

METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS CON FINES DE PRIORIZACIÓN PARA SU REMEDIACIÓN

Dr. Ing. Gerardo Zamora Echenique¹

Ing. Julio Lanza Ferrufino²

Ph. D. Ing. Julio Arranz González³

¹ Universidad Técnica de Oruro, 6 de Octubre esquina Cochabamba, Edificio Ex rectorado. Tel: (252) 75798 e-mail: gerardozamoraechenique@yahoo.es

² Consultor ambiental. Edificio Figliozi. e-mail: edjulin88@hotmail.com

³ IGME – España - e-mail: jc.arranz@igme.es

RESUMEN

Como consecuencia de la actividad minera y también minero-industrial, en la mayoría de los países quedaron numerosas minas e instalaciones en estado de abandono sin que muchas de ellas se hayan sometido a un proceso adecuado de cierre; lo que ha significado que, en la actualidad haya numerosos lugares en los que se presentan escenarios de riesgo para la seguridad y salud de las personas y para el medio ambiente.

Bolivia, se caracteriza por presentar una serie de espacios en los cuales se desarrollaban actividades mineras y que a la fecha se constituyen en sitios mineros abandonados; esta situación, ha sido demostrada por el SERGEOTECMIN en el marco del proyecto Inventariación de Pasivos Ambientales, donde de un total de 870 minas visitadas el 71,11% se encontraban abandonadas, sin haberse operado en ellas un Plan de Cierre y Rehabilitación. A la fecha, no se tiene una metodología para llevar adelante una adecuada identificación; caracterización y además, una evaluación del riesgo para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente que dichos pasivos ambientales representan.

Por tanto, el objetivo del trabajo de investigación se circunscribe a proponer una propuesta de una Metodología para la identificación, Caracterización y Evaluación de Riesgos de Pasivos Ambientales Mineros (PAM) con Fines de Priorización para su Remediación.

A partir del llenado de la "ficha-inventario", que permite la identificación del PAM; y el llenado de una "matriz de asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia para cada PAM" propuesta, se puede evaluar los riesgos del PAM para la salud y seguridad de la población y para el medio ambiente; y así, generar el "ranking de priorización de medidas de mitigación a implementar" para establecer acciones prioritarias de remediación en aquellos casos en el que el PAM genere impactos significativos.

Las metodologías propuestas han sido aplicadas como Caso de estudio al PAM del sitio minero de Milluni; demostrando que este, requiere de "medidas inmediatas de mitigación" porque genera un riesgo potencial para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

Palabras Clave: Identificación y evaluación de Riesgos – pasivos Ambientales Mineros

SUMMARY

As a consequence of the mining and mining-industrial activity, in most of the countries there were numerous mines and installations in a state of neglect without many of them having undergone an adequate process of closure; which has meant that, at present, there are numerous places where risk scenarios for the safety and health of people and for the environment are presented.

Bolivia, is characterized by presenting a series of spaces in which mining activities were developed and which to date are constituted in abandoned mining sites; This situation has been demonstrated by the SERGEOTECMIN within the framework of the Environmental Passive Inventory project, where 71,11% of the total of 870 mines visited were abandoned, without a Closure and Rehabilitation Plan. To date, there is no methodology to carry out an adequate identification; characterization and, in addition, an evaluation of the risk for the health and safety of the population, for biodiversity and for the environment that said environmental liabilities represent.

Therefore, the objective of the research work is limited to proposing a proposal for a Methodology for the Identification, Characterization and Evaluation of Risk of Mining Environmental Liabilities (PAM) with Priority Purposes for its Remediation.

From the filling of the "inventory-file", which allows the identification of the PAM; and the filling of a "matrix of qualitative assignment of the Probability of Occurrence of the Event vs. the Severity of the

Consequence for each PAM" proposed, the MAP risks can be evaluated for the health and safety of the population and for the environment; and thus, generate the "ranking of prioritization of mitigation measures to be implemented" to establish priority actions for remediation in those cases in which the PAM generates significant impacts.

The proposed methodologies have been applied as Case Study to the PAM of the Milluni mining site; demonstrating that this requires "immediate mitigation measures" because it generates a potential risk to the health and safety of the population, to biodiversity and to the environment.

Key Words: Identification and evaluation of Risks

METODOLOGÍA PARA LA IDENTIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DE RIESGOS DE PASIVOS AMBIENTALES MINEROS CON FINES DE PRIORIZACIÓN PARA SU REMEDIACIÓN

1. INTRODUCCIÓN

La explotación de yacimientos mineros en Bolivia es una actividad que data de hace varios siglos. En su origen, se utilizaban métodos rudimentarios para extraer los minerales desde ricas vetas de oro, plata, cinc, plomo y cobre. Con el desarrollo industrial, los procesos se fueron tecnificando hasta llegar a los sofisticados procedimientos que se aplican hoy en día.

Antes de los años 70' en Bolivia, las operaciones mineras a la conclusión de sus actividades, optaban por un simple abandono de faenas, situación que daba lugar al desplome de labores superficiales y/o subterráneas, la erosión de los depósitos de desechos sólidos mineros, la alteración del drenaje superficial y subterráneo, la generación incontrolada de drenaje ácido, etc. Esta situación derivó en el rechazo por el desarrollo de actividades mineras, en razón a la generación de pasivos ambientales, los cuáles se constituían en el llamado "legado de la minería" convirtiéndose en una dura carga para los Estados y sus Sociedades, acentuándose de esta manera la crisis ambiental.

Bolivia se caracteriza por presentar una serie de espacios en los cuales se desarrollaban actividades mineras y que a la fecha se constituyen en sitios mineros abandonados, esta situación ha sido demostrada por el SERGEOTECMIN en el marco del proyecto Inventariación de Pasivos Ambientales, donde de un total de 870 minas visitadas el 71,11%

se encontraban abandonadas, sin haberse operado en ellas un Plan de Cierre y Rehabilitación.

Por las características mineralógicas de las colas de los procesos metalúrgicos y los desmontes, originados en las operaciones mineras sin la componente ambiental en sus operaciones, actualmente se tienen cargas enormes de metales pesados que se generan por efecto del meteorización (oxígeno del aire en contacto con el agua y los sulfuros de los residuos mineros) y que dan lugar a la formación de drenajes ácidos que contaminan los cauces de los ríos, los suelos y los ecosistemas con metales pesados altamente tóxicos.

Las Instituciones de Bolivia, país caracterizado por una larga trayectoria de la minería y por su importancia para la economía actual, reconocieron ya esta necesidad de hacerse cargo de los pasivos y desarrollaron o están desarrollando diferentes sistemas o metodologías para su gestión.

Los PAM presentan o pueden presentar un riesgo de seguridad o de contaminación tanto para la salud humana como para el medioambiente.

El uso de las aguas superficiales y subterráneas contaminadas por los PAM incluso como agua potable, agua de riego o también por objetivos recreativos implica un riesgo por la posible ingestión y/o el contacto dérmico. Además existe el riesgo por el ingreso de los contaminantes a la cadena alimenticia.

La respiración e inhalación de aire contaminado o de polvo y el contacto dérmico con suelos contaminados implica también un riesgo por la salud humana.

Por todo lo expresado, se hace necesario elaborar una metodología que permita identificar; caracterizar y finalmente evaluar el riesgo a la salud que es generado por los sitios mineros abandonados; para así,

establecer que sitios pueden ser considerados como “Pasivos Ambientales Mineros”; y poder además, priorizar las acciones encaminadas a su remediación.

2. OBJETIVOS

El objetivo general del presente trabajo de investigación fue el de proponer una metodología para la identificación y evaluación de riesgos de Pasivos Ambientales Mineros con fines de priorización para su remediación.

Para alcanzar el objetivo general descrito, se formularon los siguientes objetivos específicos:

- Establecer los requerimientos de información para identificar, caracterizar y valorar los Pasivos Ambientales Mineros.
- Generar una metodología para Inventariar los sitios mineros abandonados a través de una adecuada identificación y caracterización.
- Establecer una metodología para el análisis y la evaluación de riesgos ambientales asociados a los Pasivos Ambientales Mineros (PAM).

El alcance del trabajo de investigación desarrollado se circunscribió a desarrollar una metodología que permita identificar; caracterizar; y finalmente, analizar y evaluar el riesgo a la salud de las personas de los sitios mineros abandonados a objeto de establecer si los mismos pueden ser considerados por una parte como “Pasivos Ambientales Mineros”; y por otra, poder además priorizar las acciones encaminadas a su remediación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Propuesta metodológica para el inventario de PAM

En este apartado se describe el contenido de la Ficha Inventario de Minas Abandonadas o Paralizadas, y el procedimiento a seguir para su inventario y para la obtención de datos y

resultados necesarios para etapas posteriores de caracterización y evaluación de riesgos de los Pasivos Ambientales Mineros (ASGMI, 2010).

En la parte superior de la ficha, inmediatamente debajo del título aparecen dos espacios reservados para la identificación de la propia ficha, mediante códigos que permitirán distinguirla del resto de fichas del inventario, y que serán los identificadores en la base de datos correspondiente. Estos códigos son:

a) Identificación de la Mina

Nombre de la Mina
Abandonada/Paralizada
Empresa/Propietario
Ubicación
Región, Provincia, Comuna/Municipio,
Paraje
Mapa Topográfico (número, nombre y
escala)
Accesibilidad

b) Tipo de Minería

- Tipo de minería
- Sustancia/s

c) Estado y Tipo de Mina

Estado de la Mina Abandonada/Paralizada
Tipo
Labores accesibles
Inundada
Efluentes
Tamaño del hueco

d) Estado y tipo de Planta

- En este apartado se registrarán las instalaciones existentes en el área minera abandonada.

e) Depósitos de residuos

Se Seleccionarán los tipos de residuos mineros remanentes marcando las correspondientes casillas reservadas a Desmonte/botadero; Relaves; Residuos de lixiviación; Residuos de evaporación/precipitación; Residuos industriales; Escorias y Otros acopios; Tamaño del depósito; Color

f) Sustancias peligrosas utilizadas

Si se tienen antecedentes de los procesos mineros desarrollados en la mina o planta abandonada, es posible seleccionar el nombre de la sustancia que se utilizó entre las que se han incluido en la ficha, marcando la correspondiente casilla: Mercurio; Cianuro; Ácido sulfúrico y Otros

g) Situación del entorno

La información contemplada en este ítem es importante para la fase de evaluación de riesgos de los Pasivos Ambientales Mineros. Se deberá registrar información sobre todos los elementos, naturales y artificiales, existentes en el entorno del sitio minero tales como bosques, ríos, casas, caminos, ferrocarriles, etc. y la distancia a/desde el área minera abandonada.

Los contenidos de este ítem son:

- Viviendas
- Infraestructura vial
- Infraestructura urbana
- Áreas agrícolas y/o ganaderas
- Explotación forestal
- Bosque y/o vegetación natural
- Especies y/o ecosistema valiosos
- Otros recursos

g1) Situación del agua

Este apartado de la ficha pretende describir las características hídricas, meteorológicas y climáticas en el entorno cercano a la mina abandonada. Contempla los siguientes aspectos:

- Cauce cercano, lago, canal, etc.
- Uso de agua
- Nombre/s de la secuencia de afluentes
- Información sobre aguas subterráneas
- Información sobre precipitaciones
- Información sobre el clima o bioclima
- *Muestreo*

Es posible que la mina abandonada presente drenajes o aguas que entran en contacto con residuos, sobre las cuales, además de la

identificación del color y el pH, es necesario efectuar un análisis químico para determinar si son efluentes potencialmente contaminantes.

g2) Identificación preliminar de impactos ambientales y/o peligros para bienes y personas

En el Inventario, solo se registra una primera estimación de la probabilidad de que ocurra un **impacto ambiental** o **peligro**, puesto que el análisis de las consecuencias, y por tanto de los riesgos de una mina abandonada, ha de realizarse mediante un procedimiento metodológico más complejo, que requiere una observación más precisa de los procesos que tienen lugar en cada mina, y el análisis de la probabilidad de ocurrencia y de las consecuencias que pueden tener sobre la seguridad y salud de las personas, o sobre el medio ambiente.

1. Impactos ambientales

- Contaminación de aguas
- Generación de polvo
- Degradación de la cubierta vegetal
- Arrastre de residuos a otras áreas
- Otros
- *Procesos geodinámicos u otros presentes en el entorno*

Por el hecho de producirse en un área minera, estos procesos pueden tener consecuencias distintas a las que tendrían en un terreno natural inalterado, viéndose en ocasiones inducidos o facilitados. Las excavaciones mineras y los depósitos de residuos producen superficies topográficas nuevas, diferentes a la original.

- Hundimientos/subsistencia
- Movimientos en masa
- Inundación
- Sismicidad
- Erosión
- Otros: Cuando se sepa de la existencia, o se prevean eventos que no se correspondan con ningún ítem anterior, se anotarán en el sub-apartado correspondiente a “Otros”.

2. Problemas de seguridad a las personas

Los problemas de seguridad son muy diversos. Algunos de ellos están relacionados con la presencia de piques o pozos, socavones u otras labores mineras que pudieran haber quedado accesibles. Entre ellas pueden incluirse también las típicas depresiones cónicas que se forman en la embocadura de pozos y chimeneas que están conectadas labores subterráneas debido a procesos de subsidencia. También se han de incluir todos los posibles desniveles verticales, extraplomados o de gran pendiente originados por la excavación. Otros posibles elementos de riesgo son los taludes inestables que pueden romperse instantáneamente, así como los puntos donde se producen desprendimientos y caída de rocas.

- Caída en pozos, piques, taludes, etc.
- Accidentes en una galería abierta
- Colapso de paredes, taludes, etc.
- Accidentes en masas de agua:
- Accidentes en instalaciones abandonadas
- Otros

Para la correcta cumplimentación de la Ficha Inventario y la consiguiente optimización de tiempo y esfuerzo, se recomienda seguir el siguiente procedimiento:

a) Recopilación de información y preparación de la campaña de campo.

Al inicio del trabajo se recopilará cuanta información relativa a la mina abandonada – paralizada pueda ser recabada en el propio Servicio geológico o en otras instituciones. Con esta información se cumplimentarán, en su caso, los ítems de la ficha inventario que procedan. Si fuera necesario, se obtendrán los permisos necesarios para acceder al sitio minero y se comprobará en buen funcionamiento de los equipos de medición que sean necesarios para la subsiguiente campaña de campo.

b) Trabajos de campo

En esta etapa, en la medida de lo posible, se procurará obtener información de antiguos trabajadores de la mina, o de los habitantes locales que conozcan el lugar, se cumplimentarán los ítems de la Ficha – Inventario con la información obtenida en el

terreno y, en su caso, se tomarán muestras de aguas, sedimentos, etc., para su posterior análisis.

c) Trabajos de laboratorio y revisión de la ficha- Inventario en función de los resultados

Las muestras tomadas en el campo se enviarán al laboratorio que corresponda para su estudio. Una vez analizadas se revisarán, para confirmar o modificar, los ítems de la Ficha – Inventario que, eventualmente, deban ser reconsiderados.

d) Ingreso a base de datos

Una vez completada la ficha – Inventario en su totalidad, los datos en ella recogidos se ingresarán en la correspondiente base de datos.

Propuesta metodológica para la evaluación de riesgos ambientales

La “Ficha de Análisis y Evaluación de Riesgos de PAM” considera cuatro zonas objeto de evaluación de riesgo: MINA – PLANTA DE BENEFICIO Y/O EXTRACCIÓN METALÚRGICA – DISPOSICIÓN DE RESIDUOS – ENTORNO. En cada una de las Zonas arriba mencionadas, se han determinado los Descriptores que acentuación se detallan:

ZONA 1: MINA (ZM)

En este apartado se evaluará el riesgo en la zona de explotación minera ya sea subterránea y/o a cielo abierto.

Descriptores para las personas:

- Caída en frentes y taludes (ZM DP1)
- Caída en pozos o espacios de difícil acceso (ZM DP2)
- Posibilidades de hundimiento de terrenos fangosos (ZM DP3)
- Posibilidades de hundimiento en zonas de acumulación de aguas o lixiviados (ZM DP4)

Descriptores para la población:

- Afluencia de aguas posiblemente contaminadas al sistema natural de drenaje en época húmeda (ZM DPO1)

- Afluencia de aguas posiblemente contaminadas a reservorios comunales para su uso en riego y/o bebederos para animales (ZM DPO2)
- Generación de material fino particulado por vientos (ZM DPO3)

Descriptorios para las actividades económicas:

- Pérdida de terreno para la explotación ganadera y/o forestal (costo de oportunidad) (ZM DAE1)
- Pérdida de valor adquisitivo por su cercanía a poblados (ZM DAE2)

ZONA 2: PLANTA DE BENEFICIO Y/O EXTRACCIÓN METALÚRGICA (ZBE)

En este apartado se evaluará el riesgo en las instalaciones existentes en el área minera abandonada; es decir, en la infraestructura existente donde se realizaron operaciones unitarias de procesamiento (Trituración/molienda – Cribado – Lavadero – Flotación – Lixiviación – Precipitación - SXEW (*solvent extraction and electrowinning*, traducible por extracción por solventes y electro-obtención de minerales) – Refinación – Tostación – Cianuración – Amalgamación -Fusión/conversión u Otras.

Descriptorios para las personas:

- Caída en pozos o espacios de difícil acceso (ZBE DP1)
- Caída en acumulaciones de agua y/o piscinas (ZBE DP2)
- Caída en estructuras inestables y/o riesgosas (ZBE DP3)
- Uso recreativo en instalaciones y/o infraestructura (ZBE DP4)
- Contacto con desechos y/o productos del proceso (ZBE DP5)

Descriptorios para la población:

- Descarga de aguas posiblemente contaminadas al sistema natural de drenaje en época húmeda (ZBE DPO1)
- Descarga de aguas posiblemente contaminadas a reservorios comunales para su uso en riego y/o bebederos para animales (ZBE DPO2)
- Desprendimiento de olores fuertes (ZBE DPO3)

Descriptorios para las actividades económicas:

- Pérdida de terreno para la explotación ganadera y/o forestal (costo de oportunidad) (ZBE DAE1)

ZONA 3: DISPOSICIÓN DE RESIDUOS (DR)

En este apartado se evaluará el riesgo en las zonas de disposición de residuos mineros como: Desmonte/botadero – Relaves - Residuos de lixiviación - Residuos de evaporación/precipitación – Residuos industriales – Escorias - Otros acopios

Descriptorios para las personas:

- Caída en frentes y taludes (ZDR DP1)
- Deslizamientos por inestabilidad de taludes (ZDR DP2)
- Emisión de material fino particulado mineralizado por vientos (ZDR DP3)

Descriptorios para la población:

- Deslizamientos de taludes de residuos mineros acumulados (ZDR DPO1)
- Escorrentías de lixiviados posiblemente contaminadas al sistema natural de drenaje en época húmeda (ZDR DPO2)
- Escorrentías de lixiviados posiblemente contaminadas en época húmeda a reservorios comunales para su uso en riego y/o bebederos para animales (ZDR DPO3)
- Asentamientos clandestinos (ZDR DPO4)

Descriptorios para las actividades económicas:

- Pérdida de terreno para la explotación ganadera y/o forestal (costo de oportunidad) (ZDR DAE1)

ZONA 4: ENTORNO (EN)

En este apartado se evaluará el riesgo que genera el área minera en abandono y/o paralizada sobre su entorno.

Descriptorios para el Medio Físico:

Recursos Hídricos.-

- Alteración de la calidad de aguas superficiales en época húmeda por lixiviados y/o material particulado (EN DMFRH 1)
- Alteración de la calidad de aguas subterráneas en época húmeda por lixiviados y/o material particulado

(EN DMFRH 2)

- Alteración de patrones de drenaje (EN DMFRH 3)
- Alteración de la calidad de aire por generación de material fino particulado (EN DMFRH 4)

Recurso Suelo.-

- Alteración de la calidad de los suelos por material particulado procedente de los almacenamientos de residuos (EN DMFRS 1)
- Posibles halos o plumas de contaminación en suelos (EN DMFRS 2)
- Posibles alteraciones en la calidad de los suelos (EN DMFRS 3)
- Alteración a la cobertura vegetal y por ende a erosionabilidad (EN MFRS 4)

Aire.-

- Dispersión de partículas por el viento desde escombreras y/o relaveras (EN DMFA 1)
- Contaminación por desprendimientos de gases de residuos mineros y/o industriales (EN DMFA 2)

Relieve y Geodinámica.-

- Procesos erosivos (EN MFRG 1)
- Alteraciones paisajísticas (EN MFRG 2)

Descriptor para el Medio Biológico:

Fauna.-

- Alejamiento o perturbación de la fauna silvestre (EN MBF 1)
- Extinción de especies en riesgo (EN MBF 2)

Vegetación.-

- Pérdidas de cobertura vegetal (EN MBV1)
- Extinción de especies en riesgo (EN MBV 2)

Descriptor para el Medio Social y Cultural:

- Afectación a sitios arqueológicos (EN DMSC 1)
- Afectación al patrimonio local (EN DMSC 2)

Si se analizan los escenarios correspondientes a cada uno de estos agrupamientos —o cualesquiera otros que se consideren convenientes— sobre la misma matriz de valoración del nivel de riesgo, el resultado final es una especie de cartas de presentación del pasivo minero o emplazamiento evaluado, como puede inferirse de la Figura 1: Probabilidad de ocurrencia de un suceso, Severidad de las consecuencias de un suceso; y matriz de Probabilidad vs Severidad.

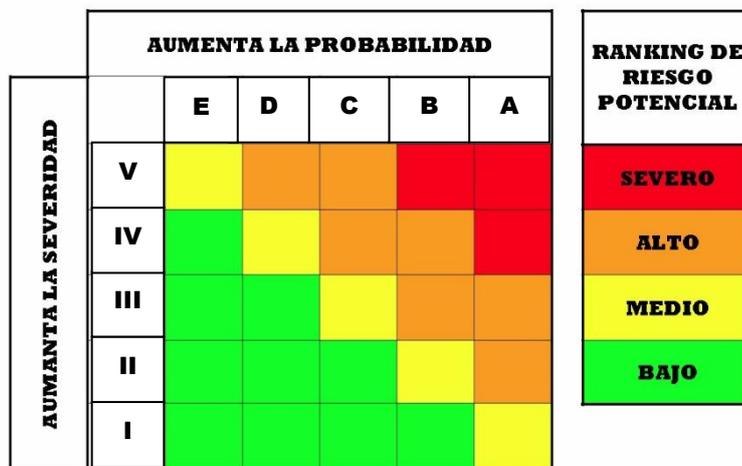
Probabilidad de ocurrencia de un suceso

Nivel	Descriptor	Descripción
A	Casi certeza	Se espera que ocurra en la mayoría de las circunstancias. Probabilidad muy alta
B	Probable	Probablemente ocurrirá en la mayoría de las circunstancias. Probabilidad alta
C	Posible	Podría ocurrir en algún momento. Probabilidad media
D	Improbable	Pudo ocurrir en algún momento. Probabilidad baja.
E	Raro	Puede ocurrir solo en circunstancias excepcionales. Probabilidad muy baja

Severidad de las consecuencias de un suceso

Categoría	Descripción	Efecto sobre el medio ambiente
I	Seguro	Efecto insignificante en el medio ambiente.
II	Marginal	El fracaso degradará el medio ambiente, en cierta medida, pero no provocará daños mayores o a largo plazo.
III	Crítico	El fracaso degradará el medio ambiente, y, si no se toman medidas se producirá un daño mayor o a largo plazo.

IV	Severo	El fracaso producirá degradación ambiental severa.
V	Muy Severo	En ausencia de medidas correctoras se producirá degradación ambiental



Matriz de asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia para cada PAM

**Estudio de Caso – Pasivo Ambiental
Minero de Milluni – La Paz - Bolivia
3.1.1. Problemática Ambiental del Sector**

Milluni se encuentra en el departamento de La Paz, en la provincia Murillo, aproximadamente a 30 km al norte de la ciudad de La Paz, con una altura de 4400 msnm, forma parte de la Cordillera de La Paz (Cordillera Real), está ubicado en la pared sur del Cerro Huayna Potosí (6088 msnm), cuyos nevados han abastecido de agua potable, previo tratamiento, a la ciudad de La Paz.

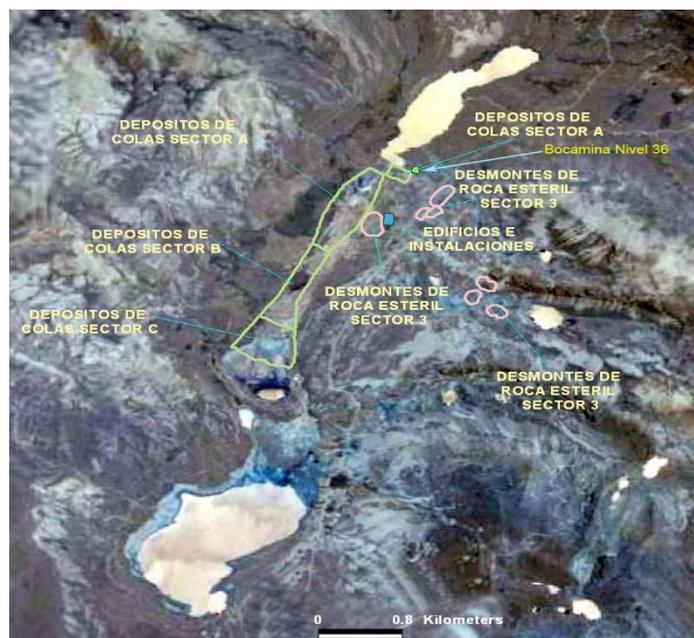
La compañía minera inglesa FABULOSA MINES LIMITED, como concesionaria original de la Mina Milluni, explotó la veta “Rothschild” para la producción de estaño desde comienzos de siglo hasta el año 1974, cuando la Compañía Minera del Sur S.A. (COMSUR S.A.) se hizo cargo de la administración de las operaciones. COMSUR S.A. continuó con las actividades mineras en la misma escala hasta el año 1985, año que se produjo la crisis de los precios de estaño, lo que obligó a reducir el volumen de sus

operaciones hasta el año 1986, cuando la mina, en ese mismo año, suspendió toda actividad productiva.

Después del cierre de la operación de explotación minera subterránea, los niveles freáticos en interior mina, comenzaron a ascender; para finalmente, alcanzar la cota del socavón Milluni, que al encontrarse por debajo del nivel freático natural de las aguas subterráneas, hace que dichas aguas subterráneas ácidas se descarguen al medio ambiente.

Por otra parte, la operación minera de Milluni, desarrollada en el sector, ha dejado un Pasivo Ambiental Minero que es “inestable químicamente”; por lo que, por la presencia de sulfuro en su composición, y por el intemperismo al que es sometido (aire y agua), se oxida generando Drenaje Ácido de Roca (DAR); mismo que aporta, junto a las descargas de aguas ácidas de la mina, acidez y metales pesados a la cuenca. La figura 2, describe la ubicación de los tres sectores de disposición final de residuos mineros.

FIGURA 2. Esquema de ubicación de los sectores de deposición de colas, denominados A, B y C



De acuerdo al estudio de REFORMIN, se tiene la siguiente cuantificación de los volúmenes de residuos mineros depositados en cada uno de los sectores señalados:

Sector A: Este es el sector más cercano a la planta concentradora y sus principales características geométricas son:

- longitud: 950 m
- anchura: 210 m
- profundidad máxima: 5.5 m
- volumen: 756,000 m³

Este sector está constituido principalmente por las colas que se han depositados en los primeros años de actividad de la planta concentradora y por la fracción gruesa de las colas producidas en años sucesivos.

Sector B: Este sector se encuentra inmediatamente aguas abajo del sector A, en la parte donde el valle es más estrecho. Sus principales características geométricas son:

- longitud: 960 m
- anchura: 100 m
- profundidad máxima 1.5 m
- volumen: 122,000 m³

En general el tipo de material que constituye este sector es similar al material del sector A y la pendiente promedio de su superficie es mayor a la pendiente de los sectores A Y C.

Sector C: Este sector se encuentra inmediatamente aguas abajo del sector B y aguas arriba del lago Milluni Grande, en un área del valle relativamente amplio. Sus principales características geométricas son:

- longitud: 950 m
- anchura: 500 m
- profundidad máxima: 3 m
- volumen: 615,000m³

En el área aguas abajo del este sector, en el pasado se construyó un dique con vertedero, con la función de crear una laguna que permitiera también la sedimentación de las colas más finas antes que las aguas rebalsaran hacia el lago Milluni Grande. No obstante estas medidas, en la playa norte del lago Milluni Grande se puede observar una cantidad de colas que fueron arrastradas por el rebalse de agua. De acuerdo a la costumbre local, la laguna de sedimentación del sector C ha sido denominada en este informe como laguna Milluni Chico.

Sector D: Este sector se encuentra aproximadamente a 600 m al norte del ex-ingenio de Milluni, inmediatamente aguas abajo del Nivel - 36m. Está delimitado al norte por las aguas que salen del nivel - 36 y al oeste por las aguas que desbordan de la laguna JankhoKkota. Sus principales características geométricas son:

- longitud: 280 m
- anchura: 160 m
- profundidad máxima: 9 m
- volumen: aproximadamente 200,000 m³.

Por otra parte, la fotografía 1, muestra el sitio de disposición final de los residuos de la

operación minera de la empresa COMSUR (dique de colas – Sector A); además de permitir mostrar, el proceso fuerte de oxidación por la coloración característica de minerales secundarios formados como producto de la oxidación de los sulfuros (en especial pirita).

Fotografía 1: Dique de colas de la Empresa Minera CONSUR en proceso de oxidación



En el estudio de REDFORMIN, se ha llevado a cabo una caracterización de dichos residuos mineros. La tabla siguiente, describe los resultados.

TABLA 1: Características químicas de los relaves Milluni (REFORMIN)

PARAMETRO	Unidad	Alimentación
Estaño, Sn	%	1.49
Zinc, Zn	%	0.14
Cadmio, Cd	%	<0.01
Plomo, Pb	%	0.15
Cobre, Cu	%	0.05
Arsénico, As	%	0.19
Calcio, Ca	%	1.23
Magnesio, Mg	%	0.23
Manganeso, Mn	%	<0.01
Azufre, S	%	23.03
S _{TOTAL}	%	23.03
S _{SULFATO}	%	2.41
S _{SULFURO}	%	19.52
AP	Kg CaCO ₃ /t	610
NP	Kg CaCO ₃ /t	<0.63
NNP	Kg CaCO ₃ /t	-610
NP/AP		0.01
DAR		Genera DAR

Para la evaluación del resultado obtenido pueden considerarse dos criterios:

Primer Criterio: Un residuo minero es considerado como generador de DAR si el valor del NNP es menor a 20 kg CaCO₃/t. Valores de NNP mayores a 20 Kg CaCO₃/t hacen de que el residuo no sea generador de DAR. Si el valor de NNP se encuentra entre

estos dos valores, entonces se tiene un rango de incertidumbre.

Por tanto, la muestra estudiada al tener un NNP de -610 Kg CaCO₃/t, **ES ALTAMENTE GENERADORA DE DAR.** (Ferguson and Morin, 1991).

Segundo Criterio (ABA): Si la relación de NP/AP es menor a la unidad, entonces el

residuo puede ser considerado como generador de DAR. Por el contrario, si dicha relación es mayor a 3, entonces el residuo no es generador del DAR. Valores intermedios, dan lugar a una incertidumbre sobre la generación o no de DAR. Por tanto, la muestra estudiada al tener un valor de NP/AP de 0.001, **ES ALTAMENTE GENERADOR DE DAR.** (Price, 1997; Price, 2010)

3.3.2 Aplicación de la Metodología de Evaluación de Riesgos

Considerando cada uno de los descriptores señalados en el acápite en 3.2.1, y mediante la evaluación de la experiencia en la temática de Medio Ambiente Minero, se procedió a la asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia. Los resultados son presentados en la figura 3 y tomando en cuenta las zonas objeto de evaluación de riesgo: MINA – PLANTA DE BENEFICIO Y/O EXTRACCIÓN METALÚRGICA – DISPOSICIÓN DE RESIDUOS – ENTORNO.

Priorización de Medidas de Remediación de PAM

Una vez que se han obtenido:

- La ficha de identificación de PAM
- La matriz de asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia para cada PAM

Es necesario “priorizar medidas de mitigación” inmediata, para aquellos casos en los que se han determinado “**un riesgo potencial permanente para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente**”; y en ese orden, ir priorizando las medidas de intervención y la asignación de recursos económicos.

La Figura 4 muestra el “ranking de priorización de medidas de mitigación a implementar”, basado en los resultados de la asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia para diferentes PAM evaluados.

Es decir que, es suficiente que algún descriptor en las zonas objeto de evaluación de riesgo: Mina – Planta de Beneficio y/o Extracción – Disposición de Residuos o del Entorno, se encuentre en algún color asignado en rojo, para que se considere la implementación de **MEDIDAS INMEDIATAS DE MITIGACIÓN**; por el contrario, si ninguno de los descriptores a “salido” de las casillas marcadas en verde, entonces “no se requerirán medidas de mitigación” en dicho “sitio minero abandonado”; y por tanto, **NO ES CONSIDERADO UN PASIVO AMBIENTAL MINERO.**

Figura 3: Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia

		AUMENTA LA PROBABILIDAD					RANKING DE RIESGO POTENCIAL SEVERO ALTO MEDIO BAJO
		E	D	C	B	A	
AUMENTA LA SEVERIDAD	V					ZM DPO2 ZDR DPO3 EN DMFRH 1	
	IV					ZDR DPO2	
	III			ZM DP4 ZM DP3 ZBE DP4 ZBE DPO2 EN DMFRH 2		ZM DPO1 ZBE DPO1 EN MFRG 2	
	II			ZBE DP1 ZBE DP3 EN DMFRS 1 ZDR DP3 EN DMFRH 3 EN DMFRH 4 EN DMFRS 2 EN DMFRS 3 EN DMFA 1			
	I	ZM DP2 ZM DP3 ZBE DP2 ZBE DP5 ZBE DPO3 ZBE DAE1 ZDR DPO4 ZDR DAE1 EN DMFRS 4 EN DMFA 2 EN MBF 1 EN MBF 2 EN MBV 1 EN MBV 2	ZM DP1 ZM DAE1 ZM DAE2 ZDR DP1 ZDR DP2 ZDR DPO1 EN MFRG 1				

De la matriz se resume que, en base al ranking de riesgo potencial de severidad:

- Se deben implementar medidas urgentes de “rehabilitación de ambiental de los sitios de almacenamiento de residuos altamente generadores de DAR” a objeto de que estos no alteren la calidad de aguas superficiales en época húmeda por lixiviados y/o material particulado y que además alteran la calidad de aguas de los reservorios comunales para su uso en riego y/o bebederos para animales.

Asímismo, atendiendo al ranking de riesgo potencial alto:

- Se deben implementar acciones para generar coberturas verdes a objeto de disminuir la erosión de suelos en el entorno; además de la construcción de canales de derivación que eviten el ingreso de aguas contaminadas a reservorios comunales para su uso.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se logró realizar la propuesta de una metodología para la identificación y evaluación de riesgos de pasivos ambientales mineros.

La metodología para la inventariación de PAM fue ejecutada en base a la aplicación de una ficha de inventario, propuesta por la ASGMI – 2010.

La metodología de evaluación de riesgo de PAM elaborada, constituye una herramienta práctica y un avance importante en el tema, y tiene por objeto de que las autoridades en el ámbito minero y ambiental, puedan utilizarla para evaluar el riesgo que los PAM presentan para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

Por una parte, con la metodología de inventario de PAM propuesta, se puede generar una base de datos de los pasivos ambientales mineros en Bolivia. Por otra, con la metodología del análisis y la evaluación de riesgos ambientales mediante la matriz de

asignación cualitativa de la Probabilidad de Ocurrencia del Suceso vs la Severidad de la Consecuencia de cada pasivo ambiental minero, se puede evaluar el riesgo que dichos PAM presentan para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

Finalmente, como resultado de la aplicación de las metodologías descritas a los PAM, se puede generar un “ranking de priorización de medidas de mitigación a implementar”; en especial, para aquellos casos en el que el

pasivo ambiental minero genere impactos significativos.

Las metodologías propuestas han sido aplicadas como Caso de estudio al PAM del sitio minero de Milluni; demostrando que este, requiere de “medidas inmediatas de mitigación” de la generación de DAR de residuos altamente generadores de DAR, porque genera un riesgo potencial para la salud y seguridad de la población, para la biodiversidad y para el medio ambiente.

5. BIBLIOGRAFÍA

- ASGMI. 2010. Pasivos Ambientales Mineros. Manual para el inventario de minas abandonadas o paralizadas. Asociación de Servicios de Geología y Minería Iberoamericanos. 42 p. <http://www.igme.es/internet/ASGMI/asmbleas/>
- BRISTOL. 2006. Risk ranking and reduction process. Moonlight Wells Protection Area. BEESC Project No. 26094. Bristol Environmental & Engineering Services Corporation for City of Nome (Alaska).
- CSA (Canadian Standards Association). 1997. Risk Management: Guideline for Decision makers (CAN/CSA-Q850-97). Canadian Standard Association, Etobucoke.
- Ferguson K, Morin K., 1991. The prediction of acid rock drainage lessons from the data base. In: Proceedings of the second international conference on the abatement of acidic drainage, vol. 3, CANMET, Ottawa, pp 83–106.
- Price, W.A., 1997. Guidelines and Recommended Methods for the Prediction of Metal Leaching and Acid Rock Drainage at Minesites in British Columbia. Reclamation Section, Energy and Minerals Division, Ministry of Employment and Investment, Bag 5000, Smithers, BC. 170 p.
- Price, W.A, 2010. Acid Base Accounting Criteria Used in Prediction of Drainage Chemistry. International Mine Water Association (IMWA) 2010 Symposium, Sydney, Nova Scotia, September 5-9, pp. 55-58.
- Robertson, A. and S. Shaw. 2009. Mine Closure. INFOMINE e-Book. <http://www.infomine.com/publications/docs/E-Book%2002%20Mine%20Closure.pdf> Consulta: 24-11.09
- SERNAGEOMIN-BGR. 2008. Manual de evaluación de riesgos de faenas mineras abandonadas o paralizadas (FMA/P). Golder Associates para SERNAGEOMIN-BGR.
- Standards Australia. 2004a. AS/NZS 4360:2004 Risk Management. Sydney, Standards Australia and Standards New Zealand.
- Standards Australia. 2004b. Risk Management Guidelines. Companion to AS/NZS 4360:2004, HB 436:2004. Sydney, Standards Australia and Standards New Zealand.
- Auditoría Ambiental de Línea Base, Compañía Minera del Sur (COMSUR), Zona Milluni - Consultora AGRA Herat & Environmental, La Paz, 1998.
- Manifiesto Ambiental, Compañía Minera del Sur (COMSUR), Consultora MINCO, La Paz, 1999.

Aplicación de Redes Neuronales Artificiales de Base Radial y Geoestadística para la Interpolación/Reconstrucción de Base de Datos de Leyes de Cobre.