

Tratamiento de bajo coste para aguas contaminadas por actividades de minería

María Teresa Hernández Antolín

Departamento de Química Industrial y Polímeros ETSIDI. Universidad Politécnica de Madrid
mariateresa.hernandez@upm.es

Laura Sanz Rodríguez

Ingeniero Técnico Industrial. Universidad Politécnica de Madrid
laura_90_sanz@hotmail.com

José Antonio Mancebo Piqueras

Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción ETSIDI. Universidad Politécnica Madrid
ja.mancebo@upm.es

Resumen

El suministro de agua que no provoque peligro en la salud de la población, constituye uno de los objetivos prioritarios que deben aspirar todos los países y que se encuentra recogido en los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ONU, 2000, ODM N°7, Meta 10). Para conseguir estos objetivos no sólo es necesaria una adecuada gestión de los recursos sino también el diseño y la aplicación de diferentes alternativas tecnológicas apropiadas según cada caso.

El objetivo del presente trabajo es proponer y justificar una serie de tecnologías de bajo coste y fácil aplicación para el tratamiento de aguas contaminadas por actividades de minería en zonas con bajo Índice de desarrollo humano (IDH). Se ha centrado el estudio en Perú, donde que una de las principales fuentes de riqueza es la minería y como consecuencia de ésta actividad se produce la contaminación del agua que conlleva un considerable riesgo para la salud de la población. También estas alternativas tecnológicas podrían ser utilizadas en otras zonas con análogos problemas.

Palabras clave: Contaminación por la industria minera, Tratamiento de aguas contaminadas por la industria minera, tecnologías de bajo coste, fotocátalisis solar para eliminar metales.

Resumo

A água que não causa perigo para a saúde da população, é um dos objetivos prioritários que devem alcançar todos os países que estão descritos nos Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ONU 2000 ODM 7 , Meta 10) . Para atingir estes objetivos não é apenas necessário uma gestão adequada de recursos , mas também a concepção e implementação de diversas alternativas tecnológicas adequadas, de acordo como cada caso.

*DisTecD. Diseño y Tecnología para el Desarrollo
2014, 1, desde pág. 131 - hasta pág. 146
ISSN: 2386 – 8546*

O objetivo deste trabalho é propor e justificar uma série de tecnologias de baixo custo e de fácil aplicação para o tratamento de água contaminada por atividades de mineração em áreas com baixo índice de desenvolvimento humano (IDH). O estudo centrou-se sobre Peru, onde a principal fonte de riqueza é a atividade de mineração em razão de essa atividade se produz a poluição da água que carrega um risco considerável para a saúde da população. Também estas tecnologias alternativas poderiam ser utilizadas em outras áreas com problemas semelhantes.

Palavras-chave: Poluição da indústria de mineração, tratamento de água contaminada pela indústria de mineração, tecnologias de baixo custo, fotocatalise solar para remover metais.

Abstract

Water supply, that doesn't cause health problems for the population, must be one of the prime objectives for all countries. This aim is reflected in Millennium Development Goals (UN, 2000 MDG 7, target 10). The objective is reached not only by a suitable resource management, but also by the design and implementation of appropriate technological alternatives according to each case.

The goal is to propose and justify the use of low-cost technologies, which have an easy application. They will be applied to the treatment of water contaminated by mining activities in areas with low Human Development Index (HDI). This study is focused on Peru, where mining is one of the greatest sources of wealth. As a result of this activity, there is water pollution which brings about a considerable risk in the population's health. These proposal technologies could be used in other areas with similar problems.

Key words: Contamination by mining industry, water treatment, metal contamination, low-cost technologies, photocatalysis for metal removal.

1. Análisis de la actividad minera

Tanto la actividad minera como la industria extractiva, constituyen una fuente importante de crecimiento económico para Perú, ocupando un lugar muy importante en el mundo por su producción y potencial minero, unido a su posición estratégica, con fácil acceso a los mercados del Sudeste Asiático y EEUU. A consecuencia de ello, se produce un severo impacto ambiental que es necesario analizar para su posible tratamiento.

La zona objeto de estudio se localiza en el Departamento de la Libertad, en las cuencas de los ríos Perejil, Chuyuhual y Caballo Moro. La actividad minera presente en la zona desarrolla tanto la gran minería como la pequeña minería o minería artesanal. Ambas difieren en los impactos ambientales que producen, por ello, se estudiarán de forma separada.

Como representante de la **gran minería**, en esta zona se desarrolla el *proyecto* Alto Chicama basado en la extracción de oro [1], el cual consiste en una mina a tajo abierto con instalaciones metalúrgicas para recuperar oro. Las operaciones que se llevan a cabo se describen en la figura 1.

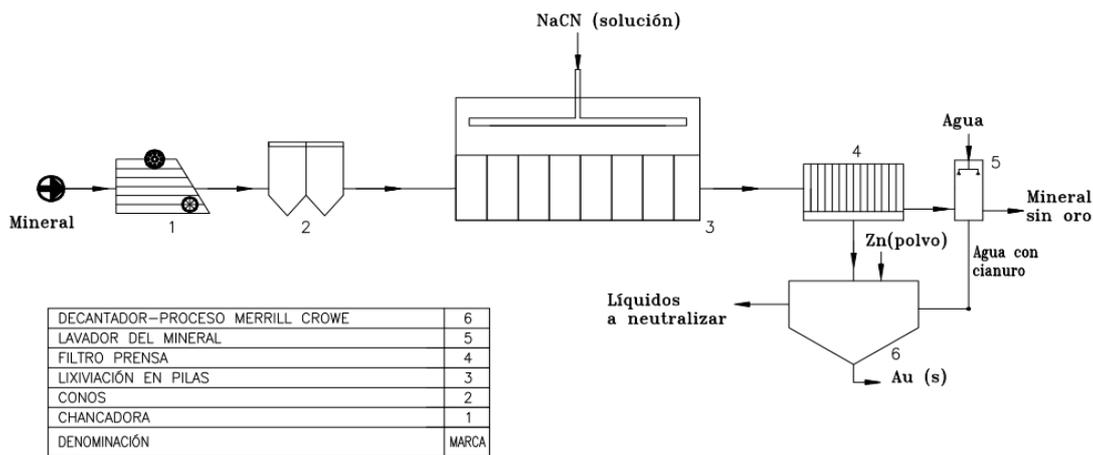


Figura 1. Esquema de proceso de obtención del oro [2].

Las fases en la obtención del oro son:

- i. Extracción del mineral de naturaleza sulfhídrica o carbonosa y descarga en la zona de almacenamiento junto a la roca de desmonte.
- ii. Lixiviación en pilas para recuperar el oro: el mineral es triturado y sometido a lixiviación con solución de cianuro sódico (entre 0,01% y 0,05%). Se separan ambas fases por filtración y se lava el precipitado para eliminar el cianuro sobrante. Debido a su toxicidad, las aguas residuales deben estar muy controladas.
- iii. Proceso Merrill-Crowe: a la fase líquida de la lixiviación se le añade polvo de zinc para precipitar el oro contenido en la solución [3] debido a la mayor afinidad del cianuro por el cinc. Para conseguir una precipitación eficaz, la solución debe tener suficiente solución de cianuro libre para disolver el cinc y mantener en solución los compuestos formados.

En la zona del proyecto Alto Chicama existen diferentes áreas para la acumulación de efluentes (pozas de sedimentación oeste y este) y dos plantas de tratamiento de aguas para la descontaminación de los efluentes que desembocan en los ríos de la zona, poza de limpieza y planta de tratamiento de aguas servidas, se muestra en la figura 2.

Respecto a la **pequeña minería y minería artesanal**, la zona cercana al río Chuyuhual presenta pequeñas minas de oro, algunas en operación y otras abandonadas. En general, la minería a pequeña escala tiende a producir más efecto sobre el medio ambiente por unidad de producción que la gran minería.

Las técnicas de extracción de oro en estas minas son muy diferentes a los métodos de la gran minería, ya que se utiliza la amalgamación con mercurio para extraer el oro. Esta técnica se basa en la menor tensión superficial de la interfase oro-mercurio, debido a la mayor solubilidad del mercurio en el oro respecto al agua. Como consecuencia de ello, el mercurio absorbe el oro y va saturándose formándose la amalgama, con cristales rómbicos de oro dispersos en la masa del mercurio.

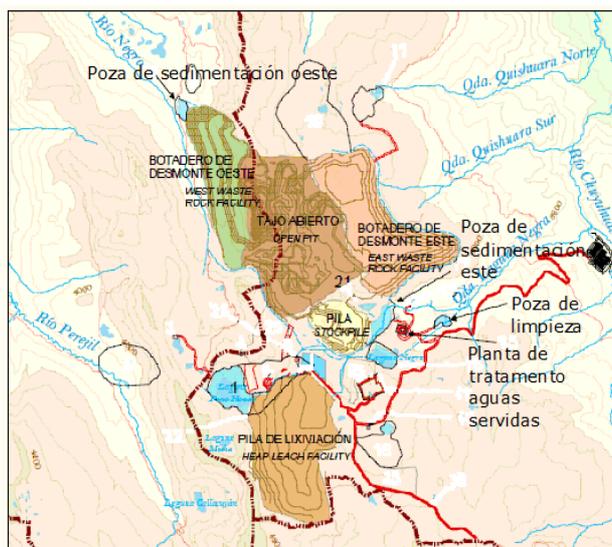


Figura 2. Mapa del Proyecto Alto Chicama [4].

Hay diferentes métodos de amalgamación: en flujo abierto o continuo, en circuito parcial o totalmente cerrado. Las técnicas más utilizadas para formar la amalgama de mercurio y oro son: mediante movimiento y transporte del material, realizar la molienda y la amalgamación al mismo tiempo o utilizando planchas amalgamadoras de cobre o aleación cobre-zinc, sobre las que se deposita una fina capa de mercurio para recuperar el oro y obtener metal libre. Tras la amalgamación, se obtiene una mezcla de amalgama/oro, mercurio líquido y otros minerales acompañantes. Se separa después la amalgama mediante métodos gravimétricos, con bateas manuales o mecánicas, separadores hidráulicos o centrífugos o aplicando calor [5], con lo que se produce la evaporación del mercurio.

1.1. Riesgos ambientales debidos a contaminación por la industria minera

Drenaje ácido de la mina: si la roca contiene minerales sulfatados y se produce la excavación a tajo abierto, estos materiales reaccionan con aire o con agua y se forma ácido sulfúrico, que es transportado desde la mina por la lluvia o por corrientes superficiales. El drenaje ácido también disuelve metales tóxicos, como el cobre, manganeso, aluminio, cadmio, arsénico, plomo y mercurio que se encuentran en la roca de los alrededores [6].

Contaminación debida al material de desmonte minero: ya que en la minería a tajo abierto el mineral metálico está muy extendido en el suelo, para su extracción requiere remover gran cantidad de terreno afectando a la vegetación autóctona y produciendo uno de los efectos ambientales más destructivos de la minería. En la zona de estudio, se ha demostrado la existencia de depósitos de As y Cu, óxidos de hierro y otros metales como Al, Mn, Fe o Cu [7].

Contaminación del aire: se producen estas emisiones durante todo el ciclo de vida de una mina, ya que en las operaciones mineras se moviliza gran cantidad de material. Las partículas generadas en las excavaciones, voladuras, acúmulo de material, quema de combustibles o transporte de materiales, van al aire y se trasportan por el viento [7].

Contaminación debida al mercurio En las minas que utilizan la amalgamación con mercurio se pueden producir emisiones de mercurio durante la extracción de oro, siendo las emisiones más peligrosas corresponden a la evaporación del mercurio.

2. Estudios previos de calidad del agua

En Perú la normativa aplicable al agua es la Ley de Recursos Hídricos nº 29338 (2009), que define los Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para el agua (ECA). Clasifica en Categoría 1 el agua para consumo humano y se diferencia en A1, A2 o A3 según el tratamiento a que debe someterse para su potabilización. También fija los requisitos para agua utilizada en agricultura y ganadería (Categoría 3) o para desarrollo de la vida acuática (Categoría 4). Se ha puesto de manifiesto mediante estudios previos realizados en la zona de estudio [8] (figura 3), que se ha producido un cambio en la calidad del agua en la zona desde el año 2005 (año base) al 2010.

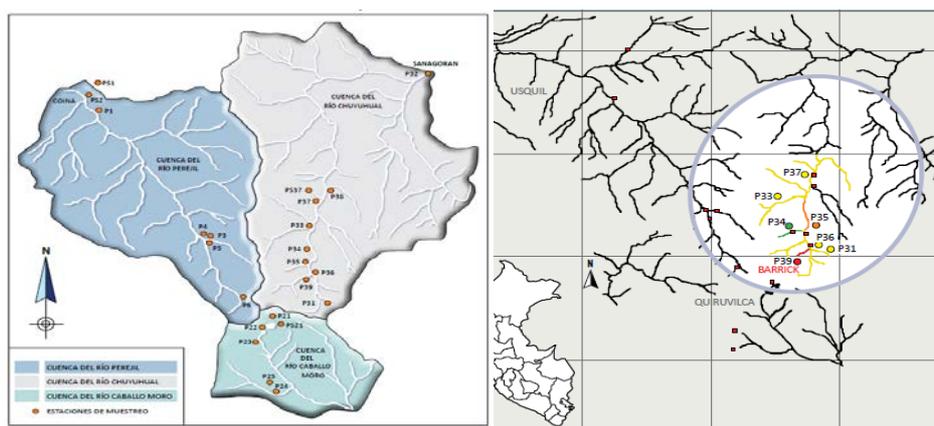


Figura 3. Localización de los puntos donde se ha realizado la toma de muestra [8].

En la Tabla 1 se muestran los resultados obtenidos en el año 2010 y se comparan con los estándares de calidad que fija la normativa. La calidad del agua en los tres puntos P35, P36 y P39 no es apta para el consumo humano sin un tratamiento avanzado previo, ni es apta para riego ni para ingesta de animales.

		Arsénico (mg/l)	Manganeso (mg/l)	Cobalto(mg/l)	Mercurio (mg/l)	Molibdeno (mg/l)
P35		<0,01	0,4148	0,033	0,0045	0,036
P36		0,03	0,6267	0,043	0,0056	0,052
P39		0,03	0,7734	0,049	0,0066	0,061
Estándares de calidad Categoría 1	A1	0,01	0,1	NC	0,001	NC
	A2	0,05	0,4	NC	0,002	NC
	A3	0,05	0,5	NC	0,002	NC
Categoría 3	Riesgo vegetales	0,05	0,2	0,05	0,001	0,05
	Bebida de animales	0,10	0,2	1	0,001	1
Categoría 4		0,05	NC	NC	0,0001	NC

Tabla 1. Contaminación en los puntos más significativos en el año 2010 [8].

En la propuesta de tratamiento se focalizará el estudio en la eliminación del arsénico, manganeso y mercurio, ya que la concentración de estas sustancias se encuentra significativamente más elevada que los niveles permitidos por la legislación. A continuación, se indica el estado en que se encuentran dichas sustancias en el medio acuático.

- Arsénico: principalmente se encuentra como As (III) (arsenitos) en aguas profundas y As (V) (arseniatos) en aguas superficiales ya que hay mayor concentración de oxígeno. Es

más tóxico el As (V) el que As (III). El arsénico se considera sustancia cancerígena pudiendo ocasionar cáncer de piel y aumento del riesgo de desarrollar cáncer de hígado, vejiga y pulmones [9].

- Manganeso: de los tres posibles estados de oxidación (+2, +3 y +4), en las aguas se encuentra como Mn^{+2} , el cuál en condiciones oxidantes pasa a Mn^{+4} precipitando como MnO_2 . El predominio de una forma sobre otra depende del pH, del potencial redox, y de la temperatura del agua. El manganeso en exceso puede causar desórdenes neurológicos y psiquiátricos principalmente por inhalación [10].
- Mercurio: puede encontrarse en el agua como mercurio inorgánico, como Hg^{+2} principalmente, aunque también como Hg_2^{+2} . Además, puede presentar una pequeña fracción de mercurio orgánico en forma de metilmercurio. El mercurio es muy tóxico, dependiendo dicha toxicidad de su forma química, siendo el más tóxico el metilmercurio.

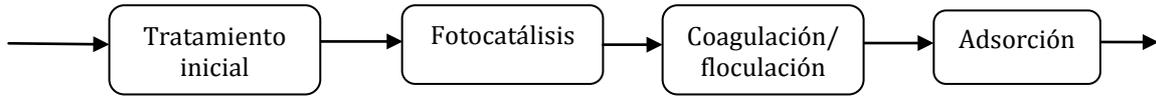
3. Propuesta de actuación para el tratamiento del agua contaminada

La propuesta de actuación que se describe a continuación se ha generado tras un estudio previo bibliográfico de todas las alternativas posibles de eliminación de los contaminantes. Para elegir la más adecuada un factor determinante ha sido el económico, seleccionando tecnologías de bajo coste. No obstante, dichas tecnologías requieren una comprobación experimental de la eficacia de la eliminación, determinando la concentración de los contaminantes al final de cada tratamiento y verificando que su concentración es menor que la máxima permitida. En función de la concentración obtenida, se podrá determinar el uso final del agua tratada (agua potable, agua de riego, etc.) y si necesita algún tratamiento adicional. Así se podrá asegurar con más seguridad que el estado del agua no produce problemas para la salud de los seres vivos, los animales y el medio ambiente.

Tras una serie de tratamientos iniciales del agua para eliminar los sólidos en suspensión, se procede al tratamiento de metales. Para esa fase, la secuencia de procesos según el orden de aplicación es la siguiente:

- Eliminación del manganeso: Se propone fotocátalisis con TiO_2 para oxidar el Mn^{+2} a Mn^{+4} , el cual, combinado con O_2 formará un precipitado de MnO_2 que se separará posteriormente. El TiO_2 al estar inmovilizado durante la fotocátalisis no requerirá de una posterior separación.
- Eliminación del arsénico: mediante la fotocátalisis con TiO_2 y coagulación-floculación con sulfato de aluminio o hierro. La eliminación del arsénico será más eficiente como arsénico (V), por ello, se aplica la fotocátalisis para oxidar el As (III) a As (V) y una vez que se ha producido este paso se puede eliminar con mayor eficacia mediante la coagulación-floculación.
- Eliminación del mercurio: Se propone el proceso de coagulación-floculación debido a que sobre los hidróxidos formados los compuestos de mercurio y arsénico se adsorben y coprecipitan. Para una mayor eliminación del mercurio, tras la coagulación-floculación

se propone realizar la adsorción utilizando, adsorbentes naturales, por ejemplo un producto natural de la zona como son las cenizas de madera de Eucalipto.



3.1. Fotocatálisis

Mediante la fotocatálisis se pretende oxidar el arsénico y el manganeso. En el caso del arsénico, además de la oxidación del As (III) a As (V) puede producirse la reducción de As (V) o del As (III) a As (0), con su consecuente inmovilización. Para ambos métodos de eliminación, la fotocatálisis heterogénea con TiO_2 puede ser utilizada como método de tratamiento viable. Sin embargo, en el caso de estudio interesa la oxidación, ya que el As (III) es más contaminante que el As (V) y más difícil de eliminar. Para favorecer la oxidación se requiere presencia de oxígeno en el agua, utilizando un sistema de aireación. Tras la oxidación a As (V) se requiere el proceso de eliminación de dicho contaminante. La Organización Nuclear de Ciencia y Tecnología Australiana (ANSTO) evaluó la foto-oxidación con luz del sol y la fotocatálisis con TiO_2 del As (III) para formar As (V) [11]. Se ha comprobado la oxidación del As (III) a As (V) en un pH 4 a 9 [12] [13] [14]-

El manganeso como Mn (II) puede oxidarse a MnO_2 a través de procesos fotocatalíticos naturales en presencia de partículas semiconductoras como TiO_2 , Fe_2O_3 o ZnO. La reducción directa del Mn (II) a Mn (0) es muy difícil que ocurra debido a que presenta valores de potenciales de reducción negativos relativamente altos, $E^\circ \text{Mn}^{2+}/\text{Mn}0 = -1,026 \text{ V}$. En contraste, es posible la oxidación con TiO_2 originando óxidos poco solubles en agua [15] [16]. La velocidad de oxidación aumenta con el pH en el intervalo 3-7, debido a la mayor adsorción de las especies catiónicas sobre el semiconductor.

La zona de estudio posee un clima cálido, con una temperatura media anual de $18,9^\circ \text{C}$. La irradiación solar en la zona es alta [17] por lo podría ser rentable aplicar fotocatálisis. Para ello, se dispondrá de captadores estáticos con una superficie reflectante, CPCs [18], como se muestra en las figuras 4A y 4B. Los tubos serán de vidrio bososilicatado unidos a una estructura soporte de aluminio, donde el catalizador TiO_2 se encuentra soportado sobre substratos fijos [19].

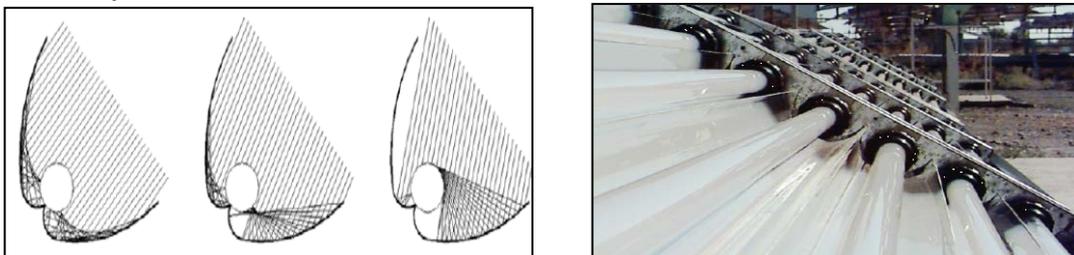


Figura. 4A. Reflexión sobre reactor CPC de la luz solar que llega al captador.

Figura 4B. Detalle de un colector CPC [20].

El reactor consistirá en dos módulos dispuestos horizontalmente (figura 5A y 5B) en una estructura metálica de aluminio y conectados en serie mediante tuberías de polipropileno. El agua a tratar circula directamente de uno a otro y mediante un sistema de válvulas se puede regular la entrada y salida del agua del reactor, controlando tiempo de permanencia óptimo.

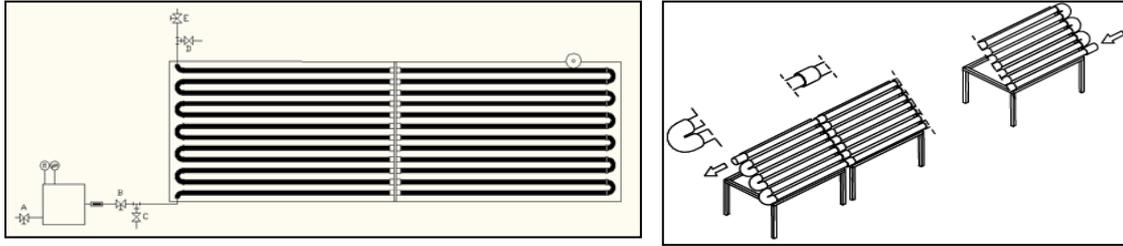


Figura 5A. Detalle del reactor para los ensayos.

Figura 5B. Esquema de un reactor en 3D. [20]

Mediante ensayos a nivel de laboratorio con un reactor se debe determinar el tiempo necesario para el tratamiento del agua, el pH y la cantidad de catalizador óptima.

3.2. Coagulación-floculación

Seguido de la fotocatalisis se propone una coagulación-floculación para precipitar los compuestos de arsénico y mercurio, ya que se adhieren a los coágulos formados. Se proponen como coagulantes: sulfato de hierro (III) y sulfato de aluminio. Los hidróxidos formados deben estar en cantidades que excedan los límites de solubilidad de los hidróxidos metálicos y como consecuencia precipiten [21]. Para la coagulación es necesario controlar la velocidad y el tiempo de agitación, la dosificación de coagulante, el pH y la presencia de iones. En el caso de las sales de aluminio y de hierro, la influencia de otros aniones en el agua es mayor que la de cationes, pudiendo interferir la presencia del ion sulfato y del ion fosfato. Como método de ensayo de laboratorio se debe realizar el “Jar-test” para evaluar las condiciones óptimas para aumentar la eficacia del proceso.

3.3. Adsorción

Se utiliza la adsorción para eliminar el resto de mercurio que aún esté presente en el agua. Cuando el agua a tratar desciende a través de la columna, el componente metálico se separa gradualmente del agua y queda adherido al adsorbente de la columna. Para las pruebas en laboratorio se utilizan columnas de adsorción simulando las condiciones de trabajo y determinando los parámetros del proceso de adsorción y el tiempo de ruptura, que es el tiempo necesario para que se haya agotado la capacidad de adsorción del adsorbente de la columna. A partir de estos parámetros, se podrá calcular la cantidad de adsorbente requerido.

Se propone como adsorbente cenizas de madera de eucalipto. Se ha elegido dicho adsorbente porque en la bibliografía consultada se ha demostrado que presenta buena capacidad de adsorción del mercurio, es económico y es una madera típica de Perú. En la actualidad, Perú cuenta con 536.530 hectáreas de plantación de eucalipto [22]. No obstante, se podrían utilizar otros adsorbentes (preferiblemente materiales renovables) siempre que se realicen los ensayos para verificar su aplicación.

4. Instalación propuesta

A continuación se presenta el esquema de la instalación propuesta, la cual consta de un tratamiento inicial (pretratamiento y tratamiento primario) seguido de la eliminación de metales, figura 6. Es necesario el tratamiento del agua previo al tratamiento de metales pesados, ya que dicho agua superficial puede contener materia en suspensión que dañe los

equipos y afecte a la efectividad del tratamiento. Tras el tratamiento de metales se pueden aplicar distintos tratamientos (secundario, desinfección, etc.) en función del tipo de agua que se requiera obtener.

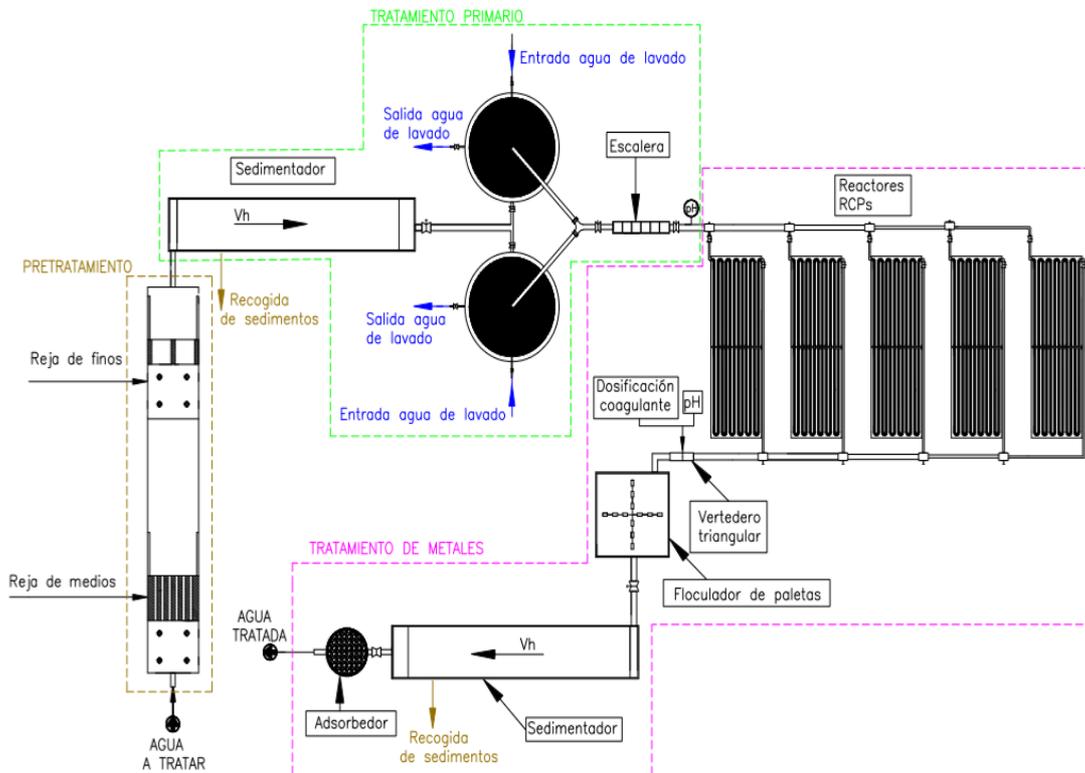


Figura 6. Esquema de la instalación para tratamiento de aguas contaminadas por la minería [2].

Nota: El pretratamiento se encuentra ampliado tres veces respecto al resto de la instalación.

4.1. Tratamiento inicial del agua

Se ha estimado un consumo de 25 l por persona y día funcionando 20 h al día para abastecer a 5000 personas. El cálculo del caudal es el siguiente.

$$25 \frac{l}{\text{persona} \cdot \text{día}} \cdot 5000 \text{ persona} \cdot \frac{1 \text{ día}}{20 \text{ h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} = 1,736 \frac{l}{s}$$

El pretratamiento que se propone consiste en un sistema de rejas con una reja de medios seguida de una de finos, sus características se muestran en la Tabla 2.

	Espesor barra mm	Separación barra, mm	Q (l/s)	Velocidad (m/s)	A (m ²)	Ancho (m)	Alto (m)	A _{mojada} (m ²)
Reja medios	10	50	1,736	0,55	$6,31 \cdot 10^{-2}$	0,13	0,05	$8,93 \cdot 10^{-3}$
Reja finos	10	8	1,736	0,55	0,0118	0,13	0,09	0.0167

Tabla 2. Características de la instalación de rejas.

El tratamiento primario a aplicar dependerá de la materia en suspensión que contenga el agua. Se ha propuesto un tratamiento que consiste en un sedimentador primario, dos filtros

de lecho ascendente y un sistema de aireación. Las características del sedimentador primario se muestran en la tabla 3.

Largo, m	Ancho, m	Profundidad, m	Carga hidráulica, $m^3/(m^2 \cdot día)$	Velocidad de sedimentaci. (cm/s)	Tiempo de sedimentación, h
5	0,9	0,4	33,35	$4,3 \cdot 10^{-3}$	3

Tabla 3. Características del sedimentador primario.

Los filtros de lecho ascendente con grava como superficie de filtración funcionarán en paralelo. Se ha elegido este tipo de filtro debido al factor económico. No requiere de ningún motor para su utilización, simplemente con la energía potencial mediante su colocación a una determinada altura. En la tabla 4 se muestran las características del sistema de filtración y en la tabla 5 las del filtro.

Parámetro	Valores	
Velocidad de filtración (caudal/área) (m/h)	$\leq 1,5$	
Capas	Espesor (m)	Tamaño (mm)
Capa 1 (grava)	0,1-0,3	6,4-12,7
Capa 2 (grava)	0,2-0,4	2,4-4,8
Capa 3 (arena)	0,3-0,5	0,4-1,8
Espesor total del lecho (m)	$\geq 1,2$	
Altura de agua sobre la superficie del lecho (m)	$\geq 0,4$	
Pendiente del fondo (%)	$\geq 12,5$	
Separación entre losas/ladrillos (mm)	20-30	
Ancho de losas/ladrillos (cm)	10-15	
Velocidad de descarga de lavado (m/min)	1	
Velocidad de canal de lavado (m/min)	1,5	

Tabla 4. Características de la filtración.

Características del filtro	Capa 1	Capa 2	Capa 3
Espesor (m), L	0,3	0,3	0,3
Tamaño efectivo grano (mm), d	9,55	3,6	1,1
Velocidad de filtración (m/s), V_f	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$	$4,16 \cdot 10^{-4}$
Número de Reynolds, N_R	3,96	1,49	0,45
Coefficiente de arrastre, C_D	7,9	18,9	58
Pérdida de carga (m), h	$1,82 \cdot 10^{-3}$	$1,16 \cdot 10^{-3}$	0,0116
Pérdida de carga total (m), H_T	0,0146		

Tabla 5. Características del filtro.

La aireación, que favorece el proceso de fotocatalisis, consiste en mezclar el agua y el aire con el propósito de aumentar el contenido de oxígeno del agua y aumentar su pH, al disminuir su contenido en dióxido de carbono. Se utilizará un aireador en cascada ya que es muy económico y apenas requiere mantenimiento (figura 7). Para producir turbulencia y así mejorar la eficiencia de la aireación, a menudo se coloca un obstáculo al borde de cada escalón. Las características del mismo se muestran en la tabla 6.

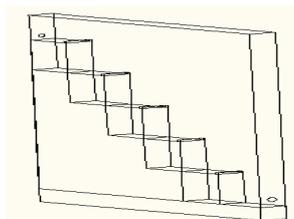


Figura 7. Esquema del aireador.

Nº escalones	5
Altura escalón (cm)	19
Anchura escalón (cm)	19
Profundidad escalón (cm)	19

Tabla 6. Características del aireador en cascada.

4.2. Tratamiento de metales

El tratamiento comienza aplicando fotocatalisis con TiO_2 mediante un conjunto de captadores estáticos con una superficie reflectante. Se dispondrán cinco reactores de fotocatalisis dispuestos en paralelo. Las características de un reactor, el cuál está dividido en dos módulos se muestra en la tabla 7.

Parámetro	Valores
Nº de tubos vidrio borosilicatado	24 (12 tubos cada módulo)
Longitud total de un tubo	1500 mm
Diámetro exterior de cada tubo	32 mm
Grueso de pared de un tubo	1,4 mm
Diámetro interior	29,2 mm
Volumen tubo	1 l
Volumen reactor	24 l de polietileno
Caudal	21 l/min (con medidor de caudal)

Tabla 7. Características de un reactor CPC.

Para el proceso de coagulación-floculación se adiciona el coagulante que ha resultado más eficaz en los ensayos previos y mediante agitación rápida se produce el mezclado. Las interacciones se producen entre los coloides del agua y el precipitado de hidróxido de hierro o aluminio. Para la agitación rápida se propone un vertedero triangular, que consiste en un canal rectangular y un vertedero de 90° colocado a una altura "P" medida desde el vértice del vertedero hasta el fondo del canal. Sus características se muestran en la figura 8 y en la tabla 8. Se ha elegido este sistema ya que es el que mejor se adapta para dicho caudal y debido al factor económico.

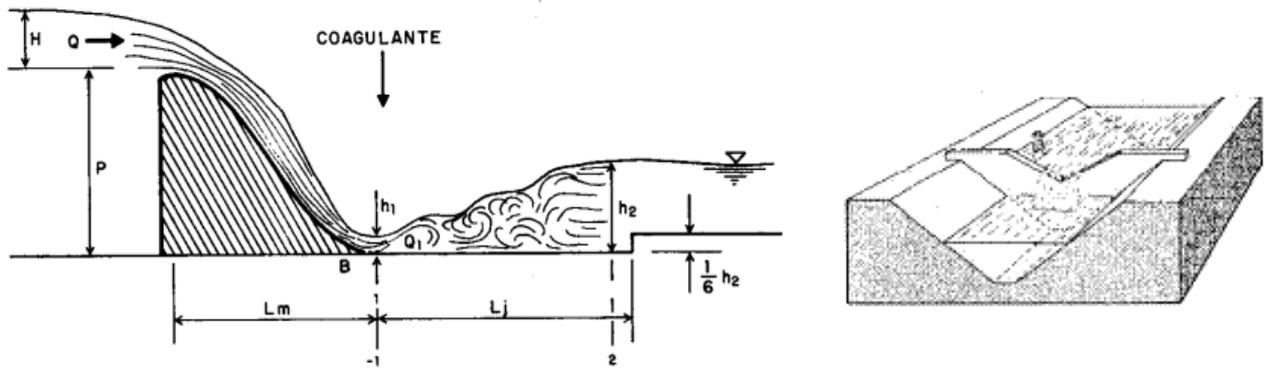


Figura 8. Representación de un vertedero triangular y sus dimensiones [24].

Parámetros	Valores
Altura de la lámina de agua sobre vertedero, H (m)	0,0680
Ancho de la lámina vertiente y del canal, B (m)	0,1375
Altura al inicio del resalto, h_1 (m)	$8,2 \cdot 10^{-3}$
Altura después del resalto, h_2 (m)	0,0288
Longitud del resalto, L_j (m)	0,1236
Distancia del vertedero a la sección 1 (m)	0,1418
Velocidad promedio en el resalto (m/s)	0,985
Tiempo de mezcla (s)	0,125
Gradiente de velocidad (s^{-1})	780

Tabla 8. Características del vertedero triangular.

La floculación es un proceso de agitación suave y continua de agua coagulada con el propósito de formar flóculos por agregado de partículas, para que se puedan separar por sedimentación o filtración. La eficiencia del proceso de floculación está determinada, en gran parte, por el número de colisiones por unidad de tiempo entre las partículas coaguladas. Se propone un floculador mecánico de movimiento giratorio con paletas paralelas al eje vertical como se muestra en la figura 9 y sus características se muestran en la tabla 9.

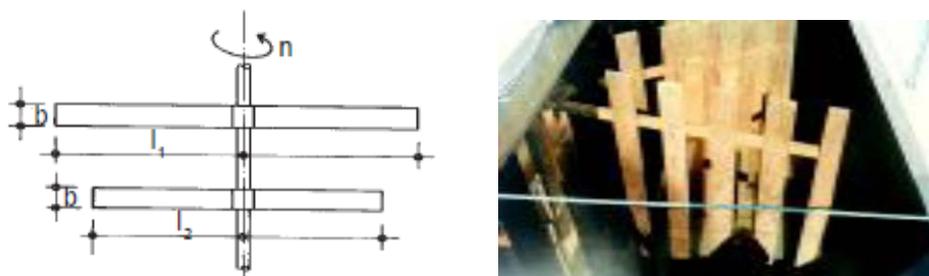


Figura 9. Floculador de paletas perpendiculares al eje [25].

Parámetros	Valores
Tiempo de floculación (minutos)	20
Volumen equipo floculación (l)	2083
Lado de la sección cuadrada del equipo (m)	1,28
Nº de paletas perpendiculares al eje	3
Longitud paletas (m)	0,92
Velocidad paletas (r.p.s.)	0,044
Potencia aplicada al agua (W)	13,7
Potencia motor eléctrico requerido (HP)	0,023

Tabla 9. Características del floculador de paletas.

Se dispondrá de un sedimentador con las mismas dimensiones que el sedimentador primario para sedimentar los coágulos formados.

Adsorción: Para conocer las dimensiones de la columna de adsorción y el tiempo durante el cual puede estar en funcionamiento, se requiere conocer los parámetros de adsorción. A partir de estos parámetros, se podrá calcular la cantidad de adsorbente requerido para tratar el caudal de la instalación 1,735 l/s.

5. Conclusiones

1. En Perú debido a la gran cantidad de recursos minerales, la actividad minera representa una fuente muy importante y creciente de recursos económicos.
2. Como consecuencia de dicha actividad se produce contaminación ambiental en el agua, representando un gran riesgo para la salud de la población.
3. En la actualidad existen diferentes alternativas tecnológicas que podrían ser aplicadas para evitar dicha contaminación. Para facilitar su utilización en zonas con menor índice de desarrollo, se elegirán tecnologías de bajo coste y de fácil aplicación.
4. Para poder aplicar dichas tecnologías con mayor grado de seguridad sería necesaria su comprobación experimental con vistas al diseño más preciso de las plantas de tratamiento.
5. Previo al tratamiento de metales se propone un tratamiento inicial del agua superficial. Este tratamiento consta de un pretratamiento con un sistema de rejillas y un tratamiento primario basado en sedimentación primaria, filtración en lecho ascendente y aireación en cascada.
6. El tratamiento de metales propuesto pretende eliminar los compuestos de arsénico, manganeso y mercurio.
7. El primer tratamiento de metales consiste en una fotocatalisis con TiO_2 , con ella se oxida el arsénico (III) a arsénico (V) con intención de facilitar su posterior eliminación y oxidar el manganeso (II) a manganeso (IV) para que precipite.
8. Para eliminar el mercurio y el arsénico se propone la coagulación-floculación con sulfato de hierro o aluminio seguida de decantación, para eliminar el precipitado.

9. Para una eficaz eliminación del mercurio, debido a su gran toxicidad, se propone aplicar tras la coagulación-floculación una adsorción con un adsorbente natural como son las cenizas de madera de Eucalipto. Se podría aplicar otro adsorbente con análogas características de adsorción.
10. Sería necesario un seguimiento de la calidad del agua durante el funcionamiento de la instalación para poder verificar que la concentración de los contaminantes no supere los valores límites marcados por la legislación.
11. Tras la eliminación de metales se puede continuar tratando el agua según la finalidad que se quiera otorgar a dicho agua.
12. El tratamiento de metales propuesto se puede aplicar a todo tipo de agua que se encuentre contaminada con dichas sustancias, como son arsénico, manganeso y mercurio.

Referencias

- [1] Minera Barrick Misquichilca S.A. Documento Proyecto Alto Chicama. A1 Introducción al Proyecto, A1-1. Setiembre, 2003.
- [2] Sanz Rodríguez, L. Estudio de posibles alternativas de bajo coste para el tratamiento de aguas contaminadas por la industria minera en Perú. Proyecto Fin de Carrera de la Universidad Politécnica de Madrid, Julio 2013.
- [3] Del Solar Gómez, A. Extracción de oro de cenizas de pirita por proceso Merrill-Crowe. Proyecto de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de Madrid. Junio, 1999.
- [4] Golder Associates Perú S.A. Proyecto Alto Chicama de Impacto Ambiental. Generalidades del EIA. Autor: Preparado para: Minera Barrick Misquichilca. Septiembre, 2003.
- [5] Pantoja Timarán, F. Optimización de la amalgamación en la pequeña minería del oro mejora de su recuperación y disminución de las pérdidas de mercurio. Tesis doctoral inédita leída en la Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Química Analítica y Análisis Instrumental. Madrid, 1999.
- [6] Vista General de la Actividad Minera y sus Impactos. Disponible en web: <<http://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Capitulo%201.pdf>>.
- [7] Walter, H. Yacimiento epitermal de oro de alta sulfuración de Alto Chimaca, controles de mineralización y modelo genético preliminar. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera y Metalúrgica. Lima, Perú 2005.
- [8] Compañía de María Marianistas. Vigilancia ciudadana de la calidad del agua. Una experiencia desde la sociedad civil en el Departamento de La Libertad en el Perú.
- [9] Rayner-Canham. G. Descriptive Inorganic Chemistry, Second Edition, W.H. Freeman. 1999

- [10] Schecher, W. D.; McAwoy, D. C. A chemical equilibrium modelling system, version 4.5. Environmental research software: Hallowell, ME.. "MINEQL+: USA (2003).
- [11] Gould, J.P. [et al.] 1984. Recovery of silver and mercury from COD samples by iron cementation. J. WPCF 56: Páginas 280-286
- [12] Lin, W. Y.; Rajeshwar, K.; Electrochem, J. Soc., 2751-2756 (1997).
- [13] Bissen, M.; Vieillard-Baron, M. M.; Schindelin, A. J.; Frimmel, F. H. Chemosphere 2001.
- [14] Prairie, M. R.; Stange, B. M.; Evans, L. R. Photocatalytic Purification and Treatment of Water and Air. Páginas 353-363. D.F. Ollis y H. Al-Ekabi Editores, Editorial Elsevier Sci. Publish. B.V., Amsterdam, Holanda, 1993.
- [15] Gage, B., Aqua Technical Sales Inc., Dr. Dennis H. O'Dowd, BOD Consulting, Paul Williams. Biological iron and manganese removal, pilot and full scale applications. ONDEO Degremont Ltd. Presented at the Ontario Water Works Association conference, May 3rd, 2001.
- [16] Estudio sobre la situación actual de las energías renovables del país y su perspectiva de desarrollo en el mercado energético nacional. Consultoría realizada por el Centro de Energías Renovables de la UNI, CER – UNI para el Fondo Nacional del Ambiente, FONAM.
- [17] Blanco, J.; Malato, S.; Fernández, P.; Vidal, A.; Morales, A.; Trincado, P.; Oliveira, J.C.; Minero, C.; Musci, M.; Casalle, C.; Brunotte, M.; Tratzky, S.; Dischinger, N.; Funken, K.H.; Sattler, C.; Vincent, M.; Collares-Pereira, M.; Mendez, J.F. y Rangel, C.M. Solar Energy, 67(4-6). Páginas 317-330. 2000.
- [18] Blanco, J.; Malato, S.; Lans, P.; Hulshoff. L.; Wildener.P.; Asano. T. (Eds.). Solar Photocatalysis: Application to the Treatment of Pesticides in Water en Water Recycling and Resource Recovery in Industry: Analysis, Technologies and Implementations. IWA Publish, London, UK (2002b).
- [19] Aguilar, M.I.; Sáez, J.; Lloréns, M.; Soler, A.; Ortuño, J.F. Tratamiento físico-químico de aguas residuales. Coagulación-floculación. Universidad de Murcia.
- [20] Rosales García, J. A. Materiales para fotocátalisis y electrofotocátalisis. Monografía. Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas. Tuxpan. Junio 2010
- [21] Díaz, E.; Mohedano, A. F.; Calvo, L.; Gilarranz, M. A.; Casas, J. A.; Rodríguez, J. J. Hydrogenation of phenol in aqueous phase with palladium on activated carbon catalysts. Chemical Engineering Journal, 131. 2007 Páginas 65-71.
- [22] Silva, H.S.; Santángelo J.M.; Ruiz, S.V., Granados D.L.; Deiana, A.C. Adsorción de mercurio en solución sobre carbones activados sulfurizados. Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan.
- [24] Ramírez Pérez, N. A. Universidad Católica de Oriente. Disponible en web: <<https://sites.google.com/site/adolfoingenieria/home/unidad-2-caudales>>.
- [25] Canepa de Vargas, L. Mezcla rápida. Disponible en web: <<http://cdam.minam.gob.pe:8080/bitstream/123456789/109/6/CDAM0000012-6.pdf>>.