

Tratamiento de aguas de efluentes minero – metalúrgicos utilizando, métodos pasivos y activos en sistemas experimentales

Treatment of water from miner - metallurgical effluents using passive and active methods in experimental systems

Paolo Rimarachin-Varas, Félix Huaranga-Moreno

Laboratorio de Ecología. Facultad de Ciencias Biológicas. Universidad Nacional de Trujillo-Perú

rhuaran@gmail.com

RESUMEN

Los relaves mineros son la principal fuente de contaminación debido a la presencia de metales pesados, que repercuten en el sistema ecológico y en la salud humana; de allí que el objetivo fue tratar las aguas de efluentes mineros-metalúrgicos aplicando métodos activos y pasivos. Para el método pasivo se utilizó compost y humus y como material de reacción se usó la técnica de flujo estable propuesta por Smit (1999), mientras que para el método activo se utilizó membrana semipermeable artesanal y se siguió la técnica de la ósmosis inversa. El análisis cuantitativo de los metales pesados Cu, Zn, As, Pb, Cd y Hg, se realizó utilizando el espectrofotómetro Perkin Elmer 601. Por el sistema compost y humus encontramos remoción de Cu, As, Cd y Hg superiores al 97 %, Zn para el humus con 85.67 % y Pb para compost con 95.66 %. En el sistema de membrana semipermeable artesanales, Pb, As y Zn fueron retenidos en niveles superiores al 99 % y otros como el Hg y Cd fueron retenidos totalmente; en este caso el metal con menor capacidad de retención fue el Cu con valores de 98.83 % para la membrana del humus y 99.55 % para la membrana del compost. Se concluye que el humus y compost tienen una elevada capacidad de remoción de metales; y al juntarlo con la membrana semipermeable, maximiza aún más los resultados esperados.

Palabras clave: Remoción, metal pesado, espectrofotómetro, osmosis inversa, membrana semipermeable.

ABSTRACT

The tailings are the main source of contamination due to the presence of heavy metals, which impact the ecosystem and human health; so it is necessary to implement innovative techniques to help mitigate the impact caused by these pollutants, such as lead, copper, zinc, arsenic, cadmium and mercury; hence the objective of this research project is to conduct studies to reduce the degree of water pollution from mines, using active and passive methods, which are practical applications for the treatment of mine effluents. In the experimental part within the liability method using compost and humus as reaction material steady flow technique proposed by Smit was used, while for the case of active method using semipermeable membrane craft technique of reverse osmosis followed. Quantitative analysis of the heavy metals Cu, Zn, As, Pb, Cd and Hg, was performed using the Perkin Elmer 601 spectrophotometer. The results obtained using compost and humus system show us a removal of heavy metals copper, arsenic, cadmium and mercury above 97%; compared to heavy metals showed lower percentages of removal, zinc hummus with 85.67% and lead to compost with 95.66%. In the system of craft semipermeable membrane, heavy metals like lead, arsenic and zinc were retained at levels above 99% and others such as mercury and cadmium were held totally; in this case the metal holding capacity less copper was 98.83% with values for humus membrane and 99.55% for the membrane of the compost. Therefore we conclude that the humus and compost have a high capacity for removal of metals; and to join it with the semipermeable membrane having a high metal holding capacity, further maximizes the expected results.

Keywords: Removal, heavy metal, spectrophotometer, reverse osmosis, semipermeable membrane.

ACEPTADO: Febrero 2015

RECIBIDO: Diciembre 2015

INTRODUCCIÓN

Existe actualmente un panorama de amplia preocupación en el ámbito internacional sobre la gravedad que ha alcanzado los diversos tipos de problemas ambientales que aquejan al planeta, como es el caso de la contaminación por residuos sólidos, líquidos y gaseosos que se descargan al suelo, la atmosfera y cuerpos de agua; entre los que se pueden mencionar los relaves mineros¹.

La minería cumple un rol fundamental en la economía de los países del mundo, dentro de los que se encuentran el Perú y en donde constituye un gran factor de desarrollo. Siendo el primer proveedor de divisas aporta hoy más del 60% del total de nuestros ingresos por exportaciones; no obstante, es también un generador de residuos, los cuales, si no son adecuadamente manejados, tienen el potencial de generar impactos ambientales que podrían permanecer mucho tiempo después del cierre de las operaciones; en particular, los relaves y desmontes de mina pueden contener sulfuros metálicos que, al quedar expuestos al oxígeno de la atmósfera, son oxidados y generan drenaje ácido, también es el caso de los metales en solución como el plomo, iniciando una fuente de contaminación que luego es muy difícil y costoso controlar².

En la eliminación de contaminantes metálicos se han aplicado tanto métodos físicos como químicos; sin embargo, todos ellos presentan ciertas desventajas, entre ellas su alta relación costo-efectividad, la generación de subproductos peligrosos o su ineficiencia cuando la concentración de metales en los entornos contaminados está por debajo de 100 ppm³. Actualmente los metales pesados están entre los contaminantes más tóxicos que contienen los residuos mineros, lo que ha llegado a ser un problema severo para la salud pública⁴.

Existe un gran número de tratamientos a los que se pueden someter los residuos de relaves mineros, cuya finalidad se dirige básicamente a la recuperación de recursos (materiales y energéticos), la detoxificación y la reducción de volumen de los contaminantes previa a su disposición final, usando para ello la remoción de metales pesados contenidos en la solución de relave⁵. A nivel internacional se puede mencionar una serie de trabajos por diversos investigadores dentro de los que se puede mencionar a Ackman⁶, quien utilizando la viabilidad de la cal para el tratamiento de agua acida de mina, determinó que cuando no existen concentraciones residuales bajas para metales pesados se realiza el tratamiento clásico de oxidación, con dosis de álcalis y sedimentación.

Por otro lado Aduvire⁷, en su trabajo sobre prevención de la formación y tratamiento de aguas ácidas por métodos pasivos, determinó que los métodos de tratamiento pasivo se basan en los mismos principios físicos, químicos y biológicos que tienen lugar en los fangos naturales (wetlands), y en donde se mitigan las aguas contaminadas, consiguiendo la eliminación de metales y la neutralización del pH. Plantean asimismo, que hay una variedad de técnicas complementarias como las aeróbicas, anaeróbicas, de drenajes anóxicos calizos (anoxic limestone drains) y de barreras reactivas permeables cuando son aguas subterráneas (permeable reactive barriers). En la práctica estos métodos se emplean solos o combinados, dependiendo de la caracterización que se tiene de las aguas ácidas. De igual modo, Cohen y Staub⁸ y Hedin, *et al.*⁹, en su trabajo sobre diseño y operación de un sistema de tratamiento de drenaje de minas pasiva, mencionan que los métodos pasivos para aguas de mina han evolucionado desde hace 16 años, cuando inicialmente se comenzaron a utilizar en los Estados Unidos.

Asimismo Bannister¹⁰, en su trabajo tratamiento de agua acida utilizando humedales, afirma que existen muchos ejemplos de la mala aplicación de humedales aeróbicos para

aguas ácidas de minas. Sostienen que los humedales aeróbicos son inapropiados para el tratamiento de aguas aún ácidas, porque los procesos estimulados en humedales aeróbicos resultan en la hidrólisis del hierro, un proceso que libera ácido protónico. Sin embargo, una vez que se ha corregido la acidez de un agua de mina por otro tipo de sistema pasivo, se puede usar un humedal aeróbico como paso final, para remover los últimos mg/l de hierro. Otro enfoque de la temática de la presente investigación, es la propuesta en los Estados Unidos por Boonstra *et al.*¹¹ quien en su trabajo titulado tratamiento biológico de drenaje ácido de minas, sostiene que en la utilización de membranas sintéticas, si existieran concentraciones residuales bajas de metales pesados en relación con la mayor concentración de la suma de metales totales, se utiliza el proceso SAVMINTM, hecho que concuerda con los datos reportados en España, por Smit¹²; y si hay fuentes de carbono crudo se utiliza el método ASPAM que es un ejemplo impresionante de varias tecnologías Sudafricanas que se conocen como "biodesalinización"¹³.

Amrit¹⁴, en su trabajo sobre dendrímeros cristalinos líquidos demostraron su alta capacidad para rebajar la ecotoxicidad de metales pesados presentes en solución, en razón de que estas moléculas presentan una alta afinidad electrónica en razón de que en su composición química destacan los grupos OH, COOH y NH₂. Bendeck¹⁵, sostiene que el máximo componente del humus y del compost son las sustancias húmicas, los que a través del proceso de intercambio catiónico de sus grupos químicos a nivel de las micelas coloidales, permite absorber cationes como los metales pesados presentes en relaves mineros. Farha, *et al.*,¹⁶ en su trabajo sobre la eliminación de algunos cationes de metales pesados por la resina sintética C100, Purolite, afirman que mediante el proceso de intercambio iónico se remueven los iones no deseados de una solución acuosa a un material sólido llamado intercambiador de iones. El intercambio es estequiométrico porque acepta iones mientras devuelve un número equivalente de radicales libres almacenadas en la matriz del intercambiador iónico, debido a que la matriz comúnmente es un polímero poroso impregnado con grupos funcionales. Vidal¹⁷, en su trabajo sobre técnicas de filtración tangencial, afirma que los métodos activos más importantes y aplicables en la actualidad para el tratado de aguas ácidas de mina corresponden al denominado método de osmosis inversa.

Con respecto a investigaciones a nivel nacional sobre el particular no se tiene referencias, salvo el reporte de Arteaga¹⁸, sobre nanodendrímeros en sistemas experimentales. Por lo que, siendo la contaminación por relaves mineros y especialmente a nivel de las aguas ácidas, una de las problemáticas de primer orden en nuestro país, la cual está generando un impacto drástico en ríos, lagos y lagunas, así como en terrenos de cultivo de los principales valles agrícolas del Perú; razón por la cual la presente investigación se plantea como alternativa para mitigar el impacto ambiental causado por metales pesados como lo es el Cu, Zn, As, Pb, Cd y Hg, los que se encuentran en concentraciones altas en el material de relave de las relaveras. De allí que el objetivo de la presente investigación fue evaluar el tratamiento de efluentes minero-metalúrgicos utilizando métodos pasivos y activos en sistemas experimentales, utilizando el humus, compost y membranas semipermeables naturales artesanales.

MATERIAL Y MÉTODOS

El material de estudio estuvo constituido por relave proveniente de las relaveras de Samne, provincia de Otuzco, región La Libertad, Perú; asimismo de piedra caliza, compost y humus los que se obtuvieron de proveedores comerciales y membrana semipermeable artesanal de vejiga de cerdo (Fig. 1), obtenida del camal municipal del distrito de El Porvenir, Trujillo.



Fig. 1. Material utilizado en la experiencia: a. humus comercial, b. compost comercial, c. membrana semipermeable artesanal (vejiga de chancho).

Se usó la técnica de flujo estable¹², donde el sistema experimental estuvo constituido por tres repeticiones para cada concentración, utilizándose tres dispositivos de material plástico rectangulares de 17x13x21cm, a los cuales se agregó un litro de solución de relave con la concentración especificada en la Tabla 2, los que previamente fueron dispersados a alta velocidad con un agitador magnético. Luego de 15 días de sedimentación en el primer sistema (Fig. 2), se pasó a continuación el material sobrenadante al segundo sistema que estuvo constituido por dos pozas, la primera contenía piedra caliza/humus y la segunda piedra caliza/compost; y a cuya salida se realizó el correspondiente análisis de los metales pesados Cu, Zn, As, Pb, Cd y Hg. A continuación, utilizando la técnica del osmosis inversa con membrana semipermeable artesanal se hizo fluir parte del líquido por la membrana semipermeable, realizándose finalmente un último análisis químico cuantitativo utilizando el espectrofotómetro Perkin Elmer 601 para el análisis de los metales pesados.

En la Tabla 2, se observa la concentración de los metales pesados utilizados en la experimentación a partir de muestras de relaves mineros previamente analizados (Tabla 1). Cada concentración durante la etapa experimental fue trabajada en forma independiente.

Con los resultados obtenidos se realizaron los siguientes cálculos estadísticos: media, varianza, coeficiente de variación, desviación estándar y análisis de variación entre métodos siguiendo la metodología propuesta por Quevedo¹⁹.

Entrada con solución de metales pesados

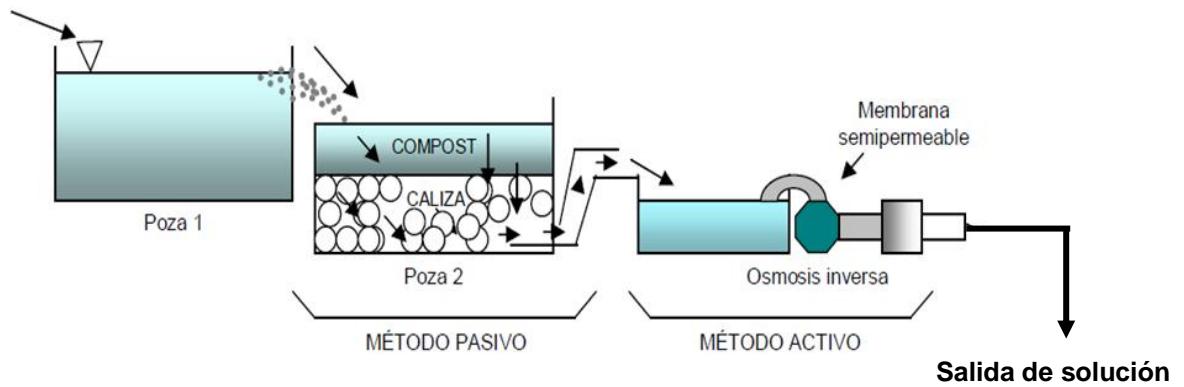


Fig. 2. Perfil del sistema experimental.

Tabla 1. Concentración de los metales pesados presentes en muestra de relaves, procedentes del distrito de Samne, La Libertad, Perú.

Metal	Condición	Peso relave (mg/kg)
Plomo		3399,0
Cobre		3,7
Zinc		465,9
Arsénico		6,1
Cadmio		28,8
Mercurio		21,7

Tabla 2. Concentraciones de los metales pesados utilizados en los sistemas experimentales.

Metal	Condición	Peso relave (g)	Concentración (mg/l)
Plomo		14,70	50,00
Cobre		54,05	20,00
Zinc		42,90	20,00
Arsénico		32,78	2,00
Cadmio		69,40	20,00
Mercurio		92,16	2,00

RESULTADOS

El análisis químico cuantitativo para el sistema humus comercial confirma la remoción de metales pesados (Tabla 3). En donde se puede observar que la concentración promedio del mercurio (0,0002 mg/l) es la menor en comparación con plomo (0,168 mg/l), cobre (0,466 mg/l), zinc (2,867 mg/l), cadmio (0,085 mg/l) y arsénico (0,021 mg/l). Traducidos en porcentaje encontramos una mayor remoción en el mercurio (99,99%); mientras el menor valor le correspondió al zinc (85,67%), observándose valores intermedios para el cadmio (99,58%), plomo (99,16%), arsénico (98,95%) y cobre (97,67%). El efecto de la membrana semipermeable natural para el agua de relave tratada previamente con humus comercial se encontró que metales pesados como cadmio y mercurio, no se detectaron; en comparación con plomo (0,031 mg/l), cobre (0,235 mg/l), zinc (0,137 mg/l) y arsénico (0,009 mg/l), en porcentajes sería con mayores en cadmio y mercurio con el 100%, mientras el menor valor correspondió al cobre (98,83%), observándose valores intermedios para el plomo (99,85%), zinc (99,32%) y arsénico (99,55%).

El análisis químico cuantitativo para el sistema compost comercial confirma la remoción de metales pesados según Tabla 3. En donde se puede observar que la concentración promedio del mercurio (0,005 mg/l) es la menor en comparación con plomo (0,868 mg/l), cobre (0,119 mg/l), zinc (0,597 mg/l), arsénico (0,027 mg/l) y cadmio (0,016 mg/l), en porcentajes sería mayor el mercurio (99,98%); mientras el menor valor correspondió al plomo (95,66%), observándose valores intermedios para el cobre (99,41%), zinc (97,02%), arsénico (98,65%) y cadmio (99,92%). Evaluando el efecto de la membrana semipermeable natural para el agua de relave tratada previamente con compost comercial se encontró que metales pesados como cadmio y mercurio, no se detectaron; en comparación con plomo (0,009 mg/l), cobre (0,014 mg/l), zinc (0,012 mg/l) y arsénico (0,009 mg/l). Asimismo, al traducir en porcentajes los resultados obtenidos del análisis de capacidad de absorción de metales se observa que los metales pesados con mayores porcentajes promedio de retención fueron el cadmio y mercurio con el 100%, mientras el menor valor correspondió al cobre (99,93%), observándose valores intermedios para el plomo (99,96%), zinc (99,94%) y arsénico (99,55%).

Tabla 3. Evaluación de la presencia de metales pesados tratados con humus comercial, compost y membrana semipermeable. Los resultados son promedios de tres repeticiones. Para cada tratamiento se presenta la absorción, el porcentaje de la misma, la absorción de la membrana semipermeable (ms) y el porcentaje del mismo.

Tratamiento	Humus comercial				Compost comercial			
	Absorción	%	ms	%	Absorción	%	ms	%
Plomo (mg Pb/l)	0,168	99,16	0,030	99,85	0,868	95,66	0,009	99,96
Cobre (mg Cu/l)	0,466	97,67	0,235	98,83	0,119	99,41	0,014	99,55
Zinc (mg Zn/l)	2,867	85,67	0,137	99,32	0,597	97,02	0,012	99,94
Arsénico (mg As/l)	0,021	98,95	0,009	99,55	0,027	98,65	0,009	99,93
Cadmio (mg Cd/l)	0,085	99,58	00,00	100,00	0,016	99,92	0,000	100,00
Mercurio (mg Hg/l)	0,0002	99,99	00,00	100,00	0,005	99,98	0,000	100,00

Tabla 4. Diferencias significativas entre los métodos de remoción y retención en los metales trabajados. a, b, x, y indican que existe diferencia significativa.

	Plomo (mg Pb/L)	Cobre (mg Cu/L)	Zinc (mg Zn/L)	Arsénico (mg As/L)	Cadmio (mg Cd/L)	Mercurio (mg Hg/L)
Humus Comercial	0.168 ± 0.002 ^a	0.466 ± 0.003 ^a	2.867 ± 0.002 ^a	0.021 ± 0.0 ^a	0.0157 ± 0.00057 ^a	0.005 ± 0.0 ^a
Compost	0.868 ± 0.00264575 ^b	0.119 ± 0.001 ^b	0.597 ± 0.0015 ^b	0.027 ± 0.0 ^b	0.085 ± 0.0017 ^b	0.0002 ± 0.0 ^b
Membrana de Humus Comercial	0.030 ± 0.001 ^x	0.235 ± 0.002 ^x	0.137 ± 0.0005 ^x	0.009 ± 0.0 ^x	-	-
Membrana de Compost Comercial	0.008 ± 0.0005 ^y	0.014 ± 0.001 ^y	0.0116 ± 0.002 ^y	0.009 ± 0.0 ^y	-	-

Los resultados del análisis estadístico de la media, varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, error estándar y análisis de varianza para los sistemas implementados (humus, compost y membrana artesanal), demuestran variaciones mínimas con respecto a los valores de la media para el caso de la varianza, desviación estándar, coeficiente de variación, error estándar y análisis de varianza (Tabla 4,5,6,7,8), mientras que para el análisis de varianza entre métodos de remoción y retención con los metales trabajados se encontró diferencias significativas, a nivel de este análisis.

Tabla 5. Análisis estadístico de la capacidad de absorción de metales pesados procedentes de relaves mineros por efecto del sistema humus comercial.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Coficiente de variación	Error Estándar
Metal					
Plomo	0.168	0.002	0.000004	1.19048%	0.0011547
Cobre	0.466	0.003	0.000009	0.643777%	0.00173205
Zinc	2.867	0.002	0.000004	0.0697593%	0.0011547
Arsénico	0.021	0.0	0.0	0.0%	0.0
Cadmio	0.085	0.00173205	0.000003	2.03771%	0.001
Mercurio	0.0002	0.0	0.0	0.0%	0.0

Tabla 6. Análisis estadístico de la capacidad de absorción de metales pesados procedentes del sistema humus comercial por efecto de membrana semipermeable natural.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Error Estándar
Metal					
Plomo	0.0303333	0.0011547	0.00000133333	3.80671%	0.000666667
Cobre	0.235	0.002	0.000004	0.851064%	0.0011547
Zinc	0.137	0.00264575	0.000007	1.93121%	0.00152753
Arsénico	0.009	0.0	0.0	0.0%	0.0
Cadmio	-	-	-	-	-
Mercurio	-	-	-	-	-

Tabla 7. Análisis estadístico de la capacidad de absorción de metales pesados procedentes de relaves mineros por efecto del sistema compost comercial.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Error Estándar
Metal					
Plomo	0.868	0.00264575	0.000007	0.30481%	0.00152753
Cobre	0.119	0.001	0.000001	0.840336%	0.00057735
Zinc	0.596667	0.00152753	0.0000023	0.25601%	0.00000137
Arsénico	0.027	0.0	0.0	0.0%	0.0
Cadmio	0.0156667	0.00057735	3.33333E-7	3.68521%	0.000333333
Mercurio	0.005	0.0	0.0	0.0%	0.0

Tabla 8. Análisis estadístico de la capacidad de absorción de metales pesados procedentes del sistema compost comercial por efecto de membrana semipermeable natural.

Variable	Promedio	Desviación estándar	Varianza	Coefficiente de variación	Error Estándar
Metal					
Plomo	0.00866667	0.00057735	3.33333E-7	6.66173%	0.000333333
Cobre	0.014	0.001	0.000001	7.14286%	0.00057735
Zinc	0.0116667	0.00057735	3.33333E-7	4.94872%	0.000333333
Arsénico	0.009	0.0	0.0	0.0%	0.0
Cadmio	-	-	-	-	-
Mercurio	-	-	-	-	-

DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis nos mostraron que la remoción de los metales pesados en todos los sistemas implementados (compost, humus y membrana), está por encima del 98% de efectividad a excepción del cobre con porcentajes menores de 90%. Este hecho concuerda con los resultados de las investigaciones realizadas por Montoya *et al.*²⁰ en su trabajo de tratamiento de aguas ácidas con fines de riego, en donde se obtuvo una eficiencia de remoción de más del 90% de metales pesados como el cadmio, zinc, arsénico y plomo, utilizando el método activo y pasivo en conjunto. De igual modo Barrie y Halberg²¹ trabajando con drenajes de aguas ácidas de mina utilizando sistemas de compost y humus más piedra caliza determinaron una reducción del pH, así como el nivel de los metales pesados presentes hasta un poco más del 80% en la solución ácida, resultados que concuerdan con los encontrados en la presente investigación. Similares resultados han sido encontrados por Benner *et al.*²², quienes para enfrentar la problemática de las aguas ácidas de mina utilizaron los biorreactores de compost; mientras que Younger *et al.*²³ experimentando con los llamados sistemas biológicos pasivos del tipo barreras reactivas permeables encontraron iguales resultados.

Una explicación sobre el particular fue demostrado por Zhao y Sen Gupta²⁴, quienes encontraron que las moléculas de compost y humus pueden ser vistas como ligandos multidentados multifuncionales, que contienen átomos donadores en el interior de la macromolécula, así como también grupos funcionales terminales como COOH, NH₂ y OH. Consecuentemente, sostienen que la captura de metales pesados está relacionada con el grado de complejidad de los átomos donadores externos y donadores internos, como el nitrógeno y el oxígeno; así como la interacción electrostática con grupos terminales cargados y otras interacciones no específicas como la encapsulación física en las cavidades internas, interacciones con iones con carga contraria atrapados en el interior de la macromolécula o con moléculas de agua; hecho que está también relacionada con la alta eficiencia demostrada por las moléculas de compost y humus en la investigación realizada.

Sobre el particular Stevenson²⁵, sostiene que el humus y compost químicamente son polímeros de estructuras muy complejas con grupos funcionales, la mayor parte son de tipo oxigenado: carboxilos, alcoholes, hidroxilos fenólicos y carbonilos. Además, se observa la presencia de grupos nitrogenados como aminas y amidas, además de otros grupos funcionales como éteres, hidroxiquinonas y lactonas. Por otra parte Harris²⁶, catalogan a este tipo de grupos funcionales por su dimensionalidad molecular como nanodendímeros los que tienen varios grupos donadores de electrones capaces de formar numerosos enlaces covalentes con iones metálicos, como el plomo, que es un ácido de Lewis, puesto que pueden compartir pares de electrones cedidos por los ligandos, los cuales en consecuencia se comportan como bases de Lewis. Asimismo Hoek y Agarwal²⁷, afirman que los nanodendímeros pueden ser descritos mediante la teoría de estabilidad coloidal de Derjaguin-Landau-Verwey-Overbeek (DLVO) que explica la interacción partícula-sustrato en medio acuoso. Esta teoría considera las interacciones de las fuerzas atractivas de Van der Waals y las interacciones electrostáticas repulsivas de la doble capa. Por lo que los nanodendímeros pueden servir como contenedores para metales pesados, demostrando que los PAMAM (dendímeros catiónicos), pueden unirse a varios iones metálicos (Cu, Zn, Ni, Pb), hecho que tiene importancia biológica, así como clases especiales de nanodendímeros con altas constantes de enlazamiento han sido propuestos para la protección ambiental los que pueden servir como quelantes reciclables.

Comparativamente con los resultados obtenidos en la investigación realizada, y sustentada en la funcionalidad de los nanodendímeros, Cumbal y Peñaherrera²⁸ en su trabajo sobre remoción selectiva de metales pesados de suelos contaminados utilizando nanodendímeros artificiales de poliaminoamida (PAMAM), señalan que los nanodendímeros de poliaminoamida (G4.0-OH y G4.5-COOH) pueden remover el metal pesado níquel con una eficiencia de 75,9% y 87,42% respectivamente, esto debido a las diferencias en la afinidad por el metal pesado y el grado de protonización de los grupos terminales. Asimismo, los investigadores antes mencionados utilizando los nanodendímeros G4.0-OH para el metal pesado cadmio encontraron un 80,3% de eficiencia de remoción; mientras que trabajando con el nanodendímero G4.0-NH₂ la eficiencia estuvo en el orden del 91,3%.

En el caso de la utilización de las membranas semipermeables artesanales (método activo) utilizadas en conjunto con los métodos pasivos, se observó una retención de metales con más del 99%, maximizando así la ausencia de metales pesados en el líquido final, como es el caso de cadmio y mercurio; esto concuerda con los resultados obtenidos por Montoya *et al.*²⁰ quien utilizando la técnica de osmosis inversa con membranas semipermeables orgánicas de ganado ovino obtuvo resultados mayores al 90 % para metales como cadmio, zinc, arsénico y plomo.

CONCLUSIONES

Utilizando el método pasivo con humus y compost se logró una eficiencia de remoción de los metales pesados como el cobre, arsénico, cadmio y mercurio, superiores al 97% en comparación con los porcentajes menores obtenidos como el zinc para el humus con 85,67 % y el plomo para compost con 95,66 %.

En relación con el método activo utilizando membrana artesanal se logró maximizar la retención de todos los metales analizados (Pb, Cu, Zn, Ar, Cd y Hg), y en donde se encontró que metales como el cadmio y mercurio fueron completamente retenidos. También se obtuvo que el metal con menor capacidad de retención fue el cobre con valores de 98,83 % para la membrana del humus y 99,55 % para la membrana del compost.

El humus y compost tienen una elevada capacidad de remoción de metales; y al juntarlo con la membrana semipermeable, que presenta una alta capacidad de retención de metales, maximiza aún más los resultados esperados.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Toledo, V., A, Argueta. Naturaleza, Producción y Cultura en una Región Indígena de Mexico .En E. leff, y J carabias , cultura y manejo sustentable de los recursos naturales. Mexico; CIIH,UNAM, Porrúa. 1993
2. Andía, M., G, Lagos. Costos de Cierre Tranques de Relave en Cordillera, Disponible en Internet: www.cipma.cl/hyperforum/informe-tranques-Nov.doc. 2000
3. Gavrilescu, M. Removal of heavy metals from the environment by biosorption. Engineering in Life Sciences. Vol. (4), 219-232, 2004.
4. Demirbas, A. Adsorption of lead and cadmium ions in aqueous solution on to modified lignin from alkali glycerol delignification. Journal of Hazardous Materials. 221-226, 2004.
5. Vijayaraghavan, K., YS, Yun. Bacterial biosorbents and biosorption. Biotechnology Advances. 26, 266 – 291, 2008
6. Ackman, T. Feasibility of lime treatment at the Leviathan Mine using the In- line System. Mine Water and the Environment, 19, pp. 56-75, 2000.
7. Aduvire, O. Prevención de la formación y tratamiento por métodos pasivos de aguas ácidas de lluvias y escombreras.2000.
8. Cohen, R., M, Staub. Technical manual for the design and operation of a passive mine drainage treatment system. Colorado School of Mines, 1992. 69 pp.
9. Hedin R; Nairn, R., Kleinmann, R. Passive treatment of polluted coal mine drainage. Bureau of Mines Information Circular 9389, 35pp. 1994.
10. Bannister, A. Lagoon and reed-bed treatment of colliery shale tip water at Dodworth, SouthYorkshire. In Younger, P.L. (editor) Minewater Treatment Using Wetlands. Proceedings of a National Conference held 5th September 1997, at the University of Newcastle, UK. Chartered Institution of Water and Environmental Management, London. 105-122., 1997.
11. Boonstra J; Van Lier R, Janssen G, Dijkman, H, C, Buisman. Biological treatment of acid mine drainage. In: Amils R, Ballester A, editors. Biohydrometallurgy and the Environment Toward the Mining of the 21st Century, vol. 9B. Elsevier: Amsterdam; p. 559 – 67, 1999.
12. Smit, J. The treatment of polluted mine water. In Proceedings of the Congress of the International Mine Water Association, Sevilla Spain, 13-17. Volume II, pp 467-471, 1999.
13. Rose P; Boshoff G, Van Hille L, Dunn, K., Duncan, J. An integrated algal sulphate reducing high rate ponding process for the treatment of acid mine drainage wastewaters. Biodegradation, 9, pp 247-257, 1998.
14. Amrit, P. Liquid crystalline dendrimer: Towards intelligent functional materials. Girijananda Chowdhuri Institute of Management & Technology, Hatkhowapara Azara, Guwahati-17, Assam, India.95-124, 2011.
15. Bendeck, M. Origen y formación del humus. En: Memorias Seminario Materiales Orgánicos en la Agricultura. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, Comité Regional de Antioquia. Medellin. CD-Room. 9 p., 2003.
16. Farha A; Aal A; Ashour, I., Garamon, S. Removal of some heavy metal cations by synthetic resin purolite C100. Journal of Hazardous Materials. 190-194, 2009.
17. Vidal, L. Las Técnicas de Filtración Tangencial y El Medio Ambiente. Revista N°3, IV Trimestre. Universidad de Valencia, España. 1999.
18. Arteaga, J. Remoción selectiva de plomo presente en relaves mineros utilizando nanodendimeros de humus, compost, ácidos húmicos y ácidos fúlvicos puros. Universidad Nacional De Trujillo, 2013.

19. Quevedo, H. Métodos estadísticos para la ingeniería ambiental y la ciencia. Instituto de ingeniería y tecnología. Universidad Autónoma de CD. Juárez. México. 2006.
20. Montoya J; Amusquivar J, Guzmán, G., D, Quispe. THUSKA UMA: Tratamiento de aguas acidas con fines de riego (1a. ed.). La Paz: embajada real de Dinamarca/fundación pieb. 2010.
21. Barrie, D., K, Halberg. Drenaje ácido opciones de corrección: Una revisión. Fac. Cienc. Biol. Universidad de Gales. Bangor LL572UN. Reino Unido. 2000.
22. Benner S; Blowes, D; C, Ptacek. Un reactivo poroso a gran escala pared para la prevención de drenaje ácido de minas. Agua Subterránea Monit Remediat; 17: 99-107, 1997.
23. Younger P; Jayaweera A; Elliot A; Madera R; Amos, P.; A, Daugherty. Tratamiento pasivo de aguas de mina ácidos en subsurface- sistemas de flujo: RAPS explorando y barreras reactivas permeables. Tierra Contam. Reclam; 11: 127-35, 2003.
24. Zhao D.; K, SenGupta. Ligand Separation with a Copper (II)-Loaded Polymeric Ligand Exchanger. Industrial & Engineering Chemistry Research. 455-462, 2000.
25. Stevenson, F. Humus chemistry. Genesis, composition. Reactions Second Edition. John wiy Sons, Inc. New York. 1994.
26. Harris, D. Análisis Químico Cuantitativo. México D.F.: Grupo Editorial Iberoamérica. 1992.
27. Hoek, E.; G, Agarwal. Extended DLVO interactions between spherical particles and rough surfaces. Journal of Colloid and Interface Science, 50-58, 2006.
28. Cumbal, L.; A, Peñaherrera. Remoción selectiva de níquel desde suelos contaminados utilizando nanodendímeros. Cuadernos de Resúmenes Coloquio Internacional Contaminación por Metales: Impacto sobre el ambiente, la salud y la sociedad. pág. 26, 2010.

