

BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA APLICACIÓN DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN LA ETAPA DEL CIERRE AMBIENTAL DE SITIOS DE ALMACENAMIENTO DE RESIDUOS MINEROS EN OPERACIONES A CIELO ABIERTO

Dr.- Ing. Gerardo Zamora E.

***M. Sc. Ing. Octavio Hinojosa C.**

**** Walter Blanco Vino**

Docente Carrera de Metalurgia y Ciencia de Materiales - Universidad Técnica de Oruro

Director del Laboratorio de Concentración de Minerales - Universidad Técnica de Oruro

Ciudad Universitaria – Zona Sud – Oruro – Bolivia

gerardozamoraachenique@yahoo.es

[*octaviolinojosacarrasco@hotmail.com](mailto:octaviolinojosacarrasco@hotmail.com)

**walterblancovino@hotmail.com

RESUMEN

Se han desarrollado varios métodos para estabilizar los sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR; los más frecuentes, recurren al uso de geo membranas que son dispuestas por encima de los residuos inestables geoquímicamente; para luego asentar el geo textil, y sobre éste, una capa de material cuaternario; para finalmente, colocar encima el suelo vegetal o top soil, y la cobertura vegetal autóctona. Los costos de la aplicación de este método de cierre para el caso de desmontes o escombreras pueden estar por el orden de 0.223 millones de dólares por hectárea; y para el caso de la rehabilitación de sitios de almacenamiento de colas o relaves, por el orden de 0.57 millones de dólares por hectárea; montos que posiblemente no son de disponibilidad de la compañía minera o no han sido previstos al inicio de operación. Además, por lo general, el material de desencape (top soil) obtenido en la explotación del pit, no es suficiente para cumplir con el cierre anteriormente descrito.

En ese contexto, se propone las bases técnicas para la implementación de la economía circular que se circunscribe en la desulfuración de las colas o relaves antes de su disposición final, mediante el uso de espirales de concentración; pero al mismo tiempo, el re uso de las colas no sulfuradas obtenidas, tanto para su uso como material fino en coberturas secas, cómo en la fabricación artificial de top soil para el cierre ambiental. Esta alternativa de cierre, que se apropia para climas semiáridos, presenta un costo inferior de 0.19 millones de dólares por hectárea.

Mediante este trabajo de investigación, se ha podido demostrar que la implementación de la economía circular en el manejo de los residuos mineros en una operación minera desarrollada a cielo abierto, puede permitir no solo bajar los costos del cierre ambiental de sus residuos generadores de DAR, hasta en un 77%; si no que también, generar un excedente de top soil artificial; que en suma, aseguran que la operación minera no deje sitios de disposición de residuos de riesgo para el medio ambiente.

Palabras Clave: Economía Circular en Minería – Cierre ambiental – Uso de residuos en coberturas secas

ECONOMIC BENEFITS OF THE APPLICATION OF THE CIRCULAR ECONOMY IN THE STAGE OF THE ENVIRONMENTAL CLOSURE OF MINING WASTE STORAGE SITES IN OPEN PIT OPERATIONS

ABSTRACT

Various methods have been developed to stabilize DAR generating mining waste storage sites; the most frequent, resort to the use of geo-membranes that are arranged above the geochemically unstable residues; to later settle the geo-textile, and on it, a layer of quaternary material; to finally place the topsoil on top, and the native plant cover. The costs of applying this closure method in the case of clearings or dumps can be in the order of 0.223 million dollars per hectare; and in the case of the rehabilitation of tailings or tailings storage sites, in the order of 0.57 million dollars per hectare; amounts that may not be available to the mining company or have not been anticipated at the start of operations. In addition, in general, the dewatering material (top soil) obtained in the exploitation of the pit is not enough to comply with the closure described above.

In this context, the technical bases are proposed for the implementation of the circular economy that is circumscribed in the desulfurization of the tailings or tailings before their final disposal, through the use of concentration spirals; but at the same time, the reuse of the non-sulfurized glues obtained, both for use as fine material in dry covers, and in the artificial manufacture of top soil for environmental closure. This closure alternative, which is appropriate for semi-arid climates, has a lower cost of 0.19 million dollars per hectare.

Through this research work, it has been possible to demonstrate that the implementation of the circular economy in the management of mining waste in an open pit mining operation, can allow not only to lower the costs of the environmental closure of its DAR generating waste, up to 77%; if not that also, generate a surplus of artificial top soil; In short, they ensure that the mining operation does not leave waste disposal sites that are hazardous to the environment.

Key Words: Circular Economy in Mining - Environmental Closure - Use of waste in dry covers

1. Introducción

Uno de los principales desafíos de la aplicación de la economía circular en minería, es la reingeniería de los procesos extractivos que basan su accionar en una economía lineal, circunscrita a “explotar - producir - desechar”, a un modelo circular que trata de alcanzar el máximo aprovechamiento y uso eficiente de los recursos no renovables y que considera los desechos como un error de diseño.

Desde décadas anteriores, bajo el sistema de la economía lineal, la minería a cielo abierto de complejos Pb-Ag-Zn en el mundo, ha generado y genera grandes volúmenes tanto de desmontes como de relaves, que por su bajo contenido en los metales de interés económico, han sido o van siendo almacenados en el primer caso en botaderos, o el segundo caso, en diques de colas, después de haber sido sometidos normalmente a los procesos de beneficio mineral por flotación.

Los sitios de almacenamiento de los residuos mineros arriba señalados, a la conclusión de las operaciones mineras, deben ser objeto de un adecuado cierre ambiental; en especial, si éstos no son estables químicamente; es decir, cuando son generadores de drenajes ácido de roca. Es importante mencionar que, el balance entre el contenido de minerales sulfurados o acidogénicos y los minerales carbonáceos o acidívoros presentes en los residuos mineros generados en la operación minera, permite establecer si éstos en

contacto con el agua de las lluvias y el oxígeno del aire, serán o no estables químicamente [1]; y a partir de éste dictamen, ya sea durante la etapa de operación o al finalizar la explotación minera, encaminar las medidas de cierre ambiental respectivas de dichos sitios de disposición final de residuos mineros [2].

Son varios métodos empleados para estabilizar los sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR; los más frecuentes, recurren al uso de geo membranas que son dispuestas por encima de los residuos inestables geoquímicamente; para luego asentar el geo textil, y sobre éste, una capa de material cuaternario; para finalmente, colocar encima el suelo vegetal o top soil, y la cobertura vegetal autóctona. Los costos de la aplicación de este método de cierre para el caso de desmontes o escombreras pueden estar por el orden de 0.223 millones de dólares por hectárea; y para el caso de la rehabilitación de sitios de almacenamiento de colas o relaves, por el orden de 0.57 millones de dólares por hectárea; montos que posiblemente no son de disponibilidad de la compañía minera o no han sido previstos al inicio de operación [3].

En zonas semiáridas, la rehabilitación podría realizarse mediante el uso de coberturas secas que puede estar representada mediante el perfil esquemático presentado en la figura siguiente [4,5]:

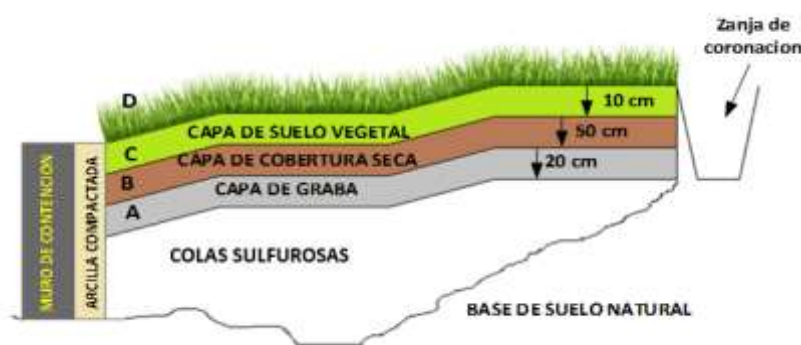


Figura 1.- Perfil transversal esquemático de coberturas secas para rehabilitación de sitios de almacenamiento de residuos mineros generadores de DAR

- La capa de grava (A) permite generar una diferencia de conductividad hidráulica respecto a la cobertura de suelo (B); y así, formar la conocida como barrera capilar.
- La capa de cobertura de suelo (B) permite almacenar el agua de lluvia.
- La capa de suelo vegetal (B) permite evitar la erosión de la cobertura de suelo.

- La cobertura vegetal cumple la función de evitar la erosión de la capa de suelo vegetal y generar la evapotranspiración.

Se ha establecido que su aplicación puede estar por el orden de 0.19 millones de dólares por hectárea [6].

La aplicación de las bases técnicas para la implementación de la economía circular en procesos minero-metalúrgicos [7,8], consta de las siguientes actividades:

- La separación selectiva de los desmontes generados en la explotación a cielo abierto en base pruebas geoquímicas estáticas (determinación del valor del Potencial Neto de Neutralización y la relación del Potencial Neutro sobre el Potencial Ácido).
- Desulfurización de las colas del proceso de flotación que permite obtener los concentrados de los metales de interés económico, por medio de concentración en espirales.
- Uso del producto no sulfurado de la concentración en espirales como cobertura seca (material fino), previa etapa de deslame, en el cierre ambiental tanto del sitio de disposición de relaves y de los desmontes; además de su uso para la conformación del “top soil artificial”, mezclando con el compost generado a partir del proceso de compostaje de la materia orgánica de los residuos del comedor del campamento minero y de los lodos del proceso de tratamiento de las aguas residuales tratadas.
- Uso de las aguas residuales tratadas para la etapa de flotación de minerales a objeto de disminuir el consumo de las aguas subterráneas o superficiales requeridas para el proceso.
- Producción de cobertura vegetal autóctona en invernaderos con colas del proceso de desulfurización, enriquecidos con materia orgánica y nutrientes procedentes del proceso de compostaje.

Es la actividad de desulfurización de las colas del proceso por medio de concentración en espirales, antes de su disposición final, la que permite la obtención de colas geoquímicamente estables (sin la presencia de sulfuros) que pueden ser luego utilizadas tanto para la disposición de material fino para las coberturas secas como para la fabricación de top soil.

La espiral Humphrey se introdujo en 1945; y su principio básico se ha mantenido hasta la actualidad, pero con progresos importantes en cuanto a su diseño

y técnicas de fabricación [9]. Los materiales en su construcción han evolucionado desde la madera y hierro fundido, hasta el uso de poliéster reforzado en fibra de vidrio. Permite operar grandes volúmenes de material mediante uso de paquetes seriales de varias espirales en un solo módulo y a muy bajos costos, en especial, si se aprovecha los gradientes de altura, propios de los terrenos para la alimentación de la carga por gravedad.

Finalmente, la aptitud de las colas reprocesadas en la desulfurización, para su uso como coberturas secas, puede ser evaluado mediante el modelo de MK, desarrollado en la UQAT (Universidad de Quebec – Ativi – Temiscaminge – Canadá), que retiene los mismos conceptos físicos como el Kovács original y que fue construido en (1981). El modelo permite determinar la conductividad hidráulica de un suelo y su capacidad de almacenamiento de agua a partir de la introducción como datos de los factores geotécnicos característicos de los suelos como son el d_{60} , d_{10} y la densidad aparente y la porosidad. Así, es posible predecir si un suelo es o no apto para su uso como cobertura seca [10].

En ese contexto, en el presente trabajo de investigación, se ha evaluado el impacto económico que se puede tener, al realizar la desulfurización como etapa previa a su disposición final y su repercusión en los costos del cierre ambiental de los sitios de disposición de residuos mineros generadores de DAR.

2. Materiales y métodos

Se ha tomado una muestra representativa de los relaves de una operación minera que obtiene concentrados de Pb-Ag y Zn-Ag por flotación diferencial de sulfuros, a objeto de realizar su caracterización física, química, mineralógica y geoquímica (test ABA), para determinar su requerimiento de cierre ambiental del respectivo sitio de almacenamiento.

La caracterización física ha consistido en determinar el d_{10} y el d_{80} de las muestras en base a un análisis granulométrico; además de la determinación de la porosidad y la densidad aparente. Por otra parte, la caracterización química ha consistido en el análisis químico de las muestras por Sb, As, Ca, Cd, Cu, Fe, Pb, Zn S_{total} y Sulfato en un laboratorio acreditado (Spectrolab). Además, la caracterización mineralógica de las muestras se ha llevado adelante mediante difracción de rayos X a objeto de determinar los

minerales acidogénicos (generadores de DAR), acidívoros (consumidores de DAR), y posteriormente, los minerales secundarios. Finalmente, la caracterización geoquímica se ha llevado a cabo mediante el test ABA a objeto de determinar los valores del Potencial Neto de Neutralización (en unidades de Kg CaCO₃/tonelada de residuo) y el valor de la relación del Potencial Neutro (NP) sobre el Potencial Acido (AP), también en las mismas unidades señaladas; y a partir de los valores encontrados, determinar la estabilidad geoquímica de los residuos estudiados en base a los criterios ABA.

La experimentación metalúrgica en sí, se llevó a cabo de acuerdo a las siguientes operaciones unitarias: Secado - Homogeneización, cuarteo y obtención de muestras representativas para las diferentes pruebas de desulfuración por espirales Humphrey, previo deslame en un ciclón de 2 pulgadas. Las pruebas de desulfuración se han realizado en una espiral de laboratorio, dispuesta en circuito cerrado con un hidrociclón, para efectuar el respectivo deslame (eliminación de la fracción muy fina).

Finalmente, se han caracterizado geoquímicamente las colas del proceso de desulfuración obtenido en la desulfuración y se ha estudiado su posibilidad de uso en forma de coberturas secas en el cierre ambiental a partir del uso del MK – Modell.

3. Resultados y discusión

Las pruebas de deslame mediante ciclónaje a 2", permitieron demostrar que: A mayor presión de alimentación al ciclón, el peso del under flow obtenido es mayor; alcanzando a un 65% en peso del under flow, aproximadamente, para una presión de alimentación de 30 psi; este análisis es para un porcentaje sólidos de un 24%.

Los mejores resultados se logran a un menor porcentaje sólidos, 12%, y una mayor presión de alimentación al ciclón, 30 psi; bajo dichas condiciones se obtuvo:

Producto	% Peso	Ley, %S	% Distrib. S
Over flow	24.75	7,08	32,35
Under flow	75.25	4,87	67,65
Alimentación	100.00	5,42	100,00

Tabla 1.- Resultado del ciclónaje a 2" de la muestra de colas

En los productos de dicho deslame con ciclón, el over flow presenta un contenido de **7.08 % de S**; mientras que, el under flow **4.87 % de S**.

Tomando en cuenta el mejor resultado de las pruebas de deslame en ciclón, se llevó a cabo la prueba de desulfuración previo deslame, siguiendo el siguiente flujograma:

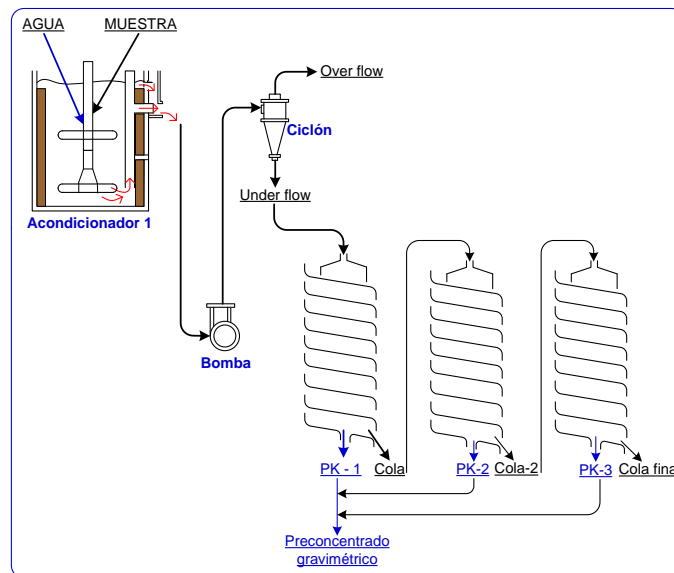


Figura 2.- Bosquejo de la experimentación metalúrgica de la desulfuración en espirales.

Beneficios económicos de la aplicación de la economía circular en la etapa del cierre ambiental de sitios de almacenamiento de residuos mineros en operaciones a cielo abierto

A pesar de tratarse de un material relativamente fino, inicialmente el d_{80} es de 225 micrones y el $d_{50} = 60$ micrones, la concentración en **tres pasos por espiral**

especial para finos, permitió obtener los siguientes resultados:

Producto	% P. Etapa	% P. Total	Ley, % S	% D. Etapa	% D. Total
Preconc.- 1	20.32	15,29	15.14	63.16	42,73
Preconc.- 2	15.65	11,78	7.07	22.72	15,37
Preconc.- 3	12.29	9,25	4.25	10.73	7,25
Total Preconc	48.26	36,32	9.75	96.60	65,35
Cola	51.74	38,93	0.32	3.40	2,30
Cabeza calc.	100.00	75,25	4.87	100.00	67,65

Tabla 2.- Balance metalúrgico del procesamiento de desulfuración, previa etapa de deslame, en espirales

Es decir, las colas presentan tan sólo el 3.40% de distribución del azufre en un producto que tiene una ley de apenas **0.32 % de S**; y por tanto, no generadora de DAR.

La prueba geoquímica estática de las colas obtenidas del proceso de desulfurización en espiral, con previo deslame, arrojó los resultados siguientes:

	%S total	%Sulfato	AP (kgCaCO3/t)	NP (kgCaCO3/t)	NNP (kgCaCO3/t)	NP/AP (kgCaCO3/t)
CE 2	0,32	0.01	9,9	9,5	-0,4	0,96

Tabla 3.- Datos de las características geo mecánicas de las colas de proceso de desulfuración en espirales, previa etapa de deslame en ciclón

Por lo que, de acuerdo al **primer criterio** de valoración, el valor del NNP se encuentra entre -20 y +20 kg CaCO₃/t; por tanto, el residuo se encuentra en la **zona de incertidumbre**; además, considerando el **segundo Criterio**, la relación de NP/AP se encuentra entre -1 y +1; por tanto, el residuo se encuentra en la **zona de incertidumbre**. La realización de una prueba geoquímica dinámica, permitió demostrar que dichos residuos **“no son generadores de DAR”**.

coberturas SDR, se requiere que estas contengan un mayor porcentaje en peso de material fino o “limo”; además de que, el contenido de azufre no supere el 1 % de S; por tanto, se puede hacer el ejercicio que consiste en mezclar, de acuerdo a los balances metalúrgicos obtenidos en la operación de deslame y la pre concentración en espiral, el over flow del deslame (material muy fino), con las colas de la concentración en espiral:

Por otra parte, los resultados de la desulfuración por espirales, permitieron obtener un producto no sulfurado (colas espiral CE 2), que representa un **38.93 % en peso del total de alimentación**, después del deslame, y con un contenido en azufre muy bajo de **0.32%**; y por tanto, es considerado como **NO GENERADOR DE DAR**. Es decir, que **prácticamente cerca al 39% de las colas finales se podrían, después de su deslame, ser dispuestas “sin necesidad de medidas ambientales de remediación, después de su disposición final”**. Es importante señalar que, después de introducir los datos de las propiedades geotécnicas de este material obtenido, éste no puede ser usado directamente como material fino de la cobertura seca.

A objeto de que las colas desulfuradas puedan ser consideradas como apropiadas para su uso en

- ✓ Al mezclar el 100% de las colas obtenidas en la desulfurización en espiral con el 100% del over flow del deslame en ciclón de las colas iniciales estudiadas, el % de S en el producto mezclado tendría **2.99 % de S**; y por tanto, sería “generador de DAR”.
- ✓ Por otra parte, si mezcláramos **10, 15 y 20 % en peso del over flow del deslame** con el 100% de las colas de las espirales, se tendría productos que presentan **0.73; 0.92 y 1.10 % de S**; es decir, todavía productos “no generadores de DAR”.
- ✓ La curva de retención del producto obtenido, mezclando el **20 % en peso del over flow con el 100 % de las colas de las espirales**, presenta a partir de la simulación con el MK-Model la siguiente curva de retención de humedad y los siguientes parámetros granulométricos:

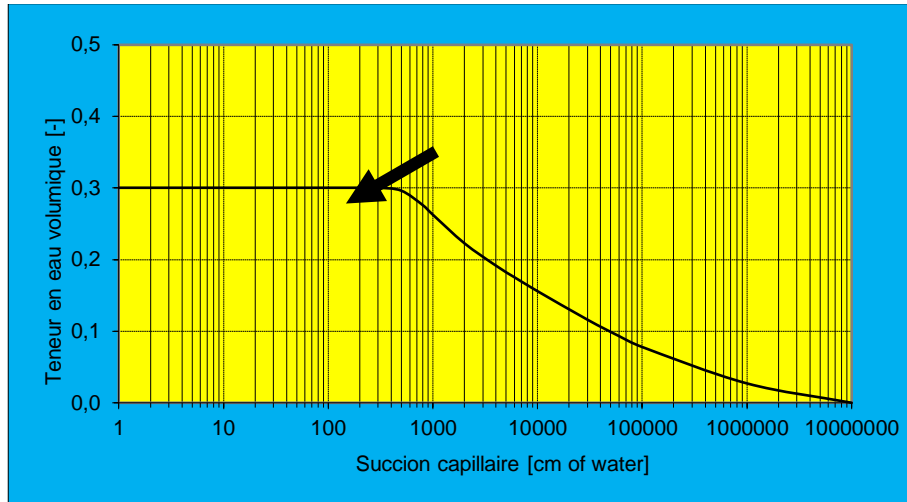


Figura 3.- Curva de almacenamiento de agua vs succión de las colas desulfuradas en espirales + 20% over flow del cicloneo

d_{10} (μ)	d_{60} (μ)	C_u	ϵ	AEV cm	K_{sat}
					cm/s
2.5	45	18.0	0.43	600	8.23×10^{-6}

Tabla 4.- Datos de las características geo mecánicas de las colas de proceso de desulfuración en espirales + 20% over flow del cicloneo

De la curva de retención de humedad presentada, se puede concluir que dicho producto mezclado (CE 1C) “es relativamente apto para su uso en coberturas SDR”; puesto que, el valor del punto de entrada de aire

AEV ocurre a una succión de **600 cm** de columna de agua.

Los resultados del balance metalúrgico mezclando el 20% del over flow del deslame con el 10% de las colas de espiral, se presentan a continuación:

Producto	Peso (t)	% Peso	Ley, % S	Finos	% Dist. S
Over flow (20 % Peso)	2019,2	11,54	7,08	142,96	74,28
Colas (100% Peso)	15472,33	88,46	0,32	49,51	25,72
Total Mezcla	17491,53	100,00	1,10	192,47	100,00

Tabla 5.- Balance metalúrgico de la mezcla de colas del proceso de desulfuración en espirales + 20% over flow del cicloneo

En base a una prueba geoquímica dinámica de la mezcla presentada, se pudo determinar que el material “no es generador de DAR”.

serviría como cobertura SDR para realizar la rehabilitación mediante coberturas secas.

Por tanto, del total de colas que ingresaría al proceso de desulfuración, previo deslame, y considerando luego una mezcla del 20% en peso del over flow del cicloneo y el 100% de las colas sin sulfuro del proceso citado, el **43.73% en peso sería un residuo con un contenido de 1,1 % de S (No Generador de DAR) y**

Desde el punto de vista económico, y haciendo las siguientes consideraciones técnicas, que podrían variar en función del tipo de yacimientos objeto de explotación:

- Material que es extraído del pit de explotación: 100000 TPD

Beneficios económicos de la aplicación de la economía circular en la etapa del cierre ambiental de sitios de almacenamiento de residuos mineros en operaciones a cielo abierto

- Desmontes oxidados (óxidos, material sedimentario y sulfuros baja ley) generados: 60% del material extraído.
- Desmontes sulfurados de alta ley: 13.3 % del material extraído.
- Colas del procesamiento por flotación diferencial de Pb-Ag y Zn-Ag: 26.7% del material extraído.
- Top soil o material de desencape de la explotación a cielo abierto: 0.09% del material extraído.
- Densidad promedio de los desmontes oxidados: 2.66 t/m³
- Densidad promedio de desmontes sulfurados: 2.88 t/m³
- Densidad de las colas del proceso: 2.81 t/m³
- Densidad del top soil: 2.1 t/m³
- Alturas de disposición de desmontes en general: 20 m.
- Profundidad promedio del embalse o sitio de disposición de colas o relaves: 10 m.
- Altura de top soil requerido en la cobertura seca: 0.2 m.
- Altura de material fino (colas de procesamiento) en la cobertura seca: 0.6 m.
- Compost producido a partir de residuos de comida del campamento y lodos del tratamiento de aguas residuales en la operación minera: 0.07 % del material extraído.
- Estimación de la vida útil de la operación minera a cielo abierto: 20 años.
- Costo de rehabilitación de sitios generados de DAR mediante geo membranas:
0.223 millones de dólares/ha (para el caso de desmontes)
0.57 millones de dólares (para el caso de relaves)

Con los datos técnicos arriba señalados, se ha podido estructurar la tabla siguiente, que compara la explotación bajo la filosofía de producción minera lineal, con la que se podría desarrollar en el contexto de la economía circular:

	ECONOMÍA LÍNEAL	ECONOMÍA CIRCULAR	
TOTAL DE EXPLOTACIÓN (TPD)	150000	150000	
RESIDUOS (TPD)			
DESMONTES OXIDADOS (TPD)	60000	90000	NO GENERADORAS DE DAR
DESMONTES SULFUROS ALTA LEY (TPD)	13330		GENERADORAS DE DAR
COLAS DEL PROCESO (TPD)	26670		GENERADORAS DE DAR
COLAS REPROC. SULF. ALTA LEY (TPD)		12780	NO GENERADORAS DE DAR
COLAS DESULFURACIÓN (TPD)		15620	GENERADORAS DE DAR
ÁREA DE REHABILITACIÓN (Ha/año)	43,15	33,22	
VIDA ÚTIL DE LA MINA (años)	20	20	
TOP SOIL (Millones de Toneladas)	-1609,47	1355,96	
COSTO REHABILITACIÓN (Millones \$us)	491,89	126,25	
BENEFICIO NETO (Millones \$us)		365,64	

Tabla 6.- Comparación técnica y económica de la explotación bajo la filosofía de producción minera lineal, con la que se podría desarrollar en el contexto de la economía circular:

En la tabla anterior, no se ha insertado los costos de inversión y de operación que son requeridos para la implementación de la planta de desulfurización en

espirales, con previa etapa de clasificación en hidrociclones.

De la tabla arriba presentada, es posible deducir que:

- En el concepto de producción minero – metalúrgica de economía lineal actual, se requieren cerca de 492 millones de dólares para realizar el cierre de los sitios de disposición de residuos generadores de DAR (Desmontes sulfurados de alta ley) y de los relaves o colas del proceso, aplicando el método de coberturas con geo membranas.
- Existe un déficit de materia de top soil para el cierre de cerca de 1.6 millones de toneladas para realizar el cierre de los sitios de almacenamiento tanto de desmontes como relaves, generadores de DAR.
- En el concepto de producción minero – metalúrgica de economía circular propuesta, se requieren cerca de 126 millones de dólares para realizar el cierre de los sitios de disposición de residuos generadores de DAR (Desmontes sulfurados de alta ley) y de los relaves o colas del proceso, aplicando el método de coberturas secas, utilizando las colas desulfuradas como material fino. Representa un ahorro entonces de 74.33 % en los costos de cierre ambiental.
- Existe un superávit de cerca de 1.4 millones de toneladas del material de top soil artificial, preparado mediante la mezcla de las colas desulfuradas y el compost obtenido a partir de los residuos de comida del campamento y los lodos de la planta de tratamiento de las aguas residuales domésticas, para realizar el cierre de los sitios de almacenamiento tanto de desmontes como relaves, generadores de DAR.

4. Conclusiones

Del presente trabajo de investigación se coligen las siguientes conclusiones, que han sido establecidas para una explotación a cielo abierto de un yacimiento de complejos sulfurados de Pb-Ag-Zn de 100000 TPD y una vida útil de 20 años:

- Se requieren cerca de 492 millones de dólares para realizar el cierre de los sitios de disposición de residuos generadores de aplicando el método de coberturas con geo membranas, y existe un déficit de materia de top soil para el cierre de cerca de 1.6 millones de toneladas para realizar el cierre de los

sitios de almacenamiento tanto de desmontes como relaves.

- Con la aplicación del concepto de producción minero – metalúrgica de economía circular propuesta, se requieren sólo cerca de 126 millones de dólares para realizar el cierre de los sitios de disposición de residuos generadores de DAR (Desmontes sulfurados de alta ley) y de los relaves o colas del proceso, aplicando el método de coberturas secas, utilizando las colas desulfuradas como material fino. Además, se tendría un superávit de cerca de 1.4 millones de toneladas del material de top soil artificial, preparado mediante la mezcla de las colas desulfuradas y el compost obtenido a partir de los residuos de comida del campamento y los lodos de la planta de tratamiento de las aguas residuales domésticas, para realizar el cierre de los sitios de almacenamiento tanto de desmontes como relaves, generadores de DAR.

5. Bibliografía

1. Benzaazoua, M., & Zamora, G. Predicciones de drenaje ácido de roca mediante tests geoquímicos estáticos y dinámicos. Revista Metalúrgica UTO. 2003. ISSN 2078-5593.
2. Zamora E. G.; Lanza F. J. y Arranz G.J. Metodología para la identificación y evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros con fines de priorización para su remediación. Revista de Medio Ambiente y Minería. 2018, N° 5, pp 31-43. ISSN 2519-5352.
3. Activos Mineros SAC - Experiencias de Remediación de Pasivos Ambientales en el Perú. Taller: Evaluación y Recuperación de Pasivos Ambientales Mineros. Cartagena de Indias. (2011).
4. Zamora E. G. – Hinojosa C. O. – Salas C. A. Estudio de desulfurización de relaves generadores de DAR, antes de su disposición de final, como alternativa de manejo y mitigación de impacto ambiental. Revista de Medio Ambiente y Minería. 2017. N°3, 44 – 52 p. ISSN 2519-5352.
5. Zamora E. G. – Lafuente C. J. Propuesta de rehabilitación ambiental del pasivo minero de Japo - Santa Fe. REV. MAMYM. 2020, vol.5 (1), pp. 3-18. ISSN 2519-5352.

6. Hinojosa C. O. – Salas C. A. y Zamora E. G. Restauración de Sitios Mineros Mediante Coberturas de Efecto SDR. Rev. Met. UTO. 2011, n.30, pp. 5-20
7. Zamora E. G. & Hinojosa C. O. Economía circular en minería - Caso de Estudio: Producción minera de Concentrados de Pb-Ag-Zn en Bolivia. Revista de Medio Ambiente y Minería. 2019. Vol 4 (1), p 3 – 17. ISSN 2519-5352.
8. Economía circular en minería: procesamiento de desmontes como alternativa de remediación ambiental. REV. MAMYM - 2019, vol.4 (2), pp. 3-18.
9. Carbajal, C.D. & Chávez, A.E. Estudio del concentrador gravimétrico helicoidal hecho con fibra de vidrio y sus parámetros de funcionamiento. (2015)
10. AUBERTIN, M., BUSSIÈRE, B., AACHIB, M. et CHAPUIS, R.P. (1996b). Une modélisation numérique des écoulements non saturés dans des couvertures multicouches en sols. Hydrogéologie, 1 : 3-13

Artículo recibido en: 26.06.2020

Manejado por: Elvis Trujillo.

Artículo aceptado: 27.08.2020

Revista de Medio Ambiente Minero y Minería 5 (2): 11 – 18, Diciembre 2020. ISSN 2519-5352

TRATAMIENTO DE SUELOS MINEROS MEDIANTE CO-COMPOSTAJE CON BIOCHAR, ESTIÉRCOL OVINO Y RESIDUOS ORGÁNICOS DOMICILIARIOS

Luís Díaz, Hotman Laguna, Yenireth Gutiérrez, Aslenis Melo, Ana Vega

Universidad Popular del Cesar, Colombia

luisdiaz@unicesar.educo

RESUMEN

Actualmente se requieren estrategias combinadas para minimizar el impacto ambiental de actividades antrópicas. El objetivo de este estudio fue evaluar el co-compostaje de residuos sólidos urbanos, caprinaza y biochar para el tratamiento en vivero de suelo de acopio de mina del departamento del Cesar. La metodología incluyó el análisis fisicoquímico y microbiológico de suelo antes y después de aplicado el co-compost en vivero y el sostenimiento de Brachiaria y Caesalpinia ébano. Las propiedades del co-compost y su efecto favorable en suelo, indican un alto potencial para procesos de remediación con beneficio de aprovechamiento de residuos sólidos urbanos rurales e industriales.

Palabras claves: Actividad antrópica, residuos sólidos, compost; restauración de suelos.

TREATMENT OF MINING SOILS THROUGH CO-COMPOSTING WITH BIOCHAR, SHEEP MANURE AND ORGANIC HOUSEHOLD WASTE

ABSTRACT

Currently, combined strategies are required to minimize the environmental impact of anthropogenic activities. The objective of this study was to evaluate the co-composting of urban solid waste, caprinaza and biochar for the treatment in nursery of soil of mine collection of the department of Cesar. The methodology included the physicochemical and microbiological analysis of soil before and after the co-compost was applied in the nursery and the support of Brachiaria and Caesalpinia ebano. The properties of co-compos and its favorable effect on soil indicate a high potential for restoration processes with the benefit of the use of urban and rural solid waste.

Key words: Anthropic activity, solid waste, compost; soil restoration