio			0518251-01	0518251-02	0518251-03	0518251-04	0518251-05	0518251-07
Matriz de Agua			NATURAL	NATURAL	NATURAL	USO Y CONSUMO	USO Y CONSUMO	USO Y CONSUMO
Descripción			Superficial	Superficial	Superficial	Bebida	Bebida	Bebida
Localización de la Muestra			200 m aguas arriba N:0502673, E:730790	vereda en río N:0502673, E:730790	200 m aguas abajo N:0502673, E:730790	Entrada N:0502673, E:730790	Medio N:0502673, E:730790	Salida N:0502673, E:730790
Parámetro	Unidad	LCM	Resultados Metales Totales					
Plata (Ag)	mg/L	0.017	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	0.044	<LCM
Aluminio (Al)	mg/L	0.022	0.501	5.927	3.749	<LCM	0.048	<LCM
Arsénico (As)	mg/L	0.030	<LCM	1.285	0.648	0.010	<LCM	<LCM
Boro (B)	mg/L	0.021	<LCM	<LCM	<LCM	0.070	<LCM	<LCM
Bario (Ba)	mg/L	0.002	0.032	0.028	0.025	0.013	0.010	0.010
Berilio (Be)	mg/L	0.002	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Bismuto (Bi)	mg/L	0.015	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Calcio (Ca)	mg/L	0.070	226.5	214.2	198.7	27.54	36.53	41.76
Cadmio (Cd)	mg/L	0.002	<LCM	0.042	0.028	<LCM	<LCM	<LCM
Cobalto (Co)	mg/L	0.002	<LCM	0.007	0.004	<LCM	<LCM	<LCM
Cromo (Cr)	mg/L	0.002	<LCM	0.003	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Cobre (Cu)	mg/L	0.014	0.023	2.824	1.927	<LCM	0.024	<LCM
Hierro (Fe)	mg/L	0.019	0.374	54.82	32.14	0.075	0.054	<LCM
Potasio (K)	mg/L	0.049	15.35	10.21	9.021	0.966	0.276	0.701
Litio (Li)	mg/L	0.004	0.005	0.015	0.011	0.009	<LCM	<LCM
Magnesio (Mg)	mg/L	0.017	2.521	6.412	5.373	0.77	2.174	1.341
Manganeso (Mn)	mg/L	0.002	0.444	7.879	4.839	0.011	0.006	0.002
Molibdeno (Mo)	mg/L	0.002	0.016	0.013	0.009	0.005	<LCM	<LCM
Sodio (Na)	mg/L	0.018	27.57	20.41	19.85	22.01	2.450	2.142
Niquel (Ni)	mg/L	0.002	0.002	0.015	0.012	<LCM	<LCM	<LCM
Fósforo (P)	mg/L	0.020	0.082	<LCM	<LCM	0.054	0.052	0.054
Plomo (Pb)	mg/L	0.003	<LCM	0.033	0.018	<LCM	<LCM	<LCM
Azulfre (S)	mg/L	0.085	197.8	244.5	207.7	27.380	1.806	10.75
Antimonio (Sb)	mg/L	0.005	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Selenio (Se)	mg/L	0.017	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Silicio (Si)	mg/L	0.060	5.493	6.344	6.121	7.534	6.512	4.399
Estroncio (Sr)	mg/L	0.002	1.079	0.903	0.788	0.264	0.189	0.127
Titanio (Ti)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Teluro (Te)	mg/L	0.003	<LCM	0.109	0.054	<LCM	<LCM	<LCM
Uranio (U)	mg/L	0.004	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM	<LCM
Vanadio (V)	mg/L	0.003	0.063	0.027	0.013	<LCM	<LCM	<LCM
Zinc (Zn)	mg/L	0.075	0.168	5.853	3.433	<LCM	0.02	0.020
Mercurio (Hg)	mg/L	0.0009	<LCM	<LCM	<LCM	-	-	-

Cajamarca, 17 de Mayo de 2018.


Página: 2 de 5



LABORATORIO REGIONAL DEL AGUA - GOBIERNO REGIONAL CAJAMARCA ASEGURA LA CONFIABILIDAD DE LOS RESULTADOS PRESENTADOS EN ESTE INFORME DE ENSAYO.
LUIS ALBERTO SANCHEZ S.N. URB. EL ROSARIO, CAJAMARCA - PERU

Fuente: Laboratorio Regional del Agua-CAJAMARCA

INFORME DE ENSAYE DE LA CAL VIVA



LABORATORIO QUIMICO METALURGICO
Análisis de Minerales Metálicos y No Metálicos

INFORME DE ENSAYE 160918-00010

SOLICITADO POR : ELISA CHUQUILIN INTOR Y GLADYS INTOR.
MUESTRA : Oxido de calcio – Cal viva granada
CANTIDAD DE MUESTRAS : 03
PROCEDENCIA : Concesión Juan de Dios I
FECHA DE RECEPCION : 16/09/2018
FECHA DE ENTREGA : 25/09/2018

DETERMINACIÓN	UNIDADES	M-1
CaO	%	98.12


DETERMINACIÓN	UNIDADES	M-2
CaO	%	97.76

DETERMINACIÓN	UNIDADES	M-3
CaO	%	97.87

DETERMINACIÓN	Resultados
Reactividad	Media
L.Q.I	2 a 4%

GRANULOMETRIA	Resultados
4" a +1"	87%
1"	15.2%

Trujillo, 18 de ABRIL de 2018


JUAN AGUIRRE CIEZA
ING. QUIMICO
PL. CIP. N° 189270

Daniel Hoyle N° 357 Urb. El Molino – Trujillo Cel: 991739253

E-mail: polimetals.clientes@gmail.com

Fuente: POLIMETALS LAB SCRL

FOTOS



Foto 1 Bocamina Prosperidad, empresa San Nicolás-Hualgayoc, Cajamarca.
Fuente: Elaboración propia.



Foto 2 Tesistas realizando el primer muestreo en Bocamina Prosperidad
Fuente: Elaboración propia.



Foto 3 Tesistas realizando el segundo muestreo en Bocamina Prosperidad
Fuente: Elaboración propia.



Foto 4 Codificación de muestras
Fuente: Elaboración propia.



Foto 5 Tesistas midiendo el pH del DAM en la bocamina
Fuente: Elaboración propia.



Foto 6 Muestras de DAM
Fuente: Elaboración propia.



Foto 7 Muestras del agua neutralizadas por método químico con lechada de cal al 10%
Fuente: Elaboración propia.