

OPTIMIZACIÓN EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES ÁCIDOS DE UNA COMPAÑÍA MINERA Y CUMPLIMIENTO DE LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES

Ing. Marlit Márquez Cerrón¹, Dr. Ernesto Osvaldo Aduvire²

¹Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. E-mail: marlit.marquez@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-2094-5718>

²Pontificia Universidad Católica del Perú. Docente Sección Minas. Facultad de Ciencias e Ingeniería. E-mail: eaduvire@pucp.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0214-0125>

³Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. E-mail: jlopezk@unmsm.edu.pe - ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4202-5292>

RESUMEN

Los metales pesados y la acidez que contiene el efluente ácido de mina causan daños significativos a los cuerpos de agua, suelos y otros organismos vivos, que a su vez son difíciles de eliminar a bajo costo y de manera efectiva. En el presente artículo se analiza la importancia de la optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos en una compañía minera, con la finalidad de cumplir los límites máximos permisibles (LMP), a partir de ello se elige el tratamiento idóneo para este tipo de efluente, se propuso el método activo por neutralización con hidróxido de calcio como reactivo principal en la PTAM, las aguas a tratar provienen principalmente de interior mina, aguas superficiales de contacto, planta concentradora (agua clarificada del depósito de relaves), una parte del agua tratada se reutiliza en el proceso de la planta concentradora y el excedente es vertido a un cuerpo receptor. Para optimizar el sistema de tratamiento se adquirieron bombas peristálticas para la dosificación de reactivos y sensores de pH, se optimiza el área de preparación de cal y la construcción de la PTAM, también se realizaron pruebas de sedimentación para determinar la concentración óptima de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, floculante y bisulfito de sodio. Finalmente se concluye con una remoción >99% de metales, por tanto, se cumple con los límites máximos permisibles del Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.

Palabras Claves: Efluente ácido, neutralización, sistema de tratamiento.

ABSTRACT

The heavy metals and acidity contained in acidic mine effluent cause significant damage to bodies of water, soils, and other living organisms, which in turn are difficult to remove cheaply and effectively.

This article analyzes the importance of optimizing the acid effluent treatment system in a mining company, to comply with the maximum permissible limits (LMP), from this, the ideal treatment for this type of effluent is chosen. The active method was proposed by neutralization with calcium hydroxide as the main reagent in the PTAM. The water to be treated comes mainly from the mine interior, surface contact water, and concentrator plant. (clarified water from the tailings dam), a part of the treated water is reused in the concentrator plant process and the surplus is discharged into a receiver body.

To optimize the treatment system, peristaltic pumps were acquired for the dosage of reagents and pH sensors, the lime preparation area, and the construction of the PTAM were optimized, sedimentation tests were also carried out to determine the optimal concentration of $\text{Ca}(\text{OH})_2$, flocculant, and sodium bisulfite.

Finally, it is concluded with a removal of >99% of metals, therefore, the maximum permissible limits of Supreme Decree No. 010-2010-MINAM are met.

Keywords: Acid effluent, neutralization, treatment system.

1. INTRODUCCIÓN

Los efluentes mineros sin tratamiento, se caracterizan por un pH extremadamente bajo, y un alto contenido de metales disueltos y sulfatos (Pe reira et al., 2020), por ende, son una de las principales causas de contaminación de las fuentes de aguas superficiales y subterráneas en el mundo (Nguegang et al., 2022). Se conocen muchos métodos para el tratamiento de los efluentes ácidos, las cuales se clasifican en tratamiento pasivos, activos e integrados (Wibowo et al., 2022), en algunos casos la optimización del sistema de tratamiento de efluentes ácidos mediante tratamiento activo por neutralización con cal viva o cal hidratada (Hou et al., 2021) ya que se adapta a cualquier acidez o caudal.

La minería es una actividad económica que permite la explotación y extracción de minerales a través de trabajos subterráneos y a cielo abierto, es vital en la economía empresarial y de los Estados, pero se debe considerar el respecto al entorno ambiental e identificar los posibles conflictos que se podrían generar en el territorio (Viana, 2018), el problema más significativo del sector minero, es justamente la generación de drenaje ácido debido a la explotación y extracción de minerales (Levio - Raiman et al., 2021), estas aguas resultan de la oxidación de sulfuros metálicos, especialmente del Fe, (generalmente FeS_2), en presencia de oxígeno, agua y actividad bacteriana (Sulonen et al., 2021), además se afirma que contienen sólidos, elementos traza, compuestos inorgánicos y metales disueltos; y la acidez del agua adquiere un alto poder corrosivo (Salazar Giraldo, Hernandez Angel, & Arango Ruiz, 2012), a partir de ello se constituyen en un riesgo ambiental ya que pueden transportar metales aguas abajo afectando diversos ecosistemas y limitando el uso del agua (Lee et al., 2022).

Unidad minera en estudio está ubicado a una altitud promedio de 4 400 m.s.n.m. en la Sierre Central de Perú, la cual realiza actividades mineras de exploración, explotación y beneficio de minerales polimetálicos con altos contenidos o leyes de plomo, plata, zinc y cobre, pero, con un deficiente manejo de sus efluentes, esta problemática se agravaba en temporada de lluvias por el incremento en un 200% de caudal y contaminantes.

Estas circunstancias han inducido a buscar una optimización del sistema de tratamiento de los efluentes ácidos a fin de cumplir con la legislación vigente para descargas de operaciones minero-metalúrgicas como son los Límites Máximo-Permisibles (LMP) y los Estándares de Calidad

Ambiental (ECA) de agua en caso de descargar a cuerpo receptor.

La operación minera cuenta con un plan de manejo de aguas que consiste en captar todas las aguas provenientes de sus operaciones para su respectivo tratamiento mediante procesos de neutralización y floculación, el cual presentaba deficiencias en capacidad de las pozas de sedimentación, consumo excesivo de reactivos, excedencias en los límites máximos permisibles y no cuenta con equipos necesarios para la dosificación de reactivos y control de pH, por ello, en este caso, para la mejora del tratamiento se ha elevado el pH del efluente ácido a 9.5 - 9.8 añadiendo una solución de hidróxido de calcio en el área de pretratamiento, para luego dosificar floculante al ingreso de la planta de tratamiento de agua de mina (PTAM) para acelerar la sedimentación de los SST y metales pesados, también se han implementado bombas peristálticas para la dosificación de reactivos, sensores de pH y se optimizó el área de preparación de hidróxido de calcio, además se realizó una caracterización del efluente ácido para determinar las concentraciones óptimas de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ y floculante, como etapa final se regularizó el pH del efluente tratado con metabisulfito de sodio para descargar con un $\text{pH} < 8.5$ y así cumplir con los LMP del Decreto Supremo N° 010-2010-MINAM.

2. METODOLOGÍA.

El tipo de investigación es aplicada con un diseño experimental, ya que se realiza análisis para comprobar la eficacia de la optimización propuesta y reducir los impactos ambientales.

Como población de estudio se ha considerado los efluentes ácidos provenientes de la compañía Minera. La muestra está representada por el efluente tratado, monitoreo en el punto autorizado. La selección de la muestra es probabilística (aleatorio simple), se trata del análisis del componente de acuerdo a los criterios establecidos.

Respecto a las técnicas de evaluación se ha optado por el análisis documental y observacional, y como instrumentos de la investigación se han considerado las siguientes:

- ✓ Caracterización del efluente ácido.
- ✓ Check List de Operación.
- ✓ Check List de equipos.
- ✓ Registro histórico de análisis fisicoquímico del vertimiento.
- ✓ Análisis fisicoquímico del efluente tratado.
- ✓ Análisis fisicoquímico del agua del cuerpo receptor antes y después del vertimiento.

Previo al dimensionado del sistema de tratamiento se debe realizar una adecuada caracterización geoquímica de los drenajes procedentes de las instalaciones mineras y debe estar basada sobre mediciones de parámetros como pH, Eh, OD, CE, SST, caudal, sulfatos y análisis químico de los drenajes en concentraciones totales y disueltas, estos últimos tienen gran influencia sobre el consumo de reactivos en el tratamiento.

El estudio aportará el conocimiento teórico para la mejora del sistema de tratamiento, primero al identificar las deficiencias en el tratamiento y luego con los resultados de la mejora u optimización evaluar el beneficio de la gestión minera. En esta investigación se establece realizar la caracterización del efluente ácido, pruebas piloto (concentración, dosificación, preparación de reactivos), requerimiento de equipos y construcción de una PTAM para lograr la optimización del sistema de tratamiento y poder cumplir con los límites máximos permisibles.

Entendiéndose a los efluentes industriales como sustancias contaminantes disueltas y/o en suspensión, orgánicas o inorgánicas con cierta toxicidad, aun cuando están en suspensión. En el caso de estudio, los drenajes ácidos de mina (DAM), lo conforman aguas de escorrentía y aguas de contacto provenientes de las operaciones mineras y principalmente de la planta concentradora y depósito de relaves que se produce por reacciones de oxidación, cuando los minerales quedan expuestos a oxígeno atmosférico y agua en épocas de lluvia, lo que ocasiona que el oxígeno y/o el agua oxiden al azufre a una tasa mayor de lo que se reduce, promoviendo la movilización del azufre y de los metales que formaban parte del mineral (Moreno 2014), esto hace variar los valores de pH, acidez, alcalinidad, sulfatos, nutrientes, metales (disueltos o totales), núclidos radiactivos, sólidos disueltos totales (SDT) y sólidos suspendidos totales (SST), naturalmente va a depender del tipo de yacimiento que se explote, yacimientos con mineralogías que contienen sulfuros como la pirita en contacto con aire y agua se va a potenciar la generación de drenaje ácido, principalmente en los depósitos de desmontes y relaves que almacenan residuos mineros reactivos conocidos como materiales PAG (Potencialmente generadores de acidez), así como en las superficies excavadas, de los tajos abiertos, túneles y pilas de lixiviación. Una de las principales preocupaciones ambientales relacionadas con la minería de sulfuros es la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas algunos de esos efectos hidrológicos son:

- ✓ Deficiente de la calidad del agua, inapropiada para el consumo humano y otros usos.

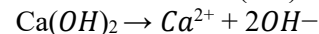
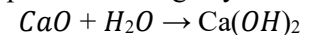
- ✓ Daño ecológico, que altera o elimina las comunidades biológicas naturales existentes en los cursos de agua.
- ✓ Deterioro del paisaje

2.1 Tratamiento por métodos activos

Los sistemas activos generalmente se refieren a la aplicación continua de materiales alcalinos para neutralizar los efluentes ácidos de la mina y precipitar los metales. Para tratar los drenajes ácidos de mina por métodos químicos, comúnmente denominados tratamientos convencionales, es necesario conocer a fondo las reacciones de oxidación que llevan a la formación de sustancias de carácter ácido (Balladares et al., 2018).

El tratamiento activo más empleado es el sistema convencional se basa en la adición de sustancias alcalinas, generalmente cal, cal hidratada, caliza triturada, sosa cáustica, carbonato sódico o amoniaco, con el fin de conseguir la neutralización del ácido y alcanzar las condiciones adecuadas para la precipitación de los metales pesados (Aduvire, 2006); Además, son utilizados agentes floculantes poliméricos para acelerar la separación sólido/líquido. El proceso más común es donde es utilizada la cal viva (CaO), por su menor costo en minas con drenajes con pH entre 3.5 y 5.0 (Montoya, 2015).

Esta sustancia alcalina, presenta las siguientes reacciones en presencia de agua y metales.



El proceso convencional es normalmente dividido en etapas: neutralización de agua ácida con cal y precipitación de los iones metálicos, en forma de hidróxidos seguido de espesamiento y/o filtración del lodo formado (Cadorin et al., 2007).

2.2 Selección del reactivo para el tratamiento químico de efluentes ácidos

Consiste en dosificar con sustancias alcalinas como el óxido de calcio, sosa caustica, carbonato sódico, con la finalidad de neutralizar las aguas ácidas y se realice la precipitación de los metales, los cuales precipitan como hidróxidos insolubles en un determinado rango de pH, como los considerados en la Tabla 1.

Tabla 1. Rango de pH de precipitación de metales

Elemento	pH (precipitado)
Hierro	Fe ⁺³ entre 3.7 a 6 y Fe ⁺² superior a 8.5
Manganeso	Superior a 9.5
Aluminio	<ul style="list-style-type: none"> • 5.5 (precipita en el agua). • Superior a 8.5 (soluble)
Zinc	Superior a 8.5

Para determinar el tipo de tratamiento, se tiene que evaluar la concentración y los contaminantes presentes en el efluente ácido, para ello, se realizarán una serie de ensayos de neutralización en el test de

jarras y pruebas de precipitación con los conos Imhoff, en los que se elige los reactivos más apropiados (Tabla 2) y la dosificación hasta alcanzar el pH de tratamiento óptimo. En el caso de estudio y atendiendo al costo de tratamiento se ha elegido como reactivo de tratamiento la Cal apagada Ca(OH)₂.

Generalmente se trabaja a un pH de 9.0, pues en condiciones más alcalinas también se incrementa la solubilidad del Pb y Zn. La precipitación de Hidróxidos en los diversos tratamientos activos de efluentes ácidos se realizó en 3 pasos.

- ✓ Oxidación química (para convertir Fe²⁺ en Fe³⁺)
- ✓ Dosis con álcalis sal iónica básica de un metal alcalino, especialmente Ca(OH)₂ Na(OH)₂, y NaHCO₃.
- ✓ Sedimentación de flóculos.

Tabla 2. Sustancias utilizadas para la remoción de iones metálicos pesados por sedimentación.

Agente de precipitación	Ventajas	Desventajas
Cal apagada Ca(OH) ₂	El costo es bajo Tratar caudales altos	Contiene Impurezas, precipitación lenta CaSO ₄ , CaCO ₃
Carbonato sódico	Soluble. Rápido	Caudales pequeños, Costo alto Concentraciones bajas de hierro
Hidróxido sódico	Limpio. Rápido	Para caudales pequeños, Costo relativamente alto, Peligro en la manipulación
Amoníaco	Soluble. Rápido	Formación de complejos, nitrato amónico residual
Sulfuro sódico	Productos muy insolubles	Desprende H ₂ S
Ácido sulfúrico	Rápido. Costo bajo	Precipita CaSO ₄
Ácido clorhídrico	Rápido. Limpio	Costo relativamente alto
Dióxido de carbono	Disponibles gases combustibles	

Fuente: Tomado de Aduvire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento.

En algunos casos es posible tratar efluentes ácidos combinando técnicas activas y pasivas, conocido como tratamiento integrado, que implica el uso de un proceso de tratamiento activo, como la neutralización aguas arriba y la purificación del agua resultante aguas abajo utilizando humedales o biobarreras (Masindi et al., 2018).

Una vez obtenida las dosis y los tiempos de residencia se procede al dimensionado del sistema de tratamiento, para ello, se van a considerar como valores de referencia los LMP de la normativa vigente en Perú que corresponden a descargas de operaciones mineras (Tabla 3).

Los límites Máximos Permisibles (LMP), son medidas de la concentración de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, que caracterizan a un efluente o una emisión, que al ser excedida causa o puede causar daños a la salud, al bienestar humano y al ambiente. Su cumplimiento es exigible legalmente por la respectiva autoridad competente.

Tabla 3. Límites Máximos permisibles para la descarga de efluentes líquidos de actividades minero – metalúrgicos D.S. 010-2010-MINAM

Parámetro	Unid.	Unidades Nuevas	
		Cualquier Momento	Promedio Anual
pH	u.e.	6-9	6-9
SST	mg/l	50	25
Aceites/Grasas	mg/l	20	16
Cianuro (t)	mg/l	1,0	0,8
Arsénico (t)	mg/l	0,1	0,08
Cadmio (t)	mg/l	0,05	0,04
Cromo (t)	mg/l	0,1	0,08
Cobre (t)	mg/l	0,5	0,4
Hierro (d)	mg/l	2,0	1,6

Parámetro	Unid.	Unidades Nuevas	
		Cualquier Momento	Promedio Anual
Plomo (t)	mg/l	0,2	0,16
Mercurio (t)	mg/l	0,002	0,0016
Zinc (t)	mg/l	1,5	1,2

Nota: (t)=Concentración total; (d)=Concentración disuelta.

3. DIAGNÓSTICO Y RESULTADOS

3.1 Estado del sistema de tratamiento antes de la optimización

Se realizó, una evaluación del sistema de tratamiento de aguas ácidas de mina antes de la optimización. En las Tablas 4 y 5 se presentan las observaciones identificadas en la preparación y dosificación de reactivos, así como las acciones correctivas propuestas.

Tabla 4. Identificación del estado de los equipos en el área de preparación de reactivos

Actividad	Observación	Acción correctiva
Preparación de Lechada de cal	Para la preparación y distribución del hidróxido de calcio, solo están utilizando un tanque de 6x6, en el cual se evidencia que no hay un buen acondicionamiento de este reactivo.	Utilizar el tanque que se encuentra inoperativo para la preparación y acondicionamiento, el actual para almacenamiento y distribución
	Para medir la cantidad de óxido de calcio utilizan indistintamente una carretilla o un balde.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del óxido de calcio.
	No se realiza el acondicionamiento mínimo de una hora de la lechada de cal.	Mejorar el procedimiento de preparación de hidróxido de calcio.
	No hay un control adecuado sobre la concentración de la lechada de cal, debido a la preparación aleatoria por parte del operador (de acuerdo con sus mediciones puntuales de pH con el papel panpeha).	Definir la concentración del hidróxido de calcio para el tratamiento.
Preparación de Metabisulfito de sodio	No cuentan con un recipiente patrón para la medición de la cantidad de metabisulfito a usar.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del metabisulfito de sodio.
	La cantidad de metabisulfito que usan para la preparación es diferente en cada guardia, ya que no tienen una concentración específica.	Establecer una concentración de trabajo.
Preparación de floculante	Para medir el floculante no cuentan con un recipiente patrón. Solo adicionan la cantidad que cada operario crea conveniente.	Estandarizar un recipiente patrón para la medición del floculante. Establecer una concentración de trabajo.

Tabla 5. Dosificación de reactivos

Actividad	Observación	Acción correctiva
Dosificación de reactivos	La dosificación de reactivos se realiza mediante válvulas (manual), por lo que la dosificación no es constante.	Utilizar bombas peristálticas
	La dosificación de reactivos solo se distribuye en un punto y por tanto no hay una buena homogenización.	
	La ubicación de los puntos de dosificación de floculante no es la correcta, porque existe mucha turbulencia y los flóculos ya formados se rompen	Utilizar quenas dosificadoras para la correcta distribución del reactivo.
	La Dosificación del floculante se realiza en dos puntos, gastando innecesariamente el reactivo.	Realizar cambios de ubicación de puntos de dosificación.
	No se evidencia el control y verificación de la dosificación de reactivos	Implementar un formato para el control y verificación de la dosificación.

En la Tabla 6 se muestra las condiciones operacionales precarias de la planta convencional y las soluciones técnicas para optimizar el diseño y funcionamiento de

la Planta de tratamiento de aguas ácidas de mina (PTAM) propuesto.

Tabla 6. Control de parámetros operacionales

Actividad	Observación	Acción correctiva
Control de pH	<ul style="list-style-type: none"> Se utiliza el papel indicador panpeha para la medición de pH, El cual no es un método recomendable para el proceso, ya que se debe cumplir con LPM. La realizan la verificación de los potenciómetros estacionarios Durante la verificación de pH, se evidenció una diferencia significativa entre los resultados del potenciómetro de asuntos ambientales y el del laboratorio registrado AGQ. 	<ul style="list-style-type: none"> Implementar un potenciómetro portátil calibrado para verificar los resultados de los potenciómetros estacionarios. Implementar un registro de verificación diaria del potenciómetro portátil. Implementar un cronograma de calibración interna de los potenciómetros estacionarios.
Control de la medición del caudal	<ul style="list-style-type: none"> La medición de caudal lo realizan en un punto del canal donde existe demasiada turbulencia. No se cuenta con ningún equipo que facilite la medición de caudal. 	<ul style="list-style-type: none"> Reubicar el punto de medición de caudal Implementar un correntómetro para la medición de caudales.

En la zona de pretratamiento también se han identificado desviaciones a corregir para poder utilizarlo con la PTAM propuesta (ver Tabla 7).

Tabla 7. Pretratamiento de aguas

Área	Observación	Acción correctiva
Poza de recepción de aguas	<ul style="list-style-type: none"> • Existen tuberías en desuso. • Las tuberías no están rotuladas. 	<ul style="list-style-type: none"> • Retirar y evaluar la operatividad de las tuberías • Identificar y rotular tuberías
Zona de almacén	<ul style="list-style-type: none"> • Se encuentra en mal estado 	<ul style="list-style-type: none"> • Mejorar las condiciones del almacén
Zona de Preparación de reactivos	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de mantenimiento de tanques • Falta de identificación de los tanques • Derrame de cal en el suelo 	<ul style="list-style-type: none"> • Pintar los tanques de preparación de reactivos. • Realizar el rotulado de los tanques con el nombre del reactivo y la capacidad.
Pozas de Sedimento	<ul style="list-style-type: none"> • No cuenta con cronograma de limpieza. 	<ul style="list-style-type: none"> • Implementar un cronograma de limpieza.
Poza de Filtración	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de mantenimiento de la poza de filtración. • Falta realizar orden y limpieza en los alrededores. • Existe tuberías en desorden por toda el área 	<ul style="list-style-type: none"> • Realizar el mantenimiento de la poza de sedimentación (retirar el lodo, cambio de geomembrana) • Evaluar y Recuperar las tuberías inoperativas

En la Tabla 8 se presentan las no conformidades de Planta de Tratamiento Convencional (PTC) y las medidas correctivas a considerar en la PTAM propuesta.

Tabla 8. Identificación de deficiencias en la PTC y las acciones correctivas a implementar

Área	Observación	Acción correctiva
Planta PTC	Se evidencia el techo de los tableros de control de la planta PTC en mal estado.	Reparar y/o cambiar el techo
Poza de contingencia	Falta mantenimiento a la poza de contingencia.	Realizar el mantenimiento de la poza de contingencia (retirar el lodo, cambio de geomembrana)
Poza de lodos	Falta mantenimiento a la poza de lodos.	Realizar el mantenimiento de la poza de lodos (retirar el lodo, cambio de geomembrana)

En la Tabla 9 se muestra las excedencias en As, Cu, Zn y otros en el vertimiento del efluente minero, tanto medida en el programa de monitoreo como la Autoridad supervisora (OEFA), aspecto que hace urgente la implementación de otra planta de tratamiento de efluente de la Unidad Minera.

Tabla 9 Registro del efluente minero antes del tratamiento comparando con los LMP

Elementos	LMP	OEFA 28/05/21	28/05/21	28/07/21	28/09/21	29/10/21
Cianuro total	1	0.0571	0.0628	0.0186		0.0008
Arsénico total	0.1	1.5367	1.5561	0.18208	0.4757	0.11249
Cadmio total	0.05	0.02577	0.02605	0.01539	0.01841	0.00254
Cobre total	0.5	0.512	0.5415	0.0467	0.0698	0.0219
Mercurio total	0.002	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007	0.00007
Plomo total	0.2	0.00421	0.0074	0.01304	0.12231	0.00665
Zinc total	1.5	2.91	3.88	1.44	2.51	0.674
Fe disuelto	2	0.03	0.03	0.03	0.91	0.1

Respecto a la calidad de agua que ingresa a la Planta de tratamiento (Tabla 10) se observa que algunas concentraciones como Pb, Cu, Zn, Fe, Mn y otros están por encima de los Valores de referencia .

Tabla 10. Reporte de calidad de agua antes del tratamiento

Fecha	pH	SST mg/L	Análisis	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
				Pb	Cu	Zn	Fe	Mn	As	Cd
Nov-20	7.3	2503	MT	20.39	2.32	238.04	58.18	25.91	-	-
			MD	0.06	0.02	37.57	0.18	15.30	-	-
Dic-20	6.63	859	MT	8.49	3.11	102.19	40.32	17.54	-	-
			MD	0.09	0.55	56.81	0.90	12.43	-	-
Ene-21	4.04	1372	MT	12.81	10.06	198.64	143.55	19.16	-	-
			MD	0.68	4.51	127.65	6.88	13.49	-	-
Feb-21	5.62	2651	MT	25.02	14.09	243.77	234.24	24.42	-	-
			MD	0.17	1.83	126.66	7.08	15.97	-	-
Mar-21	4.47	2717	MT	15.56	12.19	244.03	179.66	21.84	-	-
			MD	0.72	4.05	140.13	15.18	14.83	-	-
Abr-21	4.38	5629	MT	29.38	19.30	273.65	379.92	27.87	-	-
			MD	0.86	4.99	180.57	14.87	21.16	-	-
May-21	5.28	277	MT	2.92	4.07	152.14	44.79	22.54	-	-
			MD	0.87	2.79	137.01	14.33	19.36	-	-
Jun-21	7.22	225	MT	0.69	1.28	62.50	22.36	10.33	-	-
			MD	0.08	0.16	35.98	0.80	6.29	-	-
Jul-21	7.28	183	MT	0.45	0.95	47.14	18.74	8.99	-	-
			MD	0.09	0.11	31.89	0.86	5.19	-	-

Fecha	pH	SST	Análisis	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
		mg/L		Pb	Cu	Zn	Fe	Mn	As	Cd
Ago-21	7.03	210	MT	0.73	1.26	63.94	32.29	12.53	-	-
			MD	0.07	0.13	39.86	1.19	8.27	-	-
Set-21	6.72	241	MT	0.92	1.25	88.94	32.39	17.37	-	-
			MD	0.08	0.21	69.22	3.04	14.06	-	-
Oct-21	6.72	186	MT	0.72	1.45	79.60	40.15	14.72	-	-
			MD	0.14	0.64	55.06	7.47	8.93	-	-
Nov-21	7.11	226	MT	1.03	1.66	67.24	24.71	12.59	-	0.32
			MD	0.07	0.22	40.65	0.33	8.09	-	0.26
Dic-21	5.62	166	MT	0.60	5.52	110.53	41.57	17.04	-	0.76
			MD	0.20	2.74	94.19	8.10	12.92	-	0.67

Nota: (MT)= Concentración total; (MD)=Concentración disuelta.

3.2 Sistema de tratamiento de aguas de mina (PTAM) después de la optimización

La Planta de tratamiento de aguas de mina (PTAM) tiene una capacidad de 150 litros/segundos y va a tratar las aguas provenientes de las bocaminas, de la Planta Concentradora, de las pozas de subdrenajes, de las aguas de contacto y del Depósito de Relaves mediante el proceso de neutralización y precipitación por floculación.

El agua ya tratada se va a utilizar para el procesamiento de minerales en planta concentradora, limpieza de planta, preparación de reactivos y sellos de bombas de relave y solo el excedente es vertido directamente al cuerpo receptor, previo cumplimiento de los LMP. Para la evacuación de los lodos tanto de las cámaras de floculación, clarificación como los tanques decantadores y tanques clarificadores, se cuenta con una poza de lodos, desde ese punto se bombea al Depósito de Relaves. En el caso de alguna emergencia se cuenta con un grupo electrógeno.

La PTAM trata las aguas provenientes de las instalaciones mineras y está compuesta por los siguientes dispositivos:

- ✓ Recepción de aguas.
- ✓ Adición de reactivos.
- ✓ Cámaras de floculación
- ✓ Cámaras de clarificación
- ✓ Cámara de lodos
- ✓ Decantación y clarificación en Planta Convencional

- ✓ Descarga del agua residual industrial tratada o efluente.
- ✓ Disposición de Lodos.

La adición del hidróxido de calcio al 2.0% para estabilizar el pH de trabajo (9.0 a 9.5) se realiza en el cajón de recepción de la PTAM. Una vez que el agua pasa por el cajón de recepción, se adiciona el floculante, mediante un sistema dispersor para que se distribuya uniformemente, el cual consta de una tubería metálica luego ingresa a las cámaras de floculación.

En la Cámara de floculación se dosifica floculante al 0.06% para buscar la formación de flóculos consistentes en peso, a mayor peso mayor será la velocidad de sedimentación y por lo tanto será mayor la eficiencia de la planta, la dirección del flujo es en zig-zag y del tipo de resalto hidráulico, por la presencia de tabiques de madera que hacen que se homogenice aún más la mezcla entre el agua a tratar y los reactivos que aceleran el proceso de sedimentación lo cual motiva la formación de los flóculos.

El paso del agua de la zona de floculación a la zona de clarificación se realiza mediante un canal interno y mediante compuertas se controla el ingreso a cada unidad de clarificación, esto permite repartir el caudal de entrada en partes proporcionales.

El agua que ingresa a cada unidad de clarificación se distribuye en toda la cámara, para este fin se cuenta con un canal central de doble fondo, siendo éste el encargado de distribuir el caudal a cada una de las unidades de clarificación.

La zona de clarificación está conformada por pozas que en su interior están instaladas placas inclinadas y espaciadas en el plano horizontal.

El agua fluye en dirección vertical a través de las vinilonas donde los sólidos quedan retenidos y se depositan al fondo de la poza, además de mermar la velocidad del agua, la dirección del agua es ascendente ya que ingresa por la parte inferior de los clarificadores y sube hacia las quenas de drenaje de agua clarificada, esto permite que los flóculos más finos aun contenidos en el agua por el peso descendan hacia el fondo del clarificador.

También se ha considerado una cámara de Lodos que permite evacuar los lodos cuando se realiza su mantenimiento, estas cámaras (zona de floculación y clarificación), están comunicadas mediante compuertas con todo el sedimentador; desde cada una de estas cámaras se descargan los lodos sedimentados. Después de pasar el agua por la PTAM, el agua es enviada por gravedad hacia las pozas de la planta convencional, llegando a un cajón metálico y luego mediante tubería es enviada a un segundo tanque metálico o acondicionador (8'x8') con agitación, el cual distribuye en forma paralela a tres tanques (17'x11', 8'x8' y 9'x10').

Luego el agua es enviada a los decantadores (23'x14'), clarificadores (12'x13) y a dos tanques 9'x10' para poder captar los posibles sólidos que hayan pasado.

El agua tratada se descarga a un cajón metálico (50 m3) de recepción. El efluente es enviado hacia el proceso en planta concentradora y el excedente es bombeado con una bomba hidrostal de 100 HP por una tubería HDPE de 10" y descargado directamente en al

cuerpo receptor, se cuenta con una segunda bomba de las mismas características a la anterior con su respectiva línea con la finalidad de tener mayor evacuación del agua excedente en caso se requiera. Asimismo, se cuenta con una tercera bomba Stand By cerrando de esa manera el círculo y teniendo aguas dentro de los parámetros exigidos. Los sólidos generados en la PTAM, decantadores y clarificadores de Planta Convencional son evacuados a la poza de lodos, para luego ser bombeado al Depósito de relaves, mediante una tubería HDPE 6" impulsadas por la bomba WARMAN 4D-AHF.

Para el control y seguimiento de la eficiencia del tratamiento de las aguas industriales, se realiza el monitoreo constante del pH, para lo cual se tiene potenciómetros estacionarios en la entrada y salida de la planta de tratamiento, a la vez se verifica estos equipos con potenciómetros portátiles calibrados, cabe mencionar que se tiene controles automáticos de dosificación con la instalación de bombas dosificadoras para la cal y el bisulfito.

3.3 Resultados del efluente tratado en la PTAM después de la optimización

Cuando se completa el proceso de optimización del sistema de tratamiento del agua de mina en la PTAM se aprecia que no existe excedencias respecto a los LMP de referencia (tablas 11 y 12). Los reactivos que se usa en la PTAM es Hidróxido de calcio, floculante y metabisulfito de sodio, aplicando en las dosis apropiadas permiten obtener agua tratada que cumple con los LMP vigentes para descarga de operaciones minero-metalúrgicas.

	LMP	Ene-22	Feb-22	Mar-22	Abr-22	May-22	Jun-22	Jul-22	Ago-22
Cromo VI	0.1			<0.008		0.005			
Cianuro total	1			0.0008		0.0008			
Arsénico total	0.1	0.02792	0.06427	0.01364	0.0304	0.03826	0.0496	0.05393	0.0661
Cadmio total	0.05	0.02293	0.04345	0.00257	0.03337	0.00672	0.00142	0.00667	0.002
Cobalto total		0.02745	0.00539	0.0007	0.01342	0.00679	0.02866	0.01406	0.00384
Cobre total	0.5	0.0814	0.2113	0.0102	0.4135	0.02243	0.0645	0.00871	0.00326
Mercurio total	0.002	0.00084	0.00007	0.00007	0.00007	0.0004	0.00009	0.00009	0.00009
Plomo total	0.2	0.0061	0.09943	0.01054	0.01442	0.0047	0.0155	0.0112	0.0025
Selenio total		0.0057	0.00004	0.00004	0.00004	0.0013	0.0056	0.002	0.0032
Zinc total	1.5	1.16	0.96	0.215	1.03	0.4491	0.2102	1.2686	0.2511
Fe disuelto	2		1.2	0.03	0.03	0.0013	0.0037	0.0178	0.0073

Tabla 11. Calidad del agua tratada y cumplimiento de los LMP.

Tabla 12. Resultados obtenidos después del tratamiento en la PTAM optimizada

Mes	Caudal		pH		TSS		Análisis	Pb		Cu		Zn		Fe		Cd	
	L/s	LMP	Unid	LM P	mg/L	LM P		mg/L	LM P	mg/L	LM P	mg/L	LM P	mg/L	LM P	mg/L	
Feb-22	--	>6;<9	8.56	50	21	MT	0.2	0.06	0.50	0.20	1.50	0.76	N.A.	0.56	0.05	0.02	
						MD		0.04		0.11		0.62	2.00	0.04		0.01	
Mar-22	--	>6;<9	8.64	50	16	MT	0.2	0.06	0.50	0.11	1.50	0.86	N.A.	0.33	0.05	0.01	
						MD		0.03		0.06		0.33	2.00	0.04		0.01	
May-22	100.13	>6;<9	8.58	50	14	MT	0.2	0.05	0.50	0.30	1.50	0.41	N.A.	0.07	0.05	0.01	
						MD		0.04		0.21		0.18	2.00	0.03		0.00	
Jun-22	--	>6;<9	8.70	50	12	MT	0.2	0.03	0.50	0.33	1.50	0.32	N.A.	0.10	0.05	0.01	
						MD		0.01		0.28		0.15	2.00	0.03		0.01	
Jul-22	96.64	>6;<9	8.36	50	10	MT	0.2	0.04	0.50	0.08	1.50	0.65	N.A.	0.11	0.05	0.01	
						MD		0.02		0.06		0.44	2.00	0.04		0.00	

Nota: (MT)= Concentración total; (MD)=Concentración disuelta.

Las mejoras introducidas en el proceso y en el sistema de tratamiento en la PTAM permite un mejor control ambiental en la gestión de las aguas de mina y promueve el desarrollo de proyectos mineros sostenibles.

4. CONCLUSIONES

- La optimización del sistema de tratamiento en la PTAM permite descargar aguas con una calidad óptima para descarga a un cuerpo receptor y que cumple con los LMP de referencia, por tanto,

ayuda a la conservación de los ecosistemas acuáticos del entorno y en el caso del agua que se recircula no afecta la recuperación en la planta concentradora.

- Las concentraciones de carga metálica del agua tratada están muy por debajo de los valores y referencia como los ECA de agua y LMP vigentes, y que son de obligado cumplimiento para el sector minero.

REFERENCIAS

Adivire, O. (2006). Drenaje ácido de mina generación y tratamiento. Instituto geológico y minero de España dirección de recursos minerales y Geoambiente. Madrid, España

Aponte E. W. (2020) Neutralización y coagulación del efluente ácido de mina para la precipitación de metales totales en la compañía minera aurífera santa rosa s.a. Escuela de posgrado de la facultad de ingeniería metalúrgica y de materiales de la Universidad Nacional del Centro del Perú.

Balladares, E., Jerez, O., Parada, F., Baltierra, L., Hernández, C., Araneda, E., & Parra, V. (2018). Neutralization and co-precipitation of heavy metals by lime addition to effluent from acid plant in a copper smelter. *Minerals Engineering*, 122, 122–129. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.03.028>

Canales R., et al. (2007) mitigación de aguas ácidas

provenientes de las minas subterráneas-caso huarón”. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Universidad Nacional mayor de Santos Marcos

Carneiro Brandão Pereira, T., Batista dos Santos, K., Lautert-Dutra, W., de Souza Teodoro, L., de Almeida, V. O., Weiler, J., Homrich Schneider, I. A., & Reis Bogo, M. (2020). Acid mine drainage (AMD) treatment by neutralization: Evaluation of physical-chemical performance and ecotoxicological effects on zebrafish (*Danio rerio*) development. *Chemosphere*, 253, 126665. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.126665>

Guillen (2020) vertimiento de efluentes mineros de mina marta en la contaminación de las aguas del rio tinyacella. Unidad de posgrado. Facultad de ingeniería

- de minas. Universidad nacional del centro del Perú, http://info.igme.es/sidpdf/113000/258/113258_000001.pdf [links]
- Hou, Q., Fang, D., Wang, D., Liang, J., & Zhou, L. (2021). Integration of cascaded aeration and neutralization for the treatment of acid mine drainage: Insights into the formation of jarosite. *Hydrometallurgy*, 206, 105755. <https://doi.org/10.1016/J.HYDROMET.2021.105755>
- Lee, G., Han, J., Jang, M., & Kim, M. (2022). Long-term treatment of acid mine drainage by alkali diffusion ceramic reactor: Simultaneous metal removal mechanisms. *Chemosphere*, 298, 134186. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.134186>
- Levio-Raiman, M., Briceño, G., Schalchli, H., Bornhardt, C., & Diez, M. C. (2021). Alternative treatment for metal ions removal from acid mine drainage using an organic biomixture as a low cost adsorbent. *Environmental Technology & Innovation*, 24, 101853. <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2021.101853>
- Masindi, V., Madzivire, G., & Tekere, M. (2018). Reclamation of water and the synthesis of gypsum and limestone from acid mine drainage treatment process using a combination of pre-treated magnesite nanosheets, lime, and CO₂ bubbling. *Water Resources and Industry*, 20, 1–14. <https://doi.org/10.1016/J.WRI.2018.07.001>
- MINAM (2012) glosario de términos para la gestión ambiental peruana dirección general de políticas, normas e instrumentos de gestión ambiental.
- Montoya, J. (2015). Identificación de drenajes ácidos de mina con sensores remotos (tesis de maestría). Universidad nacional de colombia, medellín, colombia.
- Moreno, T. (2014). Enriquecimiento de comunidades sulfato reductoras degradadoras de acetato en condiciones ácidas (tesis de maestría). Instituto potosino de investigación científica y tecnológica, a, c, san luis potosí
- Nguegang, B., Masindi, V., Msagati Makudali, T. A., & Tekere, M. (2022). Effective treatment of acid mine drainage using a combination of MgO-nanoparticles and a series of constructed wetlands planted with *Vetiveria zizanioides*: A hybrid and stepwise approach. *Journal of Environmental Management*, 310, 114751. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114751>
- Patiño t., j. C. (2022) sistema de tratamiento activo mediante neutralización con óxido de calcio en solución, para la remoción de concentraciones de hierro y aluminio del drenaje ácido de mina de la unidad minera arasi, ocuviri-puno, 2019. Unidad de posgrado de la facultad de ingeniería ambiental y de recursos naturales. Universidad nacional del callao.
- Puente R., A. E. (2019) Optimización del sistema de tratamiento y disposición sanitaria de aguas residuales industriales para vertimiento clase iii, provenientes de la boca mina del nivel 250 (ef 03) al río San José. Unidad de posgrado. Facultad de ingeniería geológica, minera, metalúrgica y geográfica. Universidad nacional mayor de San Marcos
- Ruiz V. et. al., (2015), proceso HDS en minera sipán para la optimización de remoción de manganeso en aguas de drenaje ácido- cajamarca, peru. Unidad de posgrado. Universidad de piura. Faculta de ingeniería
- Salazar, J.P., Hernández, M.L y Arango, A.J. (s.f.). Alternativas de tratamientos de las aguas de los drenajes ácidos de minas: una revisión. Capítulo 19, pag 347-366
- Sulonen, M. L. K., Baeza, J. A., Gabriel, D., & Guisasola, A. (2021). Optimisation of the operational parameters for a comprehensive bioelectrochemical treatment of acid mine drainage. *Journal of Hazardous Materials*, 409, 124944. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2020.124944>
- Viana Ríos Ricardo. (2018). Vista de Minería en América Latina y el Caribe, un enfoque socioambiental. <https://revistas.udca.edu.co/index.php/ruadc/article/view/1066/1523>
- Viana, R. (2018). Minería en américa latina y el caribe, un enfoque socioambiental. *U.d.c.a actualidad & divulgación científica*, 21(2):617-637, recuperado desde <https://doi.org/10.31910/rudca.v21.n2.2018.1066>
- Wibowo, Y. G., Sudiby, Naswir, M., & Ramadan, B. S. (2022). Performance of a novel biochar-clamshell composite for real acid mine drainage treatment. *Bioresource Technology Reports*, 17, 100993. <https://doi.org/10.1016/J.BITEB.2022.100993>

Artículo recibido en: 13.05.2024

Artículo aceptado: 31.05.2024