

METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN DE RIESGOS APLICADA AL PASIVO AMBIENTAL MINERO DE JAPO EN LA SUBCUENCA POOPÓ PARA SU PRIORIZACIÓN DE REMEDIACIÓN AMBIENTAL

Dr.- Ing. Gerardo Zamora Echenique¹

Ing. Carla Gutiérrez ²

Dr.- Ing. Julio César Arranz González³

¹ Carrera de Metalurgia, Universidad Técnica de Oruro

² Carrera de Minas, Universidad Técnica de Oruro

Instituto Geológico de España – Investigador IGME

gerardozamoraechenique@gmail.com

carlavictoriagutierrezcondori@gmail.com

jc.arranz@igme.es

RESUMEN

En el Distrito Minero de Japo – Santa Fe de la subcuenca Poopó, ubicada en el Departamento de Oruro – Bolivia, se encuentra el depósito de colas de Japo, altamente generador de Drenaje Ácido de Roca, generando un pH de escorrentía de 2.5 y elevadas concentraciones de metales pesados disueltos, que drenan directamente a la cuenca vertiente del sector, y que llegan finalmente hasta el Lago Poopó.

El objetivo del presente trabajo de investigación se circunscribe a aplicar la metodología del Instituto Geológico Minero de España (IGME) para la evaluar el riesgo del PAM – Japo, en base a la información generada en el Proyecto Piloto Oruro, y como punto de partida para llevar adelante una escala de priorización de los PAM de la subcuenca, con fines de remediación ambiental.

Los resultados de la investigación demuestran que los escenarios de riesgo por contaminación con afección a las aguas superficiales (C1), la erosión de sedimentos por erosión hídrica (C4) y la movilización de material particulado por acción del viento (C3) y sus efectos sobre personas y la población (C1PO y C4PO) y sobre el medio natural (C3NA), son **muy altos**; además de que, el riesgo por contaminación con afección a las aguas superficiales (C1), aguas subterráneas (C2), movilización de material particulado (C3), erosión de sedimentos contaminados por erosión hídrica (C4), además del fallo de rotura de dique o talud exterior del dique de lodos (FPRE) y sus efectos sobre el medio natural (C1NA), (C2NA) y (C4NA), contacto directo originado por acceso ocasional (CD), personas y la población (C2PO, C4PO y FPREPO), y finalmente, sobre el medio socioeconómico (FPRESE), son **altos**. Por tanto, y en base a la evaluación de riesgos descrita, es requerida una “rehabilitación inmediata” del PAM - Japo.

Palabras clave: Pasivos ambientales mineros, evaluación de riesgos, subcuenca Poopó, pasivo minero de Japo.

ABSTRACT

In the Japo - Santa Fe Mining District of the Poopó sub-basin, located in the Department of Oruro - Bolivia, there is a tailings deposit in Japo, which is a high generator of Acid Rock Drainage, generating a runoff pH of 2.5 and high concentrations of dissolved heavy metals, which drain directly into the watershed of the sector, and eventually reach the Poopó Lake.

The objective of this research work is limited to applying the methodology of the Geological Mining Institute of Spain (IGME) to evaluate the risk of the MAP - Japo, based on the information generated in the Oruro Pilot Project, and as a starting point to carry out a scale of prioritization of the MAPs of the sub-basin, for environmental remediation purposes. The results of the investigation show that the risk scenarios for contamination affecting surface water (C1), sediment erosion by water erosion (C4) and mobilization of particulate matter by wind (C3) and their effects on people and the population (C1PO and C4PO) and on the natural environment (C3NA) are very high; in addition to the risk of contamination affecting surface water (C1), groundwater (C2), mobilization of particulate material (C3), erosion of contaminated sediments due to water erosion (C4), in addition to the failure of the dike or outer slope of the sludge dam (FPRE) and its effects on the natural environment (C1NA), (C2NA) and (C4NA), direct contact caused by occasional access (CD), people and the population (C2PO, C4PO and FPREPO), and finally, on the socioeconomic environment (FPRESE), are high. Therefore, based on the risk assessment described above, an "immediate rehabilitation" of the MAP - Japo is required.

Key words: Environmental mining liabilities, risk assessment, Poopó sub-basin, Japo mining liabilities.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Ubicación del pasivo ambiental minero de Japo.

Siglos de explotación pasada y actividades mineras actuales en la zona de Santa Fe, han dejado grandes cantidades de residuos mineros a lo largo de los diferentes periodos de la historia minera de la región, los cuales generan impactos ambientales debido a la presencia de sulfuros metálicos, que al quedar expuestos al oxígeno de la atmósfera y el agua de las lluvias, son oxidados y generan drenaje ácido de roca, que se caracteriza por una alta presencia de acidez; metales tóxicos pesados disueltos y sulfato, que con el transcurrir del tiempo, provocan enormes cargas de contaminación a los suelos y cuerpos acuáticos receptores superficiales y subterráneos. (Zamora G. & Meza R., 2022).

El pasivo ambiental minero (PAM) de Japo, presenta colas de gravimetría mezcladas con colas de flotación, arenosas a finas, con potenciales netos de neutralización elevados, las mismas se encuentran expuestas a procesos de oxidación; por lo tanto, no son estables químicamente. La Fotografía 1, muestra el lugar donde han sido depositadas las colas de Japo. (Proyecto Piloto Oruro – Depósitos de Colas de minerales).



Fotografía 1.- Colas Japo–Santa Fe

Según la clasificación de climas del Servicio Nacional de Hidrología y Meteorología, basada en un criterio de evapotranspiración, esta zona corresponde a un clima seco de tundra (ET) y polar de alta montaña (EB). Según la clasificación de W. Köppen mencionada por el Altiplano en general tendría un clima clasificado como BSwk o de estepa con invierno seco frío.

En base a los datos climáticos obtenidos de las estaciones meteorológicas, se observa que la temperatura promedio en la zona se calcula en 14 °C. El área de estudio se encuentra a una elevación aproximada de 3.700 m.s.n.m, las temperaturas extremas que se reportaron varían entre + 24 ° C

durante el día en verano y – 17 ° C durante la noche en invierno. La precipitación media anual obtenida es de 460,73 mm.

De acuerdo al inventario de los pasivos ambientales mineros, el sitio de disposición de los relaves de Japo ocupa un área de 8000 m² y un volumen de 388000 m³, que representan a cerca de 581000 toneladas. (Zamora, Lafuente & Hinojosa, 2020).

En base al análisis de la imagen satelital, se ha determinado un área cerca de 8,3 km² para el vaso receptor de la microcuenca de la quebrada Japo. En la tabla 1, se reportan los datos morfométricos complementarios de la subcuenca. En una primera aproximación se puede estimar que el 10% del área de la microcuenca tiene en superficie residuos de desmontes sulfurosos dispersos generadores de DAR. La longitud de la cuenca es de 4.08 Km y la cota más alta de la cuenca es de 4222 m y la más baja de 3736 m. El blanco de la contaminación por la extrema carga de metales pesados disueltos, es la quebrada de Japo, que finalmente lleva sus aguas hasta el Lago Poopó.

1.2 Descripción del pasivo ambiental minero de Japo

Las colas de flotación, arenosas a finas, fueron generadas en la planta gravimétrica y de flotación Japo, y se caracterizan por presentar potenciales netos de neutralización elevados, las mismas se encuentran expuestas a procesos de oxidación. Con fines de análisis ambiental, se tomó una muestra de todo el perfil de las colas de Japo, como se muestra en la fotografía siguiente:



Fotografía 2.- Colas Japo–Santa Fe

Los resultados del análisis granulométrico son presentados en la figura 2. De dicha gráfica, es posible determinar que el d₅₀ de la muestra es de 220 micrones; por tanto, se trata de un material fino de elevada superficie específica, lo que hace que las reacciones químicas de oxidación de sulfuros y formación de DAR queden favorecidas.

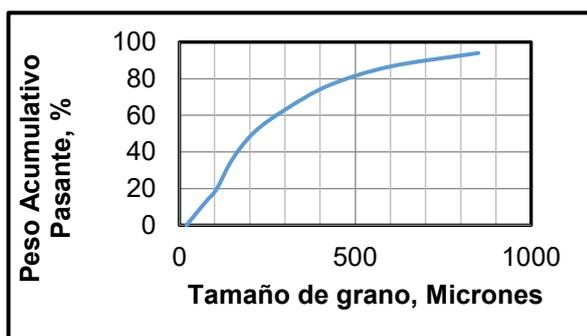


Figura 1.- Curva de distribución granulométrica de las colas Japo (Zamora, Lafuente & Hinojosa, 2020).

La densidad del material es de 2.689 g/cm³ y una superficie específica de 1.645 m²/g. La tabla siguiente, muestra los resultados obtenidos del análisis químico de una muestra de PAM:

MUESTRA	Cu	Zn	Pb	Cd	As
PROFUNDIDAD(M)					
JA (0-1)	9,24	35,2	0,12	0,12	0,6
JA (1-3)	126,4	53,6	0,32	1,1	0,76
JA (3-5)	168,8	180,8	3,6	3,05	1,04
JA (BASE)	8,32	49,76	0,38	0,64	1,04

Tabla 1.- Análisis químico en g/t de las colas de Japo (PPO)

Dames and More hizo un análisis químico de la muestra objeto de estudio, ha sido analizada por digestión total por los metales pesados de interés. Los resultados son presentados en la tabla siguiente:

	% Fe	% S	% SO ₄ ⁼	% Al	% K	% Na	% Mg	% Mn	% Ba	% Ca
Residuo	5,3	6,80	1,02	2,65	1,2	0,2	0,132	0,006	0,021	0,04
	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
	Co	Cr	Ni	Sn	Sb	As	Cu	Zn	Cd	Pb
	18	342	102	240	1.480	1.320	340	580	23	3.950

Tabla 2. Análisis químico de la muestra JAPO por digestión total (PPO)

Los resultados del análisis mineralógico cualitativo de la muestra objeto de estudio, por Difracción de Rayos X, son presentados en la Tabla 3.

Minerales Sulfurados		Minerales Oxidados	
Principales	Secundarios	Principales	Secundarios
Pirita Arsenopirita Marcasita Galena Esfarelita	Plumbojarosita Jarosita Argentojarosita Sulfuros de Sn	Casiterita Cuarzo Hematita	Illita Caolinita Alunita Romboclasa Anhidrita Yeso

Tabla 3. Análisis por difracción de Rayos X de la muestra de Japo. (Jiménez et al., 2018)

Los drenajes ácidos de roca que se generan en el sector son perceptibles y por su ubicación, hace que sus escorrentías cargadas de metales pesados y a un pH de 2.11, drenen directamente a la cuenca vertiente del sector (Santa Fe), y lleguen a la Cuenca San Juan Sora Sora y finalmente hasta el Lago Poopó.

A partir de la muestra obtenida, y con los resultados del análisis de % Azufre Total de 1.8 y de 0.01 % de Sulfato presentes en la muestra, se determinó que el contenido de % Sulfuros es de 1.79, y por tanto, el valor del Potencial Ácido de la Muestra (AP) fue de 55.94 kg CaCO₃/t; además, el valor del Potencial Neutro determinado fue de 1.3 kg CaCO₃/t; por lo que el valor del Potencial Neto de Neutralización (NNP) calculado fue de -54.64 kg CaCO₃/t; por lo que, se puede deducir que bajo el **Primer Criterio ABA**, debido a que el valor NNP menor a - 20 kg CaCO₃/t, entonces **es generador de DAR**. Por otra parte, y aplicando el **Segundo Criterio ABA**, y dado a que la relación de NP/AP es de 0.023, menor a la unidad, entonces el residuo puede ser considerado también como **generador de DAR**. Desde el punto de vista de la “exigencia para fines de restauración”, la normativa canadiense obliga a una remediación ambiental si la relación de NP/AP es < 3; es decir que, para el caso del residuo minero de Japo estudiado, la relación de NP/AP es muy inferior a 3, por lo que, **son requeridas medidas urgentes de remediación** del sitio minero. (Zamora, Lafuente & Hinojosa, 2020).

Estudios anteriormente realizados del PAM de Japo, reportan variación del pH en relación al perfil de profundidad del mismo, como se ilustran en la gráfica siguiente:

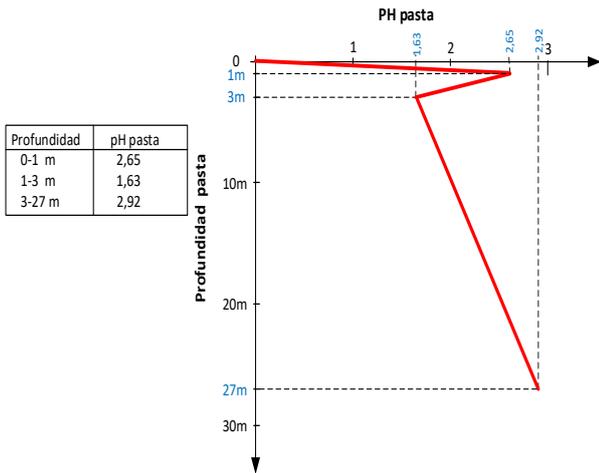


Figura 2.- pH en pasta del PAM de Japo (Zamora, Lafuente & Hinojosa, 2020).

Es decir, que el pH en pasta de las colas JAPO están entre 1,6 a 2,2 (altamente generadoras de DAR).

2. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS

La metodología de evaluación de riesgos propuesta por el IGME para calcular la evaluación de riesgo de pasivos ambientales mineros, se circunscribe a considerar los siguientes escenarios de riesgo por contaminación y sus efectos sobre el medio natural, las personas y población, y además el medio socioeconómico, tal como de detalla en la tabla siguiente:

	EFFECTOS SOBRE EL MEDIO NATURAL	EFFECTOS SOBRE LAS PERSONAS Y LA POBLACIÓN	EFFECTOS SOBRE EL MEDIO SOCIOECONÓMICO
Escenarios de riesgo por contaminación			
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (C1).	C1NA	C1PO	C1SE
Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2).	C2NA	C2PO	C2SE
Movilización de material particulado por acción del viento (C3)	C3NA	C3PO	C3SE
Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (C4).	C4NA	C4PO	C4SE
Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades (CD)	---	CD	---
Escenarios de riesgo por fallo en la estructura			
Fallo o rotura del talud de escombreras de desmonte, estériles o minerales de baja ley (FESC)	FESCNA	FESCPO	FESCSE
Fallo o rotura del talud de pilas de residuos de lixiviación (FLIX)	FLIXNA	FLIXPO	FLIXSE
Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)	FPRENA	FPREPO	FPRESE
PARA CADA UNO DE LOS ESCENARIOS DE RIESGO SE HACE UNA VALORACIÓN DE LA PROBABILIDAD DE OCURRENCIA Y DE LA SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS			

Tabla 4.- Escenarios de riesgo de contaminación y efectos sobre el medio natural, las personas y población, y además el medio socioeconómico (Arranz-González et al., 2019)

De acuerdo a la ISO/DIS 31000 referida al manejo del riesgo, la función de la probabilidad (P) y severidad (S), está expresada de acuerdo a esta relación:

$$R = f(P, S)$$

En la metodología del IGME, el riesgo está definido en función de los Índices de Probabilidad (IP) y el de Severidad (IS)

$$R = f(IP, IS)$$

La metodología del cálculo se realiza mediante fórmulas considerando los componentes respectivos referidos a cada escenario de riesgo, y que se detallan a continuación, y que han sido ampliamente descritos en el manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos

de industrias extractivas, desarrollado en el marco del acuerdo entre la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental y Medio Natural y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). La evaluación de riesgos del sitio de almacenamiento de relaves de Japo se realizó aplicando la metodología del IGME. Es importante señalar que el propósito de esta metodología, es la realización de una evaluación de riesgos que permitiría luego aplicarla a los otros sitios de almacenamiento de desmontes y relaves, para finalmente permitir priorizar las acciones de rehabilitación de los mismos. La metodología analiza los valores de funciones semi cuantitativas simples de la probabilidad de ocurrencia (Índice de

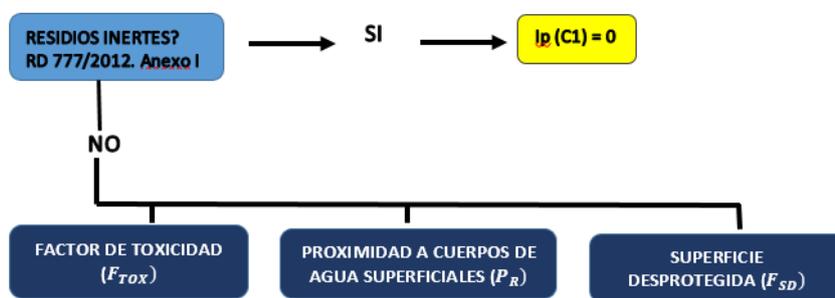
probabilidad) y de la severidad de las consecuencias (Índice de severidad), para una serie de escenarios de riesgo tipificados sobre tres tipos de receptores: población, medio natural y medio socio-económico. Cada escenario de riesgo sobre cada uno de los tres tipos de receptores tiene asociado un código o etiqueta. La estimación del Índice de probabilidad de ocurrencia para cada escenario y la estimación del Índice de severidad de las consecuencias sobre los distintos receptores proporciona valores entre 0 y 5 que permiten colocar los códigos de los escenarios en una matriz de riesgos. La matriz de riesgos proporciona una valoración cualitativa y una visualización inmediata de las dos dimensiones del riesgo y de la clasificación del mismo. Como suele ser habitual, utiliza un código de color de tipo

semáforo, donde el verde se califica como riesgo MUY BAJO, el amarillo como BAJO, el amarillo anaranjado como MODERADO, el naranja como ALTO y el rojo como MUY ALTO. (Alberruche del Campo et al., 2014), (Arranz-González et al., 2019).

2.1 Generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales (c1)

2.1.1 Índice de probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales IP(C1)

La esquematización del cálculo se presenta a continuación:



Formula a utilizar:

$$IP(C1) = FTOX * PR * FSD$$

Donde:

- PR es el denominado factor de proximidad relativo a los cauces o masas de agua superficiales.
- FTOX es el denominado factor de toxicidad o peligrosidad de los residuos.
- FSD es el llamado factor de superficie desprotegida, que hace referencia al tamaño o superficie del depósito, y su grado de desprotección en función de la existencia o no de algún tipo de cobertura sobre los residuos.

2.1.2 Índice de severidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales IS (C1)

- a) Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales IS (C1PO)

Formula a utilizar:

$$IS(C1PO) = 0,5 PEX + 0,5 (FSUP \times VP)$$

Donde:

- IS(C1PO) es el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la contaminación de las aguas superficiales por efluentes procedentes de los residuos mineros.
- PEX es el factor de la población expuesta por abastecerse, para su consumo, con agua extraída de masas de agua superficiales.
- FSUP es el factor de exposición de la población expuesta en el punto de extracción con el uso del agua más vulnerable y más próximo al depósito minero.
- VP es el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable.
- b) Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales IS(C1NA)

Formula a utilizar:

$$IS(C1NA) = FSUP \times VE$$

Dónde:

- IS(C1NA) es el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación de las aguas superficiales, por efluentes procedentes de los residuos mineros.
 - FSUP es el factor de exposición a que se encuentran expuestos los distintos recursos naturales y ecosistemas más vulnerables, y más próximos al depósito minero.
 - VE es el factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema expuesto más vulnerable, situado a una distancia máxima de 5 km en la dirección de flujo del agua.
- c) Índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la contaminación de los recursos hídricos superficiales debido a efluentes contaminantes **IS(C1SE)**

Dada la naturaleza preliminar de la metodología de análisis de riesgo que se propone, y el nivel de

conocimiento necesario para llegar a evaluar la estructura económica, sus potencialidades y prioridades de uso, hace aconsejable que la determinación del índice de severidad de los efectos sobre las actividades económicas para este escenario **IS(C1SE)**, sólo se realice cuando el daño socioeconómico sea elevado y fácilmente constatable. En la generalidad de los casos se considerará que la valoración la severidad asociada a este escenario no procede ser valorada

2.2 Generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos (C2)

2.2.1 Índice de probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos **IP(C2)**

La esquematización del cálculo se presenta a continuación:



Formula a utiliza

$$IP(C2) = FV \times FTOX \times FSD$$

Donde:

- FV es el denominado factor de vulnerabilidad dependiente de las características intrínsecas de los acuíferos o masas de agua subterráneas.
- FTOX es el denominado factor de toxicidad de los residuos.
- FSD es el llamado factor de superficie desprotegida, que hace referencia al tamaño o superficie del depósito, y su grado de desprotección en función de la existencia o no de algún tipo de cobertura sobre los residuos.

2.2.2 Índice de severidad de la generación de efluentes contaminantes con afección

hídricos subterráneos **IS (C2)**

- a) Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos **IS (C2PO)**

Formula a utilizar:

$$IS(C2PO) = 0,5 PEX + 0,5 (FSUB \times VP)$$

Donde:

- IS(C2PO) es el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la contaminación de las aguas subterráneas por efluentes procedentes de los residuos mineros.
- PEX es el factor de la población expuesta por abastecerse con agua extraída de acuíferos.

- FSUB es el factor de exposición de la población expuesta en el punto de extracción con el uso del agua más vulnerable y más próximo al depósito minero.
- VP es el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable.

b) Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos IS(C2NA)

Formula a utilizar:

$$IS(C2NA) = FSUB \times VE$$

Dónde:

- IS(C2NA) es el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la contaminación de las aguas subterráneas, por efluentes procedentes de los residuos mineros.
- FSUB es el factor de exposición o concentración de exposición a que se encuentran expuestos los distintos recursos naturales y ecosistemas más vulnerables, y más próximos al depósito minero.
- VE es el factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema expuesto más vulnerable, en un radio de 1 km (o en esa misma distancia en la dirección del flujo del agua).

c) Índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivadas de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos Is(C2SE)

El Índice de severidad de los efectos sobre las actividades económicas para este escenario Is(C2SE), sólo se realice cuando el daño socioeconómico sea elevado y fácilmente constatable. En la generalidad de los casos se considerará que la valoración la severidad asociada a este escenario no procede ser valorada.

2.3 Movilización de material particulado por acción del viento (c3)

2.3.1 Índice de probabilidad de la movilización de material

particulado por acción del viento IP (C3)

La esquematización del cálculo se presenta a continuación:



F

$$IP(C3) = Ee \times FAR \times VV \times FS \times FDS$$

Donde:

- Ee es la erodibilidad eólica, dependiente de las características de los residuos.
- FAR es el factor de aridez del clima, que condiciona el tiempo que están secos los residuos a lo largo del año.
- VV es el factor de velocidad del viento.
- FS es el factor superficial del depósito, que depende de la superficie total expuesta del depósito.
- FDS es el grado de falta de cobertura vegetal u otro tipo de protección de la superficie del depósito (incluidas las superficies con presencia de costras superficiales o láminas de agua permanentes).

2.3.2 Índice de severidad de la movilización de material particulado por acción del viento IS(C3)

a) Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento IS(C3PO)

Formula a utilizar:

$$IS(C3PO) = [0,5 PEX + 0,5 (VP \times FPM)] \times (1 + FCO/100)$$

Dónde:

- IS(C3PO) es el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la

movilización de material particulado por acción del viento.

- PEX es el factor de la población expuesta en un radio de 1 km de distancia al depósito
- FPM es el factor de exposición a concentraciones de PM de la población, en función de la distancia a la que se encuentra el uso más vulnerable o de peor escenario de exposición (VP×FPM) respecto al depósito minero.
- VP es el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de uso más sensible o vulnerable expuesto, o el del peor escenario de exposición
- FCO es un factor de capacidad de contaminación asociado al material particulado sobre la base de análisis de contenidos totales en elementos. Funciona como un amplificador que es función del grado de toxicidad del material particulado, tomando el valor 0 para los residuos inertes, y un valor máximo de 5 para los considerados de toxicidad muy alta.

- b) Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento **IS(C3NA)**

Formula a utilizar:

$$IS(C3NA) = (VE \times FPM) \times (1 + FCO/100)$$

Dónde:

- IS(C3NA) es el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la

movilización de material particulado por acción del viento.

- FPM el factor de exposición de los ecosistemas más sensibles al material particulado emitido desde depósitos de residuos, en función de la distancia a la que se encuentra el uso más vulnerable.
- VE es el factor de vulnerabilidad del medio natural en función del tipo de uso más vulnerable expuesto.
- FCO es un factor de capacidad de contaminación asociado al material particulado sobre la base de análisis de contenidos totales en elementos. Funciona como un amplificador que es función del grado de toxicidad del material particulado, tomando el valor 0 para los residuos inertes, y un valor máximo de 5 para los considerados de toxicidad muy alta.

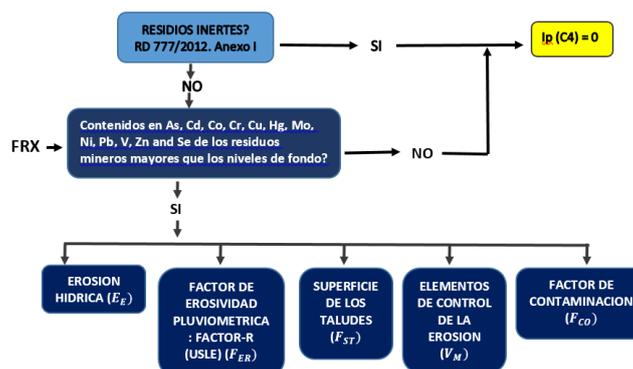
- c) Índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados de la movilización de material particulado por acción del viento **IS(C3SE)**

En la generalidad de los casos se considerará que la valoración la severidad asociada a este escenario no procede ser valorada.

2.4 Emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica (c4)

2.4.1 Índice de probabilidad de la emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica **Ip(C4)**

La esquematización del cálculo se presenta a continuación:



Formula a utilizar:

$$IP(C4) = EE \times FER \times FST \times VM \times FCO$$

Donde:

- EE es el denominado estado erosivo.
- FER es el factor de erosividad, asociado a la erosividad climática del lugar donde se asienta la estructura.
- VM es el denominado factor de control de la erosión, que evalúa la defensa que supone la existencia de algún tipo de cobertura sobre los taludes de los depósitos de residuos.
- FST es el factor superficie, dependiente de la superficie total de los taludes del depósito de residuos.
- FCO es el factor de contaminación asociado a los sedimentos generados en la estructura a partir del conocimiento de contenidos totales en elementos del residuo, tomando el valor 0 para los residuos inertes, y un valor máximo de 5 para los considerados de toxicidad muy alta.

2.4.2 Índice de severidad de la generación de sedimentos contaminantes por erosión hídrica IS (C4)

- a) Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la emisión de sedimentos contaminantes **IS (C4PO)**

Formula a utilizar:

$$IS(C4PO) = 0,5 PEX + 0,5 (FSUP \times VP)$$

Donde:

- IS(C4PO) es el Índice de Severidad de los efectos sobre las personas o la población derivados de la afección de las aguas superficiales por emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros.
- PEX es el factor de la población expuesta por abastecerse, para su

consumo, con agua extraída de masas de agua superficiales.

- FSUP es el factor de exposición de la población expuesta en el punto de extracción con el uso del agua más vulnerable y más próximo al depósito minero.
- VP es el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable.

- b) Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la emisión de sedimentos contaminantes con afección sobre las aguas superficiales **IS(C4NA)**

Formula a utilizar:

$$IS(C4NA) = FSUP \times VE$$

Dónde:

- IS(C4NA) es el Índice de Severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la emisión de sedimentos contaminantes procedentes de los residuos mineros.
- FSUP es el factor de exposición o concentración de exposición a que se encuentran expuestos los distintos recursos naturales y ecosistemas más vulnerables, y más próximos al depósito minero.
- VE es el factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema Escenario de exposición (VE× FSUP) expuesto más vulnerable.

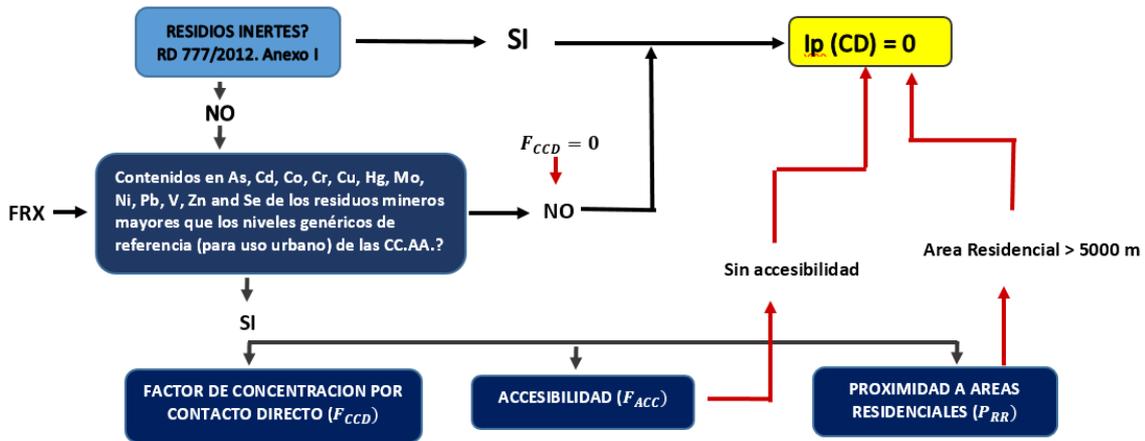
- c) Índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivadas de la contaminación de los recursos hídricos superficiales debido a efluentes contaminantes **IS(C4SE)**

En la generalidad de los casos se considerará que la valoración la severidad asociada a este escenario **no procede ser valorada.**

2.5 Contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades sobre los depósitos de residuos (cd)

2.5.1 Índice de probabilidad del contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades IP(CD)

continuación:



Formula a utilizar:

$$IP(CD) = FCCD \times FACC \times PRR$$

Donde:

- FCCD es el denominado factor de concentración de contacto directo relativo al potencial de los residuos para originar daños para la salud.
- FACC es el denominado factor de accesibilidad a los depósitos de residuos.
- PRR es el llamado factor de proximidad, que hace referencia a la distancia con la zona residencial más próxima.

2.5.2 Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados del contacto directo

originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades IS(CD)

Los valores de la severidad asociada a los diferentes usos o aprovechamientos desarrollados sobre los depósitos de residuos en un escenario de contacto directo van de 5 para usos con muy alta severidad asociada hasta 1, de baja exposición.

2.6 Fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos (FPRE)

2.6.1 Índice de probabilidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros IP(FPRE).

La esquematización del cálculo se presenta a continuación:



Formula a utilizar:

$$BH = Ld + Fr + Ia + P24 + QE + DE + Rv$$

Donde

- Ld = Laguna de decantación
- Fr = Posición del nivel freático en el dique
- Ia = Índice de Aridez de De Martonne

- P24 = Precipitación máxima en 24 horas para un período de retorno de 100 años
- QE = Caudal de escorrentía que ingresa a la presa
- DE = Sistemas de drenaje interno y otras infraestructuras de evacuación, retención y desvío de las aguas de escorrentía
- Rv = Grado de revegetación

2.6.2 Índice de severidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud

exterior de presas de lodos mineros IS(FPRE)

- a) Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos **IS(FPREPO)**

El valor de Is(FPREPO) es igual al valor de PEX. La valoración de la vulnerabilidad de los núcleos de población y viviendas aisladas ante el fallo o rotura del talud de una escombrera van desde 5 (para núcleos urbanos: población de > 10000 habitantes) hasta 1, para < 50 habitantes o viviendas aisladas.

- b) Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos **Is(FPRENA)**

El valor de Is(FPRENA) es igual al valor de VE. Los Valores de vulnerabilidad ecológica ecosistemas y elementos naturales expuestos en zona e riesgo derivado del fallo o rotura del talud de una escombrera van desde 5, para el caso de áreas sensibles objetivo de protección ambiental, hasta 1, para el caso de espacios urbanos y ecosistemas muy degradados por la acción antrópica.

- c) Índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos **Is(FPRESE)**.

Se debe considerar además que el valor de Is(FPRESE) es igual al valor de VSE.

Los valores de vulnerabilidad del medio socioeconómico expuesto en expuestos en zona de riesgo derivado del fallo o rotura del talud de una escombrera van desde 5, para el caso en el que se encuentren implicados Patrimonio cultural protegida (BIC, etc), hasta 1, para la afección a elementos sin ningún valor cultural, productivo o de escaso aprovechamiento.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El índice de probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales **IP(C1)** es de 4.71, considerando que a partir de la proximidad del relave a el cauce del río que no supera los 72 metros, y por tanto permite calcular un factor de proximidad (PR) de 0.94, además del factor de toxicidad del residuo que altera la calidad del agua establecida a través de su análisis físico-químico respectivo y su comparación con los límites máximos de concentración permisibles de los metales tóxicos disueltos, por los que el valor del (CCPLAB) alcanzó a 636 (mayor a 400), por lo que se asignó el mayor valor de toxicidad de 5; y finalmente, considerando el

llamado factor de superficie desprotegida (SEX), que hace referencia al tamaño o superficie del depósito, que no presenta ninguna protección, y presenta un valor de mayor a 2 Ha, y por tanto se asignó el valor de 1.

El índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales **IS (C1PO)**, alcanzó un valor de 4.5, considerando que el número de personas expuestas es de 200 a los efluentes contaminados por lo que el factor de la población expuesta (PEX) alcanza un valor de 5, además, el factor de exposición del uso del agua y próxima al depósito minero (FSUP) es de 1 y el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable (VP) por su uso en regadío es 4.

El índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre las aguas superficiales **IS(C1NA)** alcanzó un valor de 2, La determinación del valor se sustenta en que del factor de vulnerabilidad de los ecosistemas (VE) de 2, debido a que las masas de agua superficiales se encuentran en un estado ecológico deficiente y un valor de factor de exposición (FSUB) de 1, para una distancia (D) ≤ 100 m.

Por otra parte, el cálculo del índice de probabilidad de la generación de efluentes contaminantes con afección a los recursos hídricos subterráneos **IP(C2)** arrojó el valor de 2.33, esto debido a que la calidad de las aguas subterráneas a partir del análisis físico-químico, arroja un valor de CPPLAB de 1472, por lo que corresponde asignar un valor de FTOX de 5; además, no existiendo medidas de protección del acuífero subterráneo, el factor de protección de las aguas subterráneas es 0, y por tanto el índice de vulnerabilidad intrínseca del método COP es 1 (vulnerabilidad muy alta); finalmente, considerando además la superficie del depósito minero medida en planta (SPL) que es ≤ 10 , que corresponde a un factor de Superficie (FS) de 0.47.

El valor del Índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos **IS (C2PO)** alcanzó a un valor de 5, considerando que la población mayor a 100 personas, es abastecida de acuíferos subterráneos (PEX), y por tanto anotando un valor de 5, a una profundidad de pozo de 15 m, y por tanto un valor de (FSUB) de 1; además, y por tanto alcanzando un valor de máxima vulnerabilidad expuesta (VP) de 5.

El índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la generación de efluentes contaminantes con afección sobre los recursos hídricos subterráneos **IS(C2NA)** registró un valor de 4, dado que, el factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema expuesto altamente vulnerable (VE), y por tanto con un valor de 4, con un factor de exposición (FESUB) de 1.

El índice de probabilidad de la movilización de material particulado por acción del viento **IP (C3)** arrojó un valor de 3.74, dado a que, la granulometría del material presenta un d_{50} menor a 75 micrones, por lo que su valor de Ee es de 5, además, la probabilidad de que se movilicen las partículas generadoras de polvo, en función del grado de aridez del clima que es Semiárida de tipo mediterráneo, con índice de aridez de 19.61 y por tanto un valor de FRA de 0.81. Considerando además una velocidad media (V_m) del viento inferior a 3m/s, se obtuvo un valor de velocidad del viento (V_v) de 0.93, además, de un FS de 1, considerando una superficie expuesta tanto superficial como de los taludes expuestos, de 5.75 Ha.

El índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la movilización de material particulado por acción del viento **IS(C3PO)**, alcanzó un valor de 3.12, toda vez que, es el factor de exposición a concentraciones de PM de la población (FPM) es 1, por la cercanía, además, el factor de la población expuesta en un radio de 1 km de distancia al depósito (PEX) de 2, para poblaciones entre 101 y 500 habitantes, y adicionalmente, un factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de uso más sensible o vulnerable expuesto (VP) de 4 por la cercanía a la escuela y las áreas recreativas, además de un factor de capacidad de contaminación asociado al material particulado sobre la base de análisis de contenidos totales en elementos 4.2.

Por otra parte, el Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la movilización de material particulado por acción del viento **IS(C3NA)** alcanzó el valor de 4.2, tomando en cuenta que, el factor de vulnerabilidad del medio natural en función del tipo de uso más vulnerable expuesto (VE) es de 4, el factor de exposición de los ecosistemas más sensibles al material particulado

emitido desde depósitos de residuos (FPM) es 1 y el factor de capacidad de contaminación asociado al material particulado sobre la base de análisis de contenidos totales en elementos es 5.

El índice de probabilidad de la emisión de sedimentos contaminantes por erosión hídrica **IP(C4)** alcanzó un valor calculado de 3.16, considerando que se asume un valor de 0.8 al estado erosivo del talud (EE), que corresponde a uno con frecuentes cárcavas, mayores a 1m; además, tomando en cuenta que el valor del índice de erosividad de las lluvias (R de la USLE) es de 358.9 mm, equivalente a un Fer de 0.9. Además, considerando una del talud medido en planta del depósito minero es de 12.422 m² y un ángulo de pendiente de 45°, resulta que el ST es de 1.76 Ha, y por tanto un FST de 0.88. Asimismo, el valor de los elementos de erosión (VM) de 1, ya que la erosión es realmente visible y descubierta. Finalmente, el potencial contaminante, con respecto a los niveles de fondo regionales y los niveles de referencia para suelos, permite determinar un FCO de 5, dado a que el índice de contaminación (IC) es de 49.26

El índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados de la emisión de sedimentos contaminantes **IS (C4PO)** alcanzó un valor de 4, dado a que el factor de la población expuesta por abastecerse (PEX) es 5, el factor de exposición de la población expuesta en el punto de extracción con el uso del agua más vulnerable y más próximo al depósito minero (FSUP) es 1, y el factor de vulnerabilidad de la población expuesta en función del tipo de aprovechamiento considerado más vulnerable (VP) es 3.

Por otra parte, Índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados de la emisión de sedimentos contaminantes con afección sobre las aguas superficiales **IS(C4NA)** arroja un valor de 4, considerando en factor de vulnerabilidad ecológica en función del recurso o ecosistema (VE) de 2 y un factor de exposición o concentración de exposición a que se encuentran expuestos los distintos recursos naturales y ecosistemas más vulnerables (FSUP) de 1.

Para el caso del Índice de probabilidad del contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades **IP(CD)**, este arrojó un valor de 3.75; esto se fundamenta debido a que, en base a los análisis físico-químicos, el valor del factor de concentración por contacto directo es FCCD es 5, dado a que residuos para producir efectos perniciosos para la salud sobre los potenciales receptores expuestos. Además, el

depósito minero es de fácil accesibilidad, no cuenta con vallas o señalizaciones, ni controles para el acceso, por lo que el valor de FACC es de 0.75; por otra parte, su cercanía de apenas 117 m a la zona residencial del campamento, arroja un valor de PRR de 1.

Asimismo, el índice de severidad de los efectos sobre las personas y la población derivados del contacto directo originado por el acceso ocasional o por el desarrollo de actividades **IS(CD)** arroja un valor de 3, por su connotación de uso recreativo.

El valor del índice de severidad del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos mineros **IS(FPRE)** alcanza un valor de 3.75, considerando que el núcleo urbano está entre 101 y 500 habitantes (implica un valor de PEX de 3.75).

El valor calculado del índice de severidad de los efectos sobre el medio natural derivados del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de

presas de lodos **IS(FPRENA)** es de 2, por la existencia de cultivos (VE = 2).

El valor calculado del índice de severidad de los efectos sobre el medio socioeconómico derivados del fallo o rotura del dique de contención o el talud exterior de presas de lodos **IS(FPRESE)** alcanzó a 3, considerando un valor de VSE de 3, por la presencia de actividades económicas secundarias.

En resumen, y después de la descripción tanto de escenarios de riesgo por contaminación y sus efectos sobre el medio natural, las personas y población, y además el medio socioeconómico, se puede presentar la **Matriz de Riesgos** representativa del depósito de relaves de Japo, donde se destaca la existencia de tres códigos de escenarios de riesgo situados en la zona roja, y ocho en la zona anaranjada de la matriz, por lo que corresponde la calificación de riesgo **MUY ALTO**.

		0	1	2	3	4	5
		SEVERIDAD DE LAS CONSECUENCIAS					
		MUY BAJA	BAJA	MEDIA	ALTA	MUY ALTA	
PROBABILIDAD DE OCURRENCIA	MUY ALTA			C1NA C4NA			C1PO C4PO
	ALTA			FPRENA	C3PO CD FPREPO FPRESE		C3NA
	MEDIA				C2PO		C2NA
	BAJA						
	MUY BAJA						

Figura 3.- Matriz de riesgos representativa del depósito de relaves de Japo.

4.

CONSIDERACIONES FINALES

Los trabajos de inventario de Pasivos Ambientales Mineros en Bolivia, realizados en el marco de varios proyectos con financiamiento internacional, han sido la clave para conocer la magnitud de sus efectos ambientales en las zonas mineras; sin embargo, se hace necesario generar una metodología de evaluación de riesgos que aborde los diferentes escenarios de riesgo por contaminación y sus efectos sobre el medio natural,

las personas y población, y además el medio socioeconómico. La metodología debe ser incuestionablemente sencilla, y que se basa en una adecuada sistematización de toda la información existente, a objeto de establecer con criterio técnico los riesgos que cada pasivo representa, y a partir de dicha información, establecer una escala de priorización de acciones de remediación ambiental de los mismos.

En el contexto arriba descrito, y con toda la información existente sobre el pasivo ambiental minero de Japo, se ha aplicado la metodología de evaluación de riesgos descrita en el “Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Instituto Geológico y Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente”, en actual vigencia y que ha permitido la priorización en la remediación de los pasivos ambientales en España, habiendo demostrado que, de acuerdo a la Matriz de Riesgos, el pasivo ambiental minero de Japo, representa un riesgo **MUY ALTO**, y por tanto se hace necesario llevar a cabo su rehabilitación ambiental.

REFERENCIAS

- Proyecto Piloto Oruro. “Depósitos de colas de minerales en el área del PPO”. Ministerio de desarrollo sostenible y medio ambiente. ID: R-Bo-E-9.45-9612-PPO 9611 (1996).
- Zamora, G, Meza R. (2022). “Formación, predicción e innovación en el tratamiento de drenajes ácidos en minería”. ISBN: 978-9917-614-12-8
- Jiménez, Abigail; Alfonso, Pura; Canet, Carles; García-Valles, Maite; Trujillo, Juan Elvys (2017). Mineralogía del Depósito de Sn del Distrito de Santa Fe, Bolivia. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 5(1), 3-18.
- Zamora, G., Lafuente, J., Hinojosa, O. (2020). Propuesta de rehabilitación ambiental del pasivo minero de Japo - Santa Fe. *Revista de Medio Ambiente Minero y Minería*, 5(1), 3-18.
- Alberruche del Campo, E., Arranz González, J.C., Rodríguez Pacheco, R., Vadillo Fernández, L., Rodríguez Gómez, V., Fernández-Naranjo, F.J. 2014. Manual para la evaluación de riesgos de instalaciones de residuos de industrias extractivas cerradas o abandonadas. Instituto Geológico y Minero de España-Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.
- ISO 31000:2018(es). “Gestión del riesgo – Directrices”.
<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:es>
- Arranz-González, J., Rodríguez-Gómez, V., Rodríguez-Pacheco, R., Fernández-Naranjo, F.J., Vadillo-Fernández, L., Alberruche del Campo, E., 2019. *Guía para la rehabilitación de instalaciones abandonadas de residuos mineros*. MITECO. Madrid.
- 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.

Artículo recibido en: 30.10.2023

Manejado por: Elvys Trujillo L.

Artículo aceptado: 16.11.2023