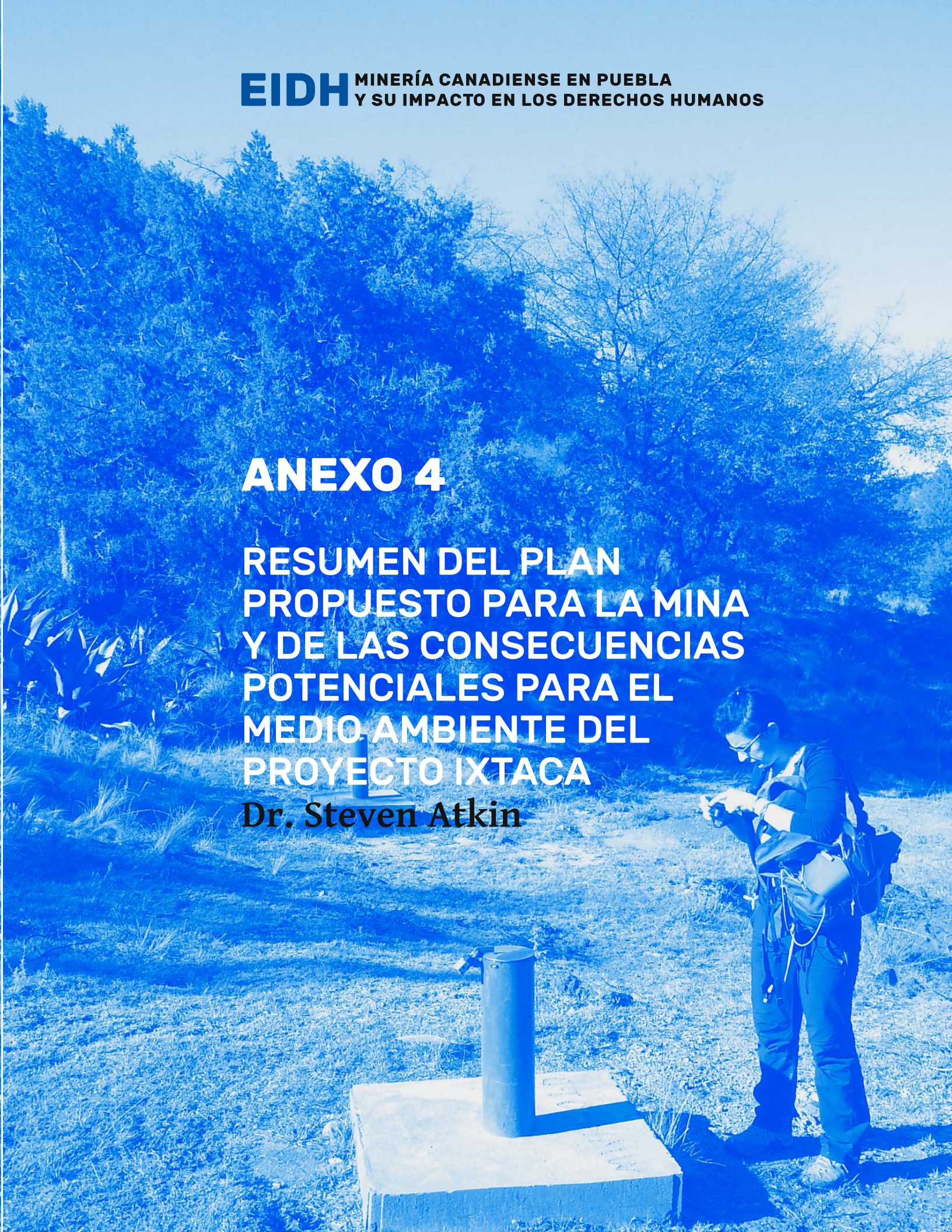


ANEXO 4

RESUMEN DEL PLAN PROPUESTO PARA LA MINA Y DE LAS CONSECUENCIAS POTENCIALES PARA EL MEDIO AMBIENTE DEL PROYECTO IXTACA

Dr. Steven Atkin



Resumen del plan propuesto para la mina y de las consecuencias potenciales para el medio ambiente del proyecto de Ixtaca en el estado de Puebla, México

Steven Atkin, Ph.D., P.Geo., Vancouver, CB, Canadá

para el Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER)

Índice de contenido

1.0 Introducción	6
2.0 Geoquímica del Drenaje Ácido de Roca/Lixiviación de Metales (DAR/LM).....	8
2.1 Fuentes del Drenaje Ácido de Roca (DAR) y la Lixiviación de Metales (LM).....	8
2.2 Drenaje ácido de roca/lixiviación metálica (DAR/LM) e instalaciones mineras	9
3.0 Descripción del proyecto	13
3.1 Ubicación.....	13
3.2 Geología.....	13
3.2.1 Tipos de roca	13
3.2.2 Mineralización	14
3.2.3 Alteración	15
3.3 Explotación minera	15
3.4 Procesamiento del mineral	17
3.5 Cierre de la mina	18
3.5.1 Instalaciones de la mina al cierre	18
3.5.2 Plan de cierre.....	19
4.0 Impactos potenciales	20
4.1 Pruebas geoquímicas	20
4.2 Datos empíricos.....	22
4.2.1 Modelo geoambiental	22
4.2.2 Anomalías del suelo	24
4.3 Temas de interés medioambiental específicos para el sitio del proyecto.....	24
5.0 Recomendaciones	25
6.0 Resumen	27
Referencias.....	27
Apéndice A - Glosario de términos útiles.....	28
Apéndice B - Geoquímica de la roca ácida	33

RESUMEN EJECUTIVO

El Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER) actualmente está preparando una evaluación de impacto en materia de derechos humanos (EIDH) para el Proyecto Ixtaca (en adelante, "el Proyecto") que consiste en una mina de plata y oro en las comunidades de Ixtacamaxtitlán, Puebla, México. El proyecto es propiedad de Almaden Minerals Ltd. (Almaden) y se encuentra ubicado en el estado de Puebla, aproximadamente a 130 km al oriente de la ciudad de México. PODER me contrató para analizar diversos informes sobre el proyecto en apoyo a la EIDH. Los objetivos de este análisis son resumir el plan propuesto de la mina e identificar los posibles problemas ambientales derivados del desarrollo de la mina. Este informe se basa principalmente en los hallazgos de la Evaluación Económica Preliminar (EEP) realizada en 2016. La EEP para el Proyecto fue preparada para Almaden por parte de Moose Mountain Technical Services Inc. (MMTS) de conformidad con el Instrumento Nacional (NI) 43-101 *Normas para la Divulgación de Depósitos minerales en Canadá* para tratar específicamente con la viabilidad del proyecto. La EEP se basó en un plan preliminar para la mina, mismo que fue utilizado para este análisis.

El proyecto tal como está previsto actualmente consistiría de una sola mina a cielo abierto que funcionaría mediante excavación tradicional con camiones y palas. El diseño de la mina contempla una tasa de producción de molienda de 7,500 toneladas por día (tpd) y una vida esperada de 13 años. Los residuos de roca del tajo abierto serían transportados mediante camiones a varias Instalaciones de Almacenamiento de Roca (IAR). El mineral se enviaría ya sea directo del tajo abierto y de la planta de beneficio o a una pila de almacenamiento de baja ley para ser empleado en los últimos años de la vida útil de la mina. Se trituraría y procesaría el mineral de plata-oro utilizando primero separación por gravedad y después circuitos de flotación seguidos por lixiviación con cianuro de los concentrados de gravedad y flotación para producir finalmente una barra de plata-oro. Los lodos de jales del circuito de flotación se enviarían mediante tubos directamente a la Instalación de Mantenimiento de Jales (IMJ). Los concentrados obtenidos por gravedad y flotación del circuito de lixiviación con cianuro primero pasarían por un proceso de destrucción del cianuro (desintoxicación) y después se enviarían con tubos a la IMJ.

No existe información geoquímica, sólo resultados de pruebas metalúrgicas, informados en la EEP. MMTS informó que se habían realizado pruebas químicas (por ejemplo, la Contabilidad Ácido-Base [CAB], análisis químicos completos y pruebas de lixiviación a corto plazo) a 53 muestras de residuo de roca cuyos resultados no se incluyeron en la EEP. Sin datos geoquímicos adecuados es imposible (1) verificar los hallazgos de la EEP respecto al potencial de Drenaje Ácido de Roca/Lixiviación de Metales (DAR/LM) del depósito (2) predecir cuantitativamente la química del agua de filtración y escorrentía proveniente del depósito de mineral, de la IAR y de la IMJ así como la calidad del agua del lago que llenará el tajo abierto abandonado o (3) calcular los posibles impactos de la mina de Ixtaca en la calidad del agua superficial y subterránea aguas abajo para fines de la EIDH. El informe, por lo tanto, resume lo que se conoce respecto al potencial de DAR/LM del depósito (reportado en la EEP, conocido a

partir de depósitos similares en otros lugares y obtenido de pruebas metalúrgicas), identifica posibles áreas de preocupación y concluye con recomendaciones para trabajos futuros.

La EEP reportó que el potencial de Drenaje Ácido de Roca (DAR) y Lixiviación de Metales (LM) en el residuo de roca podría ser bajo. Esto es coherente con lo que se conoce sobre (1) la geología del depósito Ixtaca, donde están las vetas de plata-oro, se encuentran en un medio anfitrión de rocas ricas en carbonatos incluyendo calizas, rocas clásticas sedimentarias consolidadas con calcitas y pizarras calcáreas que en general no tendrían potencial de generación de ácido y (2) el tipo de depósito de oro-plata. El yacimiento mineral de Ixtaca se clasifica como un yacimiento de tipo epitermal de baja sulfuración caracterizado por bajos potenciales de Drenaje Ácido de Roca (DAR) y Lixiviación de Metales con el agua de la mina de pH casi neutro y con bajas concentraciones de metales disueltos.

La información de las pruebas metalúrgicas sugieren que los minerales del Proyecto tienen un bajo potencial de DAR pero que podrían ser fuente de metales lixiviables. La EEP incluyó los resultados del análisis de carbono, azufre y concentraciones de metales selectos en 11 muestras metalúrgicas. Estos análisis mostraron que:

- La mayoría de las muestras, 10 de las 11, se clasificaron como carentes de potencial de generación de ácido (PGA), y
- Las concentraciones oro, plata, hierro, manganeso, plomo y zinc, así como cobre en menor grado, fueron altas, superiores en varios órdenes de magnitud a las concentraciones en rocas no-mineralizadas equivalentes.

Las concentraciones de metales del trabajo realizado en las pruebas metalúrgicas son similares a lo encontrado en las muestras de roca durante la exploración así como en los análisis de suelo. Las concentraciones elevadas de mineralización de oro y plata se asociaron con concentraciones elevadas de metales relacionados tales como arsénico, mercurio, antimonio, cobre y plomo en muestras de roca así como mercurio y antimonio de fondo en las muestras del suelo en el depósito de Ixtaca.

Los temas que generan preocupación sobre el Proyecto incluyen:

- El potencial de DAR/LM de la IAR - La IAR estará compuesta principalmente de roca volcánica (66%) con contenido de sulfuro que puede ser una fuente de DAR/LM.
- El potencial de DAR/LM de la pila de almacenamiento de mineral - Al cierre, la pila carente de recubrimiento contendrá aproximadamente 8 millones de toneladas de mineral de baja y mediana ley.
- Zonas activas de DAR/LM en la IMJ con un recubrimiento parcial - La disposición conjunta de concentrado y jales podría llevar a zonas activas de DAR/LM dentro de la pila, lo cual podría producir una fuente local de filtración ácida y rica en metales.
- Química del agua del lago del tajo - Al cierre, el tajo podría llenarse con agua con lo que se crearía un lago en el mismo, cuya composición química es desconocida.

Las recomendaciones para una ruta futura incluyen:

- Brindar acceso a todos los resultados de las pruebas geoquímicas actuales;
- Realizar un muestreo geoquímico y un programa de pruebas para caracterizar todos los residuos de roca, así como los tipos de minerales y de jales;
- Preparar un modelo de equilibrio hídrico en todo el sitio y que considere específicamente las instalaciones para cuantificar los flujos de entrada y salida de cada instalación para emplearlo en el modelo geoquímico;
- Preparar un Plan de Gestión Hídrica detallado para cuantificar los flujos de agua en todo el sitio de la mina, para ser empleado en los modelos de equilibrio hídrico de todo el sitio y en los modelos geoquímicos de equilibrio de masa.
- Preparar un plan detallado de Gestión de Residuos para identificar métodos, con el fin de distinguir el residuo de roca con y sin PGA que requiera manejo especial para preparar el modelo geoquímico.
- Preparar un modelo prospectivo de equilibrio termodinámico y geoquímico de la calidad del agua para brindar un cálculo de la calidad potencial del agua liberada de cada una de las instalaciones de la mina, y
- Preparar un modelo del equilibrio de masa de la calidad del agua empleando los resultados de los modelos geoquímico y de equilibrio hídrico en todo el sitio para brindar un mecanismo que permita rastrear el flujo de agua y contaminantes en el sitio y fuera del sitio aguas abajo hacia las aldeas y demás receptores.

1.0 Introducción

Almaden Minerals (Almaden) de Vancouver, CB, Canadá, actualmente se encuentra en el proceso de evaluar la viabilidad económica del Proyecto Ixtaca (el Proyecto). El proyecto es un depósito epitermal de baja sulfuración de oro-plata ubicado en el estado mexicano de Puebla, aproximadamente a 130 km al oriente de la Ciudad de México.

El Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER), una organización no lucrativa, no gubernamental con sede en la Ciudad de México, México ha iniciado recientemente un proyecto para brindar apoyo a la comunidad de Ixtacamaxtitlán, Puebla, para realizar una Evaluación de Impacto en materia de Derechos Humanos (EIDH) para el proyecto (Com. Pers. Gonzáles 2015). La EIDH está siendo preparada en colaboración con el Instituto Mexicano para el Desarrollo Comunitario, A.C. (IMDEC), el Centro de Estudios para el Desarrollo Rural - Promoción y Desarrollo Social, A.C. (CESDER-PRODES) y la Unión de Ejidos y Comunidades de Ixtacamaxtitlán.

PODER entró en contacto con la Asociación Estadounidense para el Avance de la Ciencia (AAAS, por sus siglas en inglés), una iniciativa de científicos con sede en Washington DC, EE.UU., para solicitar apoyo técnico en la identificación de los posibles impactos ambientales del proyecto sobre la calidad del agua, incluyendo el Drenaje Ácido de Roca (DAR) y la Lixiviación Metálica (LM) sobre el agua superficial y subterránea local en caso de que la mina fuera desarrollada. Mediante la AAAS, PODER me contrató (Steven Atkin, Ph.D., P.Geo), para desarrollar un análisis de los documentos del Proyecto que están a disposición del público. El informe siguiente se basa en un análisis de los tres documentos que PODER proporcionó al Dr. Atkin:

- *MTM E-14-B-24 Mexcaltepec, Technical Report on the Tuligtic Project, Puebla State, Mexico (Mexcaltepec, Informe técnico sobre el Proyecto Tuligtic, Estado de Puebla, México)* (APEX Geoscience Ltd. et al. 2013);
- *NI 43-101 Technical Report, Preliminary Economic Assessment of the Ixtaca Project (Informe Técnico, Evaluación Económica Preliminar del proyecto Ixtaca, México)* (MMTS. 2014)¹;
- *Comisión del Mercado de Valores de Estados Unidos (SEC), Formato 20-F del Informe Anual para el Año Terminado el 31 de Diciembre de 2014* (Almaden Minerals Ltd. 2015); y
- *NI 43-101 Technical Report, Preliminary Economic Assessment of the Ixtaca Project, Puebla State, Mexico (Informe Técnico, Evaluación Económica Preliminar del proyecto Ixtaca, México)* (MMTS. 2016)

Este informe se estructura de la siguiente manera:

2.0 Análisis Geoquímico - esta sección resume las reacciones geoquímicas del agua en contacto con el mineral y los residuos de la mina;

3.0 Descripción del proyecto - esta sección resume el diseño propuesto de la mina en la evaluación económica preliminar;

4.0 Resumen de los posibles impactos - esta sección identifica los problemas potenciales para el medio ambiente que pudieran surgir con base en el análisis de la EEP y otros escritos al respecto;

5.0 Recomendaciones - En esta sección se identifican estudios y una ruta para el futuro que podrían ser realizados por Almaden para dar apoyo a la preparación y realización de una Evaluación Ambiental (EA) o una Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) para el Proyecto.

6.0 Resumen - esta sección resume los hallazgos de este análisis.

Apéndice A - Glosario de términos útiles

1

¹ El informe técnico NI 43-101 analizado en este informe está fechado el 9 de octubre de 2014 y es una actualización del primer informe técnico NI 43-101 fechado el 13 de mayo de 2014.

Apéndice B - Geoquímica del Drenaje Ácido de Roca/Lixiviación de Metales (DAR/LM)

2.0 Geoquímica del Drenaje Ácido de Roca/Lixiviación de Metales (DAR/LM)

El Drenaje Ácido de Roca (DAR) y la Lixiviación de Metales son impactos medioambientales comunes cuando la roca fresca o no erosionada portadora de sulfuros se ve expuesta a la atmósfera debido a las actividades mineras o de construcción. La Figura 1 es la imagen de un corte a lo largo de la Carretera 97C (el entronque Coquihalla) en Columbia Británica, en Canadá. La construcción de carreteras en la década de los 80 expuso rocas con contenido de minerales sulfurados. Con el tiempo, los minerales sulfurados se descompusieron (erosionaron) liberando hierro y ácido que después fueron regados por el agua de lluvia que cayó sobre la roca expuesta con lo que se generó DAR/LM. El DAR/LM fluyó posteriormente a los arroyos cercanos con lo que se puso en riesgo la salud de las pesquerías locales de salmón. La roca portadora de minerales sulfurados expuesta durante la actividad minera y almacenada en instalaciones mineras también puede generar DAR/LM con el paso del tiempo, lo cual puede afectar la calidad del agua aguas abajo.



Figura 1. DAR/LM en la carretera 97C (Morin y Hutt 2005)

En esta sección se describe brevemente los orígenes y controles sobre el DAR/LM y cómo se puede generar DAR/LM en distintas instalaciones mineras. Para una discusión más detallada, favor de consultar el Apéndice B y dos documentos útiles que pueden servir como guía: *Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide (Guía Global sobre Drenaje Ácido de Roca)* (INAP 2009); y *Prediction Manual for Drainage Chemistry of Sulphidic Geologic Materials (Manual Predictivo para la Química del Drenaje de Materiales Geológicos Sulfurados)* (MEND 2009).

2.1 Fuentes del Drenaje Ácido de Roca (DAR) y la Lixiviación de Metales (LM)

Los minerales sulfurados portadores de hierro, como la pirita (FeS_2), son las principales fuentes naturales de acidez liberada de la roca al medio ambiente. Trazas de pirita son comunes en muchos tipos distintos de roca pero puede alcanzar porcentajes mayores en las rocas mineralizadas encontradas en los depósitos minerales. La erosión natural de las rocas comienza cuando el oxígeno (O_2) de la atmósfera y el agua pluvial reaccionan con la roca

subyacente. La oxidación de la pirita produce la liberación de ácido sulfúrico (H_2SO_4) así como polvo de óxido de hierro ($Fe(OH)_3$), un residuo común encontrado en los sitios de minas abandonadas (drenaje ácido de roca [DAR]). Así como hay minerales que pueden liberar ácido debido al drenaje ácido de roca (DAR) con la erosión, también hay materiales naturales tales como la calcita ($CaCO_3$), la dolomita $[Mg,Ca](CO_3)_2$, y la magnesita ($MgCO_3$) que neutralizan el ácido (potencial de neutralización de ácido - PN). El potencial de que una roca genere DAR depende por tanto de las proporciones de PN y de potencial de generación de ácido PA (PN/PA) en la roca. Algunos criterios de uso general para calcular el potencial de DAR son (MEND 2009):

$2 < PN/PA$	Sin potencial de generación de ácido	Sin PGA
$1 < PN/PA < 2$	Generación incierta de ácido	Incierto
$PN/PA < 1$	Potencialmente ácido	PGA

Otros minerales sulfurados de los que comúnmente se hallan trazas en diferentes rocas, como la calcopirita ($CuFeS_2$), la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS), también son fuentes potenciales de metales solubles (llamados lixiviación de metales o LM). Cuando las concentraciones de estos materiales en la roca son lo suficientemente altas, se vuelve económicamente viable extraer estos minerales como mineral de cobre, plomo y zinc, respectivamente.

La Figura 2 muestra la ruta del drenaje ácido de roca comenzando con (1) el flujo de aire y agua entre las vetas en una pila de roca lo cual lleva a la oxidación de la pirita y (2) el flujo de agua sobre la superficie de la pila de roca (escorrentía), a través de la pila de roca (infiltración) y finalmente hacia fuera de la pila de roca (filtración).

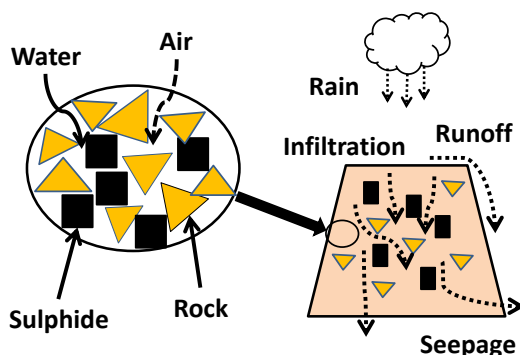


Figura 2. Erosión de la pirita y flujos de DAR/LM (conforme a INAP 2009, Figura 2-11)

2.2 Drenaje ácido de roca/lixiviación metálica (DAR/LM) e instalaciones mineras

La mina propuesta por Almaden para el proyecto Ixtaca incluye las siguientes instalaciones: Instalaciones de Almacenamiento de Roca (IAR), pila de almacenamiento de mineral de baja ley, Instalaciones de Mantenimiento de Concentrado y Jales (IMJ e IMJC) y el tajo abierto (Sección 3.0). Esta sección sigue la pista del flujo de agua de contacto² a través y hacia fuera de las diversas instalaciones mineras propuestas mediante el uso de diagramas esquemáticos simplificados publicados originalmente en la Guía Gard (INAP 2009).

La IAR y la pila de almacenamiento de baja ley estarán compuestas por el residuo de roca de la perforación con explosivos y el mineral de baja ley extraído del tajo abierto. La precipitación que caiga en la IAR o en la pila de almacenamiento se (1) evaporaría, se (2) infiltraría a la pila de roca y permearía hacia abajo a la superficie del lecho de roca subyacente de donde fluiría hacia el extremo aguas abajo de la IAR (filtración) o (3) fluiría a través de la superficie de la IAR (escorrentía).

La Figura 3 muestra las trayectorias de flujo del agua de contacto sobre la superficie de la IAR conforme se infiltra y fluye a través de la pila de residuo de roca. En cualquier caso, el agua entraría en contacto con la roca y disolvería las sales solubles del desgaste por la acción atmosférica de la roca y tomaría partículas finas de la roca.

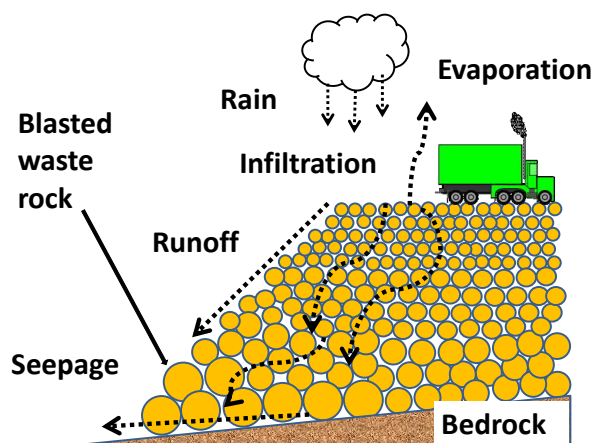


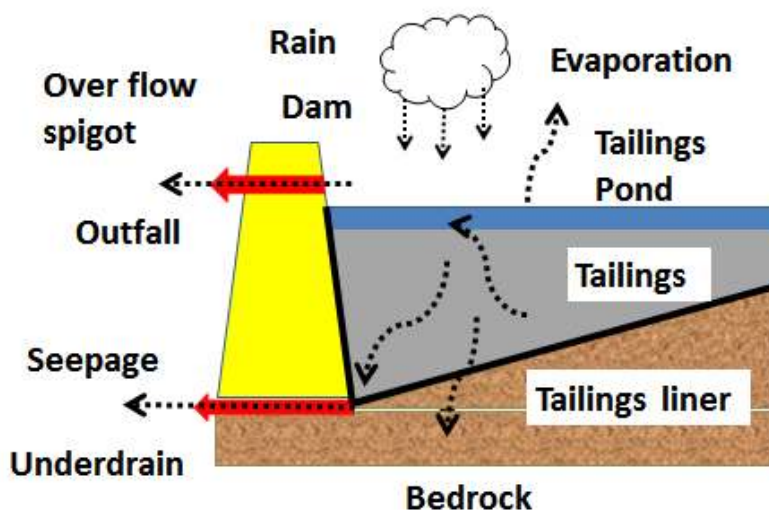
Figura 3. Flujos de la IAR (conforme a INPA 2009, Figura 4-5).

²

□ Agua de contacto se refiere al agua que ha entrado en contacto con la roca y el suelo alterados por la mina. El término se utiliza para distinguir el agua afectada (contacto) y el agua que no ha tenido contacto o el agua que se ha desviado alrededor del área de actividad minera.

Los residuos del proceso (jales o concentrado) de recuperación de oro y plata en la planta de beneficio se almacenarían en la IMJ o en la IMJC, respectivamente. Los jales y el concentrado se depositarían en la IMJ y en la IMJC como lodos que son aproximadamente 40% sólidos (60% solución del proceso).

La Figura 4 muestra las trayectorias de flujo del agua en la IMJ y la IMJC. Conforme los sólidos se asienten y se consoliden, el agua residual del proceso se expulsaría hacia arriba a la presa de jales o hacia abajo para descargarse a través de los colectores. El agua de lluvia también se recolecta en la presa de jales. En una emergencia, por ejemplo en los periodos que sigan a una alta precipitación, el exceso de agua puede liberarse a través de las válvulas de desagüe para evitar una descarga descontrolada en caso de que quede rebasada la capacidad de la presa. La pérdida de agua incluiría la evaporación y la debida a las operaciones, el agua en la presa de jales se emplearía en la planta de beneficio como agua de proceso (llamada agua de reemplazo).



**Figura 4. 1 Flujos de la IMJ y la IMJC (conforme a INAP 2009
Figura 4-6)**

Con frecuencia, los lagos que se forman en los tajos abandonados se dan a partir de diferentes fuentes de agua, incluyendo:

- Agua subterránea que fluye al tajo;
- Precipitación que cae directamente al lago;
- Precipitación sobre las paredes del tajo y que fluye hacia el lago (escorrentía hacia las paredes del tajo), y

- Agua superficial fluyendo al tajo desde el área circundante.

Normalmente el agua que fluye hacia el tajo se desvía y podría no sumarse al flujo general de agua hacia el lago. A excepción del agua pluvial, que está muy diluida, cada una de las distintas fuentes de agua que fluyan hacia el tajo podrían tener una composición química distinta.

La Figura 5 muestra las rutas del flujo hacia dentro y fuera del lago. El nivel del lago depende del equilibrio del caudal de agua que fluye hacia el tajo y el caudal de salida de agua del tajo o el lago. Si los caudales de salida (por ejemplo, debidos a la evaporación) superan los caudales de agua entrante, el tajo se secará. En caso de que el caudal de entrada supere al de salida, es posible que se forme un lago en el tajo y un nivel constante del lago dependería de las proporciones relativas de los caudales de entrada y salida.

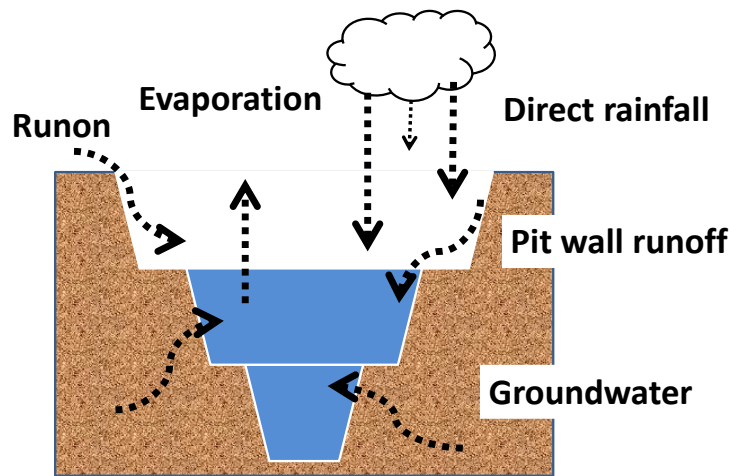


Figura 5. Flujo al lago del tajo (conforme a INAP 2009. Figura 4-3)

3.0 Descripción del proyecto

Esta sección resume lo que se sabe respecto al Proyecto con base en un análisis de la información escrita proporcionada por PODER (Sección 1.0). El diseño del Proyecto proviene de la Evaluación Económica Preliminar (EEP) NI43-101 de 2016. La EEP para el Proyecto fue preparada por MMTS para Almaden de conformidad con el Instrumento Nacional (NI) 43-101, *Normas de Divulgación para Depósitos de Minerales en Canadá*. El NI43-101 es un conjunto codificado de reglas y directrices para reportar la información respecto a las propiedades mineras de las empresas que informan estos resultados en las bolsas de valores de Canadá. Su objetivo es demostrar la viabilidad económica del proyecto. Se basa en un plan preliminar para la mina, razonable y justificable, pero no es un plan definitivo. Conforme se realicen perforaciones y Almaden recopile más información, el plan de la mina podría cambiar conforme avance el proyecto a las etapas de pre-viabilidad, viabilidad y diseño definitivo.

3.1 Ubicación

El Proyecto se encuentra en la parte sur de la Sierra Madre Oriental, dentro del Cinturón Transvolcánico mexicano, a elevaciones de entre 2,300 metros al sur y 2,800 metros sobre el nivel medio del mar (msnm) en el norte. (MMTS 2016, p. 19). Las coordenadas del Proyecto son 19 grados 40 minutos latitud norte y 97 grados 51 minutos longitud oeste, o utilizando coordenadas UTM NAD8 Zona 14, 618,800 m este y 2,176,100 m norte (MMTE 2016, p. 15). La región tiene un clima templado, en el que las temperaturas medias van de 19° C en junio a 10°C en diciembre y 600 mm de precipitación anual que cae principalmente entre junio y septiembre (MMTS 2016, p. 19). No se presentó información sobre evaporación.

3.2 Geología

La mineralización de plata y oro tiene lugar en vetas rodeadas de rocas sedimentarias de la Formación Tamaulipas Superior, rocas ígneas intrusivas y volcánicas extrusivas de los depósitos piroclásticos de Cosoltepec Superior (MMTS 2016 p. 27). La siguiente sección del presente informe trata de la alteración, mineralización y los tipos de roca que albergan la mineralización reportada en la EEP.

3.2.1 Tipos de roca

La Formación Tamaulipas Superior es una secuencia de rocas sedimentarias ricas en carbonatos del Jurásico Tardío al Cretáceo Temprano. La piedra caliza rica en arcilla, en la parte superior de la secuencia, tiende hacia abajo a rocas clásticas compuestas de limolita consolidada con calcita y finalmente, a pizarra rica en carbonato en el fondo (MMTS 2016 p. 24). Estas rocas sedimentarias tienen un PN significativo y en general se les clasificaría como no generadores potenciales de ácido (sin PGA) (Sección 2.3).

La Formación Tamaulipas Superior, se introdujo por diques intermedios de mediados del Mioceno. Los diques son de origen ígneo lo que significa que se formaron por la cristalización del magma y se les clasifica como intrusivas, lo cual significa que los diques llenaron las fracturas en las rocas huésped de carbonato. Tanto la piedra caliza y los diques ígneos están mineralizados. Los diques han sufrido varios episodios de alteración y mineralización, el último episodio consiste de mineralización portadora de pirita.

Los depósitos piroclásticos de Cololtepec en la capa superior son más jóvenes que la secuencia sedimentaria y se calcula que son del Cenozoico tardío. La unidad consiste de una unidad de flujo basal piroclástico lítico-rico con una capa sobrepuesta de toba cristalina (MMTS 2016, p. 24, 25). Estas rocas son de naturaleza extrusiva, lo que significa que se forman por la cristalización del magma durante las erupciones volcánicas. Las rocas volcánicas se alteran y mineralizan con pirita diseminada y veteado de cuarzo-calcita. Se consideraría que los diques y la secuencia volcánica tienen un potencial de incierto generador de ácido a generador en potencia de ácido (PGA) con base en la presencia de pirita diseminada y una cantidad limitada de carbonato PN proveniente de las vetas con contenido de carbonato (Sección 2.1 y 2.3)³.

3.2.2 Mineralización

La mineralización en el depósito de Ixtaca está dominada por espacios abiertos rellenos a lo largo de las vetas y con brechas hidrotérmicas (MMTS 2016, p. 27). Se reportan tres etapas de mineralización en la EEP: una etapa estéril que consiste de vetas de calcita, una etapa intermedia compuesta por minerales ricos en carbonatos y silicatos con altas leyes de plata y bajas leyes de oro y una etapa final con mineralización de plata y oro (MMTS 2016, p. 28). El mineral sulfuroso y los residuos minerales se enumeran en la Tabla 3.1 (conforme a MMTS 2016, p. 28)

Tabla 3.1 Resumen de minerales en el depósito de Ixtaca.

Mineral	Fórmula	Mineral	Fórmula
Electro	Ag, aleación natural de Au	Calcopirita	CuFeS ₂
Galena	PbS	Polibasita	(Ag,Cu) ₁₆ Sb ₂ S ₁₁
Clausthalita	PbSe	Tetrahedrita argentífera	(Cu,Fe,Zn,Ag) ₁₂ Sb ₄ S ₁₃
Esfalerita	(Zn,Fe)S	Acantita	Ag ₂ S
Alabandita	MnS	Naumanita	Ag ₂ Se
Uytengbogardita	Ag ₃ AuS ₂	Pirargirita	Ag ₃ SbS ₃
Pirita	FeS ₂	Estefanita	Ag ₅ SbS ₄

Los minerales de sulfuro en la Tabla 3.1 están compuestos de uno o más de los siguientes elementos: plata (Ag), oro (Au), plomo (Pb), zinc (Zn), hierro (Fe), antimonio (Sb), selenio (Se) y azufre (S). Aunque muchos de los minerales pueden presentarse en cantidades ínfimas en el mineral en bruto, cada paso del procesamiento del mineral (sección 3.4) del mineral bruto a los jales y hasta el "concentrado" produce una recolección selectiva de estos minerales con

3

La única información geoquímica respecto al DAR que se proporciona en los documentos que proporcionó PODER son cinco concentraciones totales de carbono y azufre provenientes de análisis hechos a muestras de mineral empleadas para fines de pruebas metalúrgicas (APEX Geoscience Ltd. et al. 2013, Tabla 13.1, p.36). Los resultados muestran que las muestras compuestas de Dique y Toba (volcánica) se clasifican como de potencial incierto de generación de ácido. Las muestras compuestas de piedra caliza, pizarra y caliza/dique HG carecen de PGA.

contenido de sulfuro. Por consiguiente, las proporciones relativas de muchos de estos minerales y los elementos contenidos pueden llegar a ser significativos en los flujos de residuos que llegan a las diferentes instalaciones de la mina (Sección 3.5).

3.2.3 Alteración

Las mismas soluciones ácidas (llamadas soluciones hidrotérmicas o de agua caliente) que llevaron el oro y la plata disueltas a las vetas con contenido mineral, también alteraron los minerales en las paredes de las fracturas a través de las cuales fluyó el agua. Este cambio en composición mineral se conoce como alteración hidrotérmica. La tabla 3.2 enumera diversos minerales de alteración reportados en el depósito de Ixtaca.

Tabla 3.2 Resumen de la alteración geotérmica de los minerales

Mineral	Fórmula
Illita	$KAl_2(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2$
Adularia	$KAlSi_3O_8$
Cuarzo	SiO_2
Caolinita	$Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$
Silicato de calcio skarn	Los minerales de silicato rico en calcio pueden incluir uno o más de los siguientes: piroxeno (por ejemplo, diópsido - $CaMg(SiO_3)_2$); granate (por ejemplo, grossularia - $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$); actinolita ($(Ca_2(Mg,Fe)_5(Si_8O_{22}))(OH)_2$); epidote ($Ca_2(Al,Fe)_3Si_3O_{12}(OH)$)

Los minerales iniciales de silicato de calcio y la formación de alteraciones posteriores: illita, piedra de luna, cuarzo y pirita tiene lugar en los diques (MMTS 2016, p.24). Las tobas superficiales de Cololtepec sufrieron una fuerte lixiviación de la base durante las fases tardías de la alteración hidrotérmica lo cual tuvo como resultado la alteración de la caolinita, la silicificación de reemplazo (SiO_2) y la formación de una coraza sinterizada (SiO_2) (MMTS 2014 p. 28).

3.3 Explotación minera

El diseño del proyecto a partir de la EEP se basa en la minería tradicional con camiones y palas a cielo abierto. La explotación minera a cielo abierto, normalmente se utiliza para depósitos minerales cercanos a la superficie debido a que los costos por tonelada de este tipo de extracción son mucho menores que en la minería subterránea. Otros factores que pueden influir en el método de extracción incluyen la ley del mineral, la forma del yacimiento y los precios del metal, entre otros.

La EEP considera una vida de 13 años para la mina con una tasa de producción de molienda de 7,500 toneladas por día (tpd). En el diseño de la mina, se empleó un modelo en bloque tridimensional que incorporó la ley de Au (g/t) y Ag (g/t), la información del grado de DAR, los ángulos de las pendientes del tajo, los costos de extracción, etc. para el diseño de la mina a

cielo abierto y el cronograma del plan de extracción/producción (MMTS 2016, p. 103). Los precios del metal usados en el diseño de optimización del tajo fueron USD \$1,150 /Oz Au y USD \$16/Oz Ag (MMTD 2016, p. 106, tabla 16.6). El plan de la mina abarca un año de operaciones previas a la construcción y una vida útil de 13 años para la mina (MMTS 2016, p. 122, Tabla 16-15).

El plan de la mina incluye el tajo, la planta de beneficio, la Instalación de Mantenimiento de Jales (IMJ) y el embalse de la IMJ, la pila de almacenamiento de mineral y otras instalaciones auxiliares (MMTS 2016, p. 119). Se planea emplear el residuo de roca en la construcción de la presa de jales y el excedente se enviaría a la IAR. El mineral de alta ley se transportaría directamente a la planta de beneficio y a la pila para almacenamiento temporal y a largo plazo (MMTS 2016, Tabla 16.15).

En la Tabla 3.3 se enumeran los tonelajes de los distintos tipos de materiales y la disposición final del residuo. El residuo de roca consiste de 66% de roca volcánica y 34% de roca primaria (MMTS 2016, p. 125). El mineral se encuentra principalmente en un entorno de caliza (87.9%) y en menores cantidades de roca volcánica (10.7%) y esquisto negro (1.4%) (MMTS 2016, p. 67, tabla 13.1).

Tabla 3.3 Tonelajes de residuo de roca y voladura del plan de mina de 2016

Tipo de material	Total	Volcánico	Piedra caliza y esquisto negro	Medio de voladura
	kt	kt	kt	toneladas
Residuo	165,401	109,165	56,236	31,327
Mineral de alta ley	35,515	3,800	31,715	4,959
Mineral en la pila de almacenamiento	13,406	1,434	11,972	1,872
Total	214,321	114,399	99,923	38,158

- La voladura en el sitio propuesto sería realizada por un contratista empleando explosivo a granel bajo la vigilancia de un supervisor de voladura empleado por la mina. Los factores de explosivo (cantidad de explosivos a granel por tonelada de roca) empleados en la EEP son entre 0.22 kg/t para minerales de carbonato y esquisto negro y 0.13kg/t para mineral volcánico (MMTS 2016, p. 123). Suponiendo un total de 214 millones de toneladas de mineral y residuo, el tonelaje total de explosivos a granel sería de aproximadamente 38,000 toneladas a lo largo de la vida de la mina Tabla 3.3. El tonelaje real de explosivos a granel dependerá de las proporciones de rocas volcánicas y carbonatos entre otros factores.

3.4 Procesamiento del mineral

El proyecto de plan de la mina está diseñado para producir barras de aleación de plata-oro (doré). En esta sección se revisan los pasos requeridos para recuperar el oro y la plata, comenzando con la trituración, seguida de la extracción del metal (MMTS 2016, p. 133).

En el molido (trituración) se reduce el tamaño del grano del material para liberar los minerales que serán procesados. La trituración es la primera fase del circuito de molienda y se utiliza para reducir el mineral obtenido de la mina a una fracción de grano grueso. La trituración normalmente se hace en seco utilizando trituradoras de mandíbulas o de conos. La molienda es la fase final del circuito y se utiliza para crear una fracción de grano muy fino para separar los minerales de la "ganga" (residuos). La molienda, normalmente, se realiza en húmedo y se utilizan molinos de bola o de barras.

En el procesamiento del mineral (llamado beneficio) primero se separan los minerales de la ganga y después el oro y la plata del resto de los minerales. El procesamiento del mineral para el Proyecto consiste de tres pasos:

- Separación por gravedad - el circuito de gravedad está diseñado para recuperar el electrón con oro nativo o aleación de oro-plata. En la separación por gravedad se utilizan las diferencias en densidad del mineral y la ganga. El oro, con una densidad muy alta, normalmente se separa de la ganga menos densa utilizando un separador ciclónico para formar un concentrado rico en oro.
- Flotación mediante espuma - El circuito de flotación mediante espuma se utiliza para recuperar los minerales de oro y plata con contenido de sulfuros. La flotación utiliza las diferencias en las características superficiales de los minerales y de la ganga y las diferencias en cuanto a la fijación a las moléculas de agua (hidrofílicas) o al rechazo a las moléculas de agua (hidrofóbicas). Durante la flotación, las burbujas de aire finas se mezclan con el mineral molido y con agua. Las burbujas de agua se adhieren a los minerales que normalmente repelen el agua y los minerales flotan a la superficie de la celda de flotación. Los minerales adheridos a las burbujas se acumulan en la superficie formando una espuma que se desborda como concentrado de la celda de flotación. La ganga normalmente se adhiere a las moléculas de aire, repele las burbujas de aire y se hunde. La ganga se acumula al fondo de la celda de flotación y se transporta mediante tuberías a la IMJ (IMJ o estanques de jales) (MMTS 2016, p. 133). Los jales son una mezcla de roca finamente molida y agua en la que aún existen minerales de contenido metálico tales como la pirita, así como el residuo de los químicos empleados en el proceso de flotación.
- Lixiviación con cianuro - El circuito de lixiviación con cianuro se utiliza para el concentrado obtenido por gravedad y flotación para disolver el oro y la plata lixiviable (MMTS 2016, p. 133). Durante la lixiviación con cianuro, una solución diluida de cianuro de sodio o de calcio se agrega al concentrado de mineral molido para disolver el oro y la plata. Posteriormente, se hace pasar a la solución impregnada con cianuro por una serie de pasos para recuperar el oro y la plata:

- De la solución de cianuro empleando un proceso de carbón en lixiviación (CIL, por sus siglas en inglés);
- Del carbón mediante elución y
- De otros minerales disueltos por el cianuro como cobre, plomo y/o zinc ya sea por electro-obtención y/o fundición.
- Circuito de destrucción/ neutralización de cianuro - se prevé que la solución de cianuro y los jales del circuito de lixiviación con cianuro reciban un proceso para eliminar la toxicidad retirando el cianuro residual de la solución del proceso así como de los sólidos antes de liberarse a la IMJ (MMTS 2016, p. 133). Como los jales de flotación, los jales de concentrado pueden contener pirita residual y otros minerales sulfurados con contenidos minerales tales como la calcopirita, la galena y la esfalerita (consultar Tabla 3.1).

3.5 Cierre de la mina

El proyecto Ixtaca propuesto es pequeño en comparación con muchas minas en funcionamiento. Las minas grandes a cielo abierto, en la actualidad, procesan minerales a tasas de cientos de miles de toneladas al día (Robertson 2011) en comparación con las 7,500 toneladas/día propuestas para la mina de Ixtaca. Posteriormente al cese de la extracción, las instalaciones mineras se cerrarían de conformidad con las directrices Mexicanas.

3.5.1 Instalaciones de la mina al cierre

Con base en el plan actual para la mina, al final de su vida útil, el Proyecto tendría diversas instalaciones que podrían requerir recuperación o eliminación:

- Tajo abierto - el tajo abierto sería de más de 1,000 m de largo, casi 1,000 m de ancho y con una profundidad de varios cientos de metros (MMTS 2016, p. 124, Figura 16-11).
- Instalación de almacenamiento de roca (IAR) - Al cierre, las IAR contendrían aproximadamente 165 millones de toneladas de residuo de roca menos la roca empleada en la construcción de las diferentes fases de la presa de la IMJ. Las IAR consistirán de hasta cinco estructuras separadas ubicadas en torno al tajo abierto y aguas abajo de la IMJ (MMTS 2016, p. 124, Figura 16-11).
- Pila de almacenamiento de baja ley - Al final de la vida útil de la mina, la pila de almacenamiento contendría aproximadamente 8 millones de toneladas de mineral de baja y mediana ley. La Figura 6 muestra el tonelaje acumulativo de mineral (al que se le resta el mineral enviado a la planta de beneficio) mismo que se almacenaría en la pila durante cada año de funcionamiento (MMST, 2016, p. 122, Tabla 16-15). Los tonelajes llegan a un máximo de 19 millones de toneladas hacia el año 9 y se reducirán a 8 millones de toneladas hacia el final de la vida de la mina en el año 13.⁴

⁴

Los años -2 y -1 en la Figura 6 son los dos años de la operación previa a la construcción.

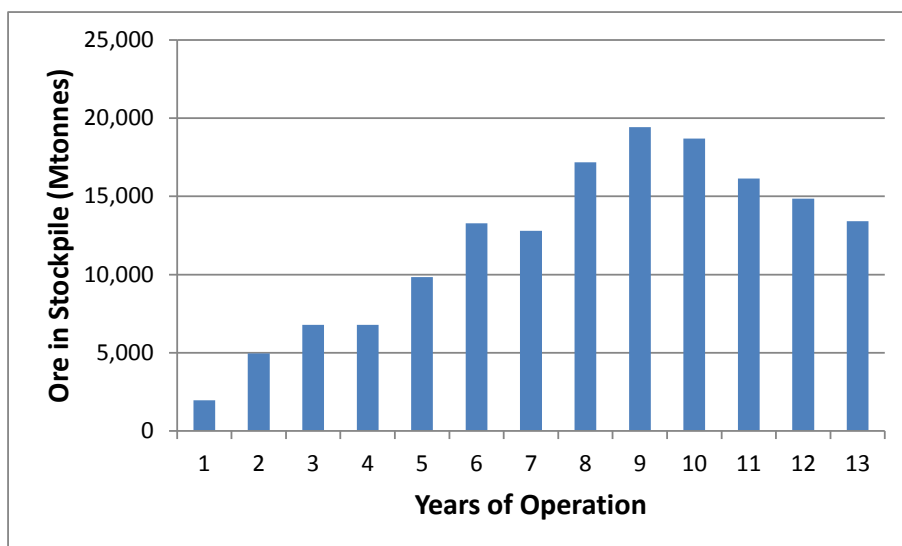


Figura 6. Tonelaje anual de mineral en la pila de almacenamiento⁵

- Instalación de mantenimiento de jales (IMJ) - La IMJ contendría aproximadamente 35 millones de toneladas de jales (MMST 2016, p. 122, Tabla 16-15). La IMJ carece de recubrimiento con la excepción de una barrera de control de filtración compuesta de una geomembrana de polietileno de alta densidad en la cuesta ascendente de frente al dique.(MMST 2016, p. 143).

3.5.2 Plan de cierre

El plan de la mina considera el cierre de las instalaciones mineras sólo de la forma en la que lo requieren las reglamentaciones ambientales de México. Los requisitos de cierre en México (MMTS, 2016, pp. 156 y 181) se limitan al desmantelamiento de las instalaciones de jales (Sección 7 de la NOM-141-SEMARNAT, 2003). Las normas estipulan únicamente que se establezcan medidas (1) para evitar la liberación de polvo o de escorrentía y (2) para evitar la falla de los diques. En presencia de jales con PGA, las regulaciones requieren que se establezcan medidas para (1) prevenir la formación de DAR/LM o para brindar tratamiento para DAR/LM y (2) que la superficie de los jales se cubra con tierra o algún medio en el que puedan crecer plantas para la recuperación de la cubierta vegetal.

4.0 Impactos potenciales

⁵ Los 125 millones de toneladas de alimentación a la planta incluyen las toneladas de jales enviados a la IMJ, las toneladas de concentrado enviadas a la IMJC y los metales recuperados (MMTS, 2014, p. 128, Tabla 16-17).

Existe una cantidad limitada de información disponible sobre las pruebas geoquímicas que permitirían cuantificar el potencial de drenaje ácido de roca y de lixiviación de metales en el mineral y el residuo del Proyecto. MMST ha enfatizado el bajo potencial DAR del residuo de roca del Proyecto; sin embargo, con frecuencia los minerales se diluyen bajo entornos neutros y alcalinos (Drenaje Neutro y Salino de Mina, INAP 2009). El análisis de los posibles impactos ambientales es cualitativo y se basa en las pruebas geoquímicas disponibles, los datos empíricos y asuntos específicos de interés medioambiental.

4.1 Pruebas geoquímicas

MMTS informó que 53 muestras de todo el residuo de roca potencial, se analizaron empleando pruebas geoquímicas tal como lo especifica el gobierno mexicano (Anexo normativo 5 a la NOM-141-SEMARNAT-2003). (MMTS 2016, p. 147) Las pruebas incluyeron:

- Medición con ICP de múltiples elementos mediante digestión con agua regia terminado en ICP-MS (Espectrometría de Masas con Plasma Acoplado Inductivamente);
- Análisis de contabilidad ácido-base (ABA) mediante el método Sobek modificado, y
- Pruebas de lixiviación con solución de extracto equilibrada de dióxido de carbono

Ninguno de los resultados de las pruebas se informaron en la EEP. Con base en la revisión de la información proveniente de MMTS, MMTS concluyó que: "Los materiales geológicos expuestos, excavados y procesados durante la extracción presentan un bajo potencial de producir drenaje ácido de roca (DAR) o de lixiviación de metales (LM)".

Las leyes de cabeza de las muestras metalúrgicas informadas en la EEP apoyan la conclusión del bajo potencial de DAR/LM en las muestras de mineral. La tabla 4.1 resume las concentraciones de carbono inorgánico y de azufre en forma de sulfuro para 11 muestras compuestas de mineral. La Tabla también incluye el potencial neto de neutralización (PN), el potencial de generación de ácido (PA) y la proporción de potencial neto (PN/PA) (MEND 1997). El PN/PA es indicador del potencial de generación ácida proveniente del material geológico.

Tabla 4.1 Resultados de los ensayos de cabeza de los análisis C y S de las pruebas metalúrgicas

Sample	C(Inorganic)	S(Sulphide)	NP	AP	NP/AP
	%	%	t CaCO ₃ /kt	t CaCO ₃ /kt	
BS Sample 01	2.71	4.69	225.8	146.6	1.54
BS Sample 02	4.86	2.28	405.0	71.3	5.68
BS Sample 03	4.27	2.2	355.8	68.8	5.18
LC Sample 01	1.71	1.64	142.5	51.3	2.78
LC Sample 02	1.85	1.63	154.2	50.9	3.03
LC Sample 03	1.79	1.75	149.2	54.7	2.73
LS Sample 04	10.1	0.26	841.7	8.1	104
LS Sample 05	7.81	1.08	650.8	33.8	19.3
VC Sample 01	2.19	2.07	182.5	64.7	2.82
VC Sample 02	1.84	1.66	153.3	51.9	2.96
VC Sample 03	3.31	2.8	275.8	87.5	3.15
t CaCO ₃ /Kt = tonnes CaCO ₃ / ktonne of rock					
BS = black shale, LS and LC = Limestone, and VC = volcanics					

La Figura 7 es una gráfica del PN comparada con el PA. Las proporciones de PN/PA menores a 1:1 se clasifican como potencialmente generadoras de ácido (PGA) y las proporciones superiores a 2 se clasifican como sin PGA. Las muestras con proporciones PN/PA de entre 1 y 2 se clasifican como de potencial "incierto" de generación de ácido ya que el exceso de PN no es lo suficientemente alto como para asegurar la ausencia de potencial de generación de ácido (MEND 2009)

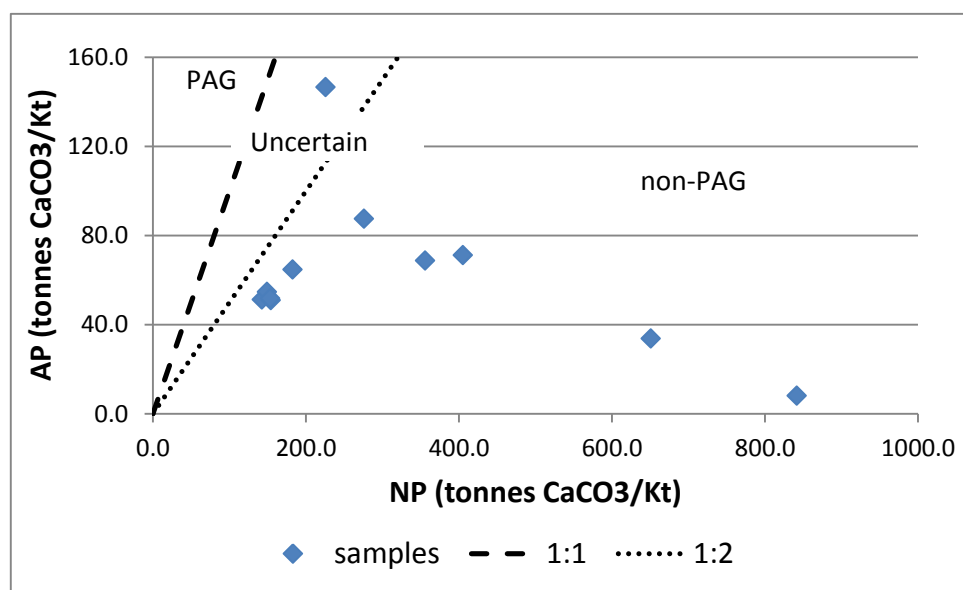


Figura 7. PN comparado con PA para muestras de mineral

Los resultados de los análisis de ley de cabeza mostrados en la Tabla 4.2 y en la Figura 7 sugieren que el mineral en la pila de almacenamiento normalmente tendría un potencial bajo de DAR. Solamente una muestra de esquisto negro con alto contenido de sulfuro se clasifica como de potencial DAR "incierto", las pruebas adicionales de jales de flotación y de concentrado serían necesarias para cuantificar el potencial DAR de los materiales del proceso que se almacenarían en la IMJ.

La tabla 4.2 resume los resultados de los análisis ley de cabeza de metales seleccionados a partir de las once muestras de mineral. Estos análisis se han comparado con las concentraciones promedio de metales en muestras idénticas de roca desmineralizadas (Price 1997, Apéndice). La tabla muestra que las concentraciones de oro (Au) y plata (Ag) son superiores en las muestras del Proyecto que en muestras equivalentes de rocas mineralizadas. El oro y la plata serán recuperados en el doré proveniente de la planta de beneficio.

Lo que es sorprendente de la Tabla 4.2 es que las concentraciones de otros metales (por ejemplo, hierro (Fe), manganeso (Mn), plomo (Pb) y zinc (Zn)), elementos que no se recuperarán en el doré, también son superiores a las rocas desmineralizadas equivalentes. El mineral de baja y mediana ley así como los jales con altas concentraciones de hierro, manganeso, plomo y zinc se llevarán a la pila de almacenamiento y a la IMJ así como posiblemente a la IAR en residuos por debajo de la ley de corte.

Tabla 4.2 Ensayo de cabeza de los metales seleccionados de las pruebas metalúrgicas

Element	Unit	BS Sample 01	BS Sample 02	BS Sample 03	Average shale	LC Sample 01	LC Sample 02	LC Sample 03	LS Sample 04	LS Sample 05	Average limestone	VC Sample 01	VC Sample 02	VC Sample 03	Average volcanic
Au	mg/kg	0.79	0.22	0.16	0.00X	1.33	0.69	0.41	0.48	0.93	0.00X	1.3	0.73	0.33	0.004
Ag	mg/kg	238	58	21	0.07	117	39	63	21	101	0.0X	49	61	56	0.051
Cu	mg/kg	111	46	30	45	50	19	59	12	33	4	41	50	39	30
Fe	%	4.38	2.29	2.43	0.05	1.61	2.41	2.11	0.494	1.17	0.004	2.91	2.71	4.75	0.03
Mn	mg/kg	59,600	11,300	5,320	850	26,600	16,000	14,000	13,800	24,100	1,100	10,700	11,900	34,000	540
Pb	mg/kg	5,930	700	313	20	372	221	121	49	367	9	46.5	46.4	482	15
Zn	mg/kg	9,890	1,520	740	95	668	546	218	118	622	20	103	129	1,960	60

4.2 Datos empíricos

4.2.1 Modelo geoambiental

Durante los últimos años se ha recopilado información sobre la calidad del agua proveniente de distritos que han tenido actividad minera en el pasado y por tipo de depósito mineral. Estos

modelos geoambientales brindan información empírica sobre la posible composición química del agua proveniente de las instalaciones mineras.⁶

El depósito de Ixtaca se clasifica como epitermal de oro-plata de "baja sulfuración" (MMTS 2016, p. 27). Los depósitos epitermales de minerales de "baja sulfuración" normalmente contienen una proporción abundante de ganga de carbonato y compuestos de alteración similares a los del depósito de Ixtaca. El agua de mina en dichos depósitos presenta valores de pH casi neutros y concentraciones relativamente bajas de metales base (Plumlee et al. 1999, p. 401). La tabla 4.1 es un resumen del pH y de las concentraciones de metales en las aguas residuales de la mina provenientes de 19 depósitos epitermales de "baja sulfuración" en Alaska, EE.UU. (Plumlee et al. 1999, Apéndice) así como las directrices de concentraciones de metales de la CFI (2007) en las Guías de Efluentes de Minería.

La información brinda indicación de cómo podría ser la composición química de las aguas residuales del residuo de roca de Ixtaca. La tabla 4.1 sugiere que el pH y la concentración de metales en el agua de las minas en depósitos epitermales de "baja sulfuración", y por analogía la del Proyecto, se encuentran generalmente dentro de las guías para efluentes de la CFI/Banco Mundial.

Tabla 4.3 Comparación del rango de concentraciones medidas en el agua de la mina y las Guías para Efluentes de Minería de la CFI/Banco Mundial

Analito	Unidades	Composición química del agua de la mina	Guías de la CFI
Alcalinidad	mg/L de CaCO ₃	3.6 – 250	
pH	Su	5.2 – 8.7	6 - 9
Sulfato (SO ₄)	mg/L	0.8 – 349	
Fluoruro (F)	mg/L	< 0.05 - 0.33	
Cloruro (Cl)	mg/L	0.12 - 2.1	
Aluminio (Al)	mg/L	<0.01 -0.19	
Arsénico (As)	mg/L	<0.002 - 0.130	0.1
Calcio (Ca)	mg/L	0.7 – 120	
Cadmio (Cd)	mg/L	<0.007 - 0.020	0.05
Cobalto (Co)	mg/L	<0.001 - 0.002	
Cobre (Cu)	mg/L	0.004 - 0.010	0.3
Total de hierro (Fe)	mg/L	<0.01 – 0.3	2.0
Magnesio (Mg)	mg/L	<0.1 – 37	
Manganeso	mg/L	<0.003 - 0.860	

⁶ Se desconoce la base a partir de la cual se afirma que 85% de los residuos carecen de PGA. Se reporta que un valor de Descarga Ácida de Roca (ARD) se encuentra en un modelo de la reserva de minerales, éste podría constituir la fuente del cálculo, pero el uso y la base de dicho valor no se explica en la EEP (MMTS, 2014, p. 127)

(manganeso)			
Níquel (Ni)	mg/L	0.006 - 0.100	0.5
Plomo (Pb)	mg/L	<0.005 - 0.0048	0.2
Zinc (Zn) ⁷	mg/L	<0.002 – 0.011	0.5

4.2.2 Anomalías del suelo

MMTS (2014, p. 35 - 35) La mineralización reportada de oro y plata se asoció con concentraciones elevadas de arsénico, mercurio, antimonio, cobre y plomo en muestras de roca así como mercurio y antimonio en las muestras del suelo en el depósito de Ixtaca y cerca del mismo. Estas anomalías se presentan de forma natural (no son artificiales) y las muestras de agua para establecer una línea basal de los arroyos no demuestran que dichos elementos se encuentren en concentraciones elevadas en los ríos. No obstante, las concentraciones elevadas de metales pesados en los suelos y en las rocas por encima del yacimiento mineral de Ixtaca sugieren que estos elementos también se encontrarán en concentraciones elevadas en los residuos de roca extraídos y almacenados en la IAR y que podrían lixiviarse durante la erosión del residuo de roca.

4.3 Temas de interés medioambiental específicos para el sitio del proyecto

Un análisis de la EEP identificó varios temas de interés que pudieran tener un efecto en la composición química del agua residual del sitio:

- RSF - El potencial de DAR/LM del residuo de roca es desconocido. Se reporta que 66% del residuo de roca del proyecto es de origen volcánico y con la presencia de pirita diseminada y carbonato sólo de veta (Sección 2.3.1) la roca podría tener PGA. El resto del residuo de roca (34%) estaría compuesto de piedra caliza (sin PGA) y de esquisto con un potencial desconocido de DAR. Dado que solamente los residuos carentes de PGA se utilizarían para los diques de las IMJ y para el cierre de las mismas (MMTS 2016, p. 143), secuestrar el residuo carente de PGA en el dique de la IMJ y en la cubierta de la misma podría reducir el potencial general de neutralización de ácido de la IAR.⁸
- Pila de almacenamiento - La pila de almacenamiento de baja ley en la EEP carecería de recubrimiento y se ubicaría al sur del tajío abierto y de la planta de beneficio (MMTS 2016, p. 125). Aunque el texto refiere específicamente a una “pila de almacenamiento temporal” para abastecer la planta de beneficio durante los primeros años de vida de la

⁷ Dos análisis de zinc reportaron 1.5 y 2.1 mg/L (dos órdenes de magnitud por encima de las siguientes concentraciones más altas). Estos dos análisis se consideraron atípicos y se excluyeron de los rangos mostrados en la Tabla 4.3.

⁸ Dos análisis de zinc reportaron 1.5 y 2.1 mg/L (dos órdenes de magnitud por encima de las siguientes concentraciones más altas). Estos dos análisis se consideraron atípicos y se excluyeron de los rangos mostrados en la Tabla 4.1.

mina, el plan de la misma predice que más de 8 millones de toneladas de mineral de baja y mediana ley se encontrarán en la pila al final de la vida de la mina. En la EEP no se mencionan métodos para controlar el potencial de DAR/LM del mineral en la pila durante las operaciones o después del cierre, en caso de que se suspendiera o cesara completamente la explotación antes del final previsto para la vida de la mina.

- IMJ - La mina actual asume la co-disposición tanto de los jales como del concentrado en la IMJ parcialmente recubierta. La colocación incorrecta del concentrado en la instalación podría llevar a zonas activas de DAR/LM que podrían liberar filtraciones ácidas y ricas en metales a la superficie o al manto freático.
- Lago del tajo - dependiendo de la elevación del suelo final del tajo y la elevación de la capa freática antes de la extracción, el tajo podría llenarse con agua para formar un lago o también podría permanecer seco. El agua subterránea, la escorrentía de los muros del tajo y el residuo de roca empleado para volver a llenar el tajo podrían ser fuentes posibles de DAR o de drenaje alcalino así como de metales lixiviables al agua que llena el lago.

5.0 Recomendaciones

La EEP emplea un plan simplificado de la mina para calcular la rentabilidad de la operación minera a partir de un conjunto de supuestos (por ejemplo, costos de extracción y de procesamiento, precios del metal, etc.) y no tiene el fin de que se le use para evaluar los impactos ambientales del Proyecto. La siguiente fase del diseño de la mina debe elaborarse con base en el manejo del residuo de roca, de los jales y del concentrado que presenten PGA. Es necesario que se prepare un plan más detallado para la mina que considere un diseño para el cierre. Dada la incertidumbre del potencial real de DAR/LM del residuo de roca, del mineral, de los jales y del concentrado, el plan tiene que incorporar medidas tales como la inmersión o el encapsulamiento de materiales con PGA. Estos tipos de medidas pueden evitar el inicio de la generación de DAR/LM, o neutralizar la DAR/LM antes de la descarga.

El plan de cierre únicamente especifica los requisitos mexicanos para el cierre de la IMJ, donde no se requiere ninguna fianza de recuperación (MMTS 2016, p. 130 - 131) Es necesario que se prepare un plan detallado de recuperación para el proyecto que incluya un presupuesto para este fin.

Las siguientes recomendaciones se proporcionan para lograr una mejor comprensión de los impactos potenciales del proyecto propuesto:

- Dar acceso a los resultados de todas las pruebas geoquímicas, tanto las ya realizadas como las que aún están en progreso, así como las planeadas para investigaciones futuras.

- Realizar un muestreo geoquímico exhaustivo y un programa de pruebas para caracterizar de una mejor manera el potencial de DAR y LM de todas las unidades de residuo de roca, de los tipo de mineral, de los jales y del concentrado. El plan de muestreo debería seguir las directrices aplicadas al NI 43-101 y empleado en la toma de muestras para los cálculos de las reservas minerales. El programa de pruebas geoquímicas debe incluir tanto pruebas estáticas como cinéticas tal como lo describe la Guía GARD (2009) y MEND (2009).
- Preparar un análisis de equilibrio hídrico detallado para todo el sitio, así como para cada instalación en específico. Esto para definir el flujo neto de entrada y salida de agua del sitio y de las instalaciones individuales que se usarán para el modelo geoquímico.
- Preparar un plan detallado de gestión hídrica. El plan preliminar de gestión hídrica de la EEP para el sitio del Proyecto (MMTS 2016, p. 139) sugiere que el sitio tiene un excedente neto de agua y que no es necesaria una fuente separada de agua de reposición. Tiene que existir un plan detallado de gestión hídrica para definir los flujos de agua en todo el sitio para emplearse en la preparación de modelos de equilibrio hídrico y equilibrio de masa.
- Preparar un plan detallado de gestión de residuos para cuantificar los tonelajes y el programa de transporte del residuo de roca a la IAR, la IMJ y la IMJC, así como identificar un mecanismo para distinguir el residuo de roca con y sin PGA para fines de manejo especial y para emplearse en el modelo geoquímico.
- Preparar un modelo geoquímico de equilibrio termodinámico utilizando el equilibrio hídrico y los resultados de las pruebas geoquímicas para brindar un cálculo preliminar de la posible calidad del agua de escorrentía y filtración provenientes de la IAR, IMJ y la pila de almacenamiento, también del agua que pudiera llenar el tajo abierto durante el cierre que se emplearía en el diseño de la instalación y en la preparación de la evaluación de impacto ambiental.
- Preparar un modelo del equilibrio de masa de la calidad del agua empleando los resultados de los modelos geoquímico y de equilibrio hídrico en todo el sitio para brindar un mecanismo para rastrear el flujo de agua y contaminantes en todo el sitio y fuera del sitio aguas abajo hacia las comunidades y demás receptores.

6.0 Resumen

Son necesarias acciones para caracterizar de una mejor manera la geoquímica del residuo de roca, el mineral, los jales y el concentrado para predecir con algo de certeza el impacto geoquímico de la mina propuesta. La revisión de la EEP sugiere que el residuo de roca, el mineral y el residuo del proceso (jales y concentrado) son carentes de PGA debido a la presencia de PN en forma de minerales de carbonatos así como a una capacidad de generación de ácido debido a los minerales sulfurados portadores de hierro, principalmente pirita. No obstante, sin una caracterización geoquímica profunda de los distintos materiales extraídos y procesados, y un plan detallado para la mina es imposible determinar si el agua proveniente de cualquiera de las instalaciones mineras pueda ser ácida, neutral, o alcalina.

Además, los resultados de la EEP sugieren que las rocas mineralizadas contienen minerales sulfatados de contenido metálico y que son fuentes potenciales de plata (Ag), oro (Au), plomo (Pb), zinc (Zn), hierro (Fe), antimonio (Sb), selenio (Se) y azufre (S). Sin pruebas geoquímicas adecuadas para determinar las tasas de lixiviación de los minerales en el residuo de roca, el mineral y los residuos del proceso además de cálculos de los caudales de agua que pasarían a través o sobre la superficie de las instalaciones mineras (IAR, IMJ, tajo abierto y pila de almacenamiento) es imposible predecir la composición química del agua de filtración y escurrimiento.

Además, la planeación detallada de los materiales y de la gestión hídrica durante las operaciones y para el cierre una vez que cese la extracción se tendrá que preparar como parte de la siguiente fase del programa de desarrollo de la mina.

Referencias

Almaden Minerals Ltd.. 2014. Comisión del Mercado de Valores de Estados Unidos (SEC), Formato 20-F del Informe Anual para el Año Terminado el 31 de Diciembre de 2014. Marzo de 2015. 93 pp.

APEX Geoscience Ltd., Giroux Consultants Ltd., y B.C. Mining Research Ltd.. 2013. MTM E-14-B-24 Mexcaltepec, Technical Report on the Tuligtic Project, Puebla State, Mexico (Mexcaltepec, Informe técnico sobre el Proyecto Tuligtic, Estado de Puebla, México) Preparado para Almaden Minerals Ltd. Vancouver, BC. Presentado en marzo de 2013.

British Columbia Ministry of the Environment (Ministerio del Medio Ambiente de la Columbia Británica [BC MOE]). 2014. <http://www.env.gov.bc.ca/eemp/incidents/2014/mount-polley/>. Acceso en octubre de 2015.

Gonzalás, Alejandro. 2015. Especialista en derechos humanos, Proyecto sobre Organización, Desarrollo, Educación e Investigación (PODER). Correo electrónico fechado el 12 de agosto de 2015.

Corporación Financiera Internacional (CFI) Grupo del Banco Mundial, 2007. Guías para Medioambiente, Salud y Seguridad MINING. Diciembre de 2007.

INAP (Red Pnternacional para la Prevención del Ácido). 2009, Global Acid Rock Drainage Guide (Guía Global Sobre Drenaje Ácido de Roca (GARD)). www.gardguide.com. Acceso en agosto de 2015.

MEND. 2009. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Material (Manual para la predicción de la química de desagüe de materiales geológicos sulfurados. MEND Report 1.20.1. Diciembre de 2009.

Moose Mountain Technical Services (MMTS). 2014. NI 43-101 Informe Técnico, Evaluación Económica PReliminar del proyecto Ixtaca, México Preparado para Almaden Minerals Ltd. Presentado en octubre de 2014.

Moose Mountain Technical Services (MMTS). 2016. NI 43-101 Technical Report, Preliminary Economic Assessment of the Ixtaca Project, Puebla State, Mexico (Informe Técnico, Evaluación Económica Preliminar del proyecto Ixtaca, México) Preparado para Almaden Minerals Ltd. Presentado en Enero, 2016.

Morin, K.H. y Hutt, N.M. 2005. Case Studies and Guidelines for Drainage-Chemistry Prediction (Estudios de caso para la predicción de composición química de desagües), 12º Taller anual de la Columbia Británica sobre MEND, DAR/LM, Vancouver, Columbia británica, Canadá. Noviembre de 2005.

Plumlee, G. S. 1999. The Environmental Geology of Mineral Deposits (La geología ambiental de los depósitos minerales) En: Plumlee, G.S. y Logsdon, M.J. (editores), The Environmental Geology of Mineral Deposits, Part A: Processes, Techniques, and Health Issues (La geología ambiental de los depósitos minerales, Parte A: Procesos, técnicas y cuestiones de salud), . Reviews in Economic Geology Vol. 6A, Society of Economic Geologists, Inc.

Plumlee, G.S., Smith, K.S., Montour, M.R., Ficklin, W.H., y Mosier, E.L. 1999. Geologic Controls on the Composition of Natural Waters and Mine Waters Draining Diverse Mineral- Deposit Types (Controles geológicos en la composición de aguas naturales y de aguas de mina que drenan de diversos tipos de depósitos de minerales). En: Plumlee, G.S. y Logsdon, M.J. (editores), The Environmental Geology of Mineral Deposits, Part B: Case Studies and Research Topics (La geología ambiental de los depósitos minerales, Parte B: Estudios de caso y temas de investigación) Reviews in Economic Geology, Volume 6B. Society of Economic Geologists, Inc.

Robertson, A.M. 2011. Top 10 Things that go wrong with Plans for Mine Closure (10 Principales Problemas en los Planes para el Cierre de Minas), 6th International Conference on Mine Closure (6^a Conferencia internacional sobre cierres de mina), Lake Louise, Alberta Canada, September 2011.

Apéndice A - Glosario de términos útiles

Definición (apéndice A, INAP 2009) a menos que se indique lo contrario.
generador(a) de ácido - Se refiere al mineral y los residuos de la mina que contienen azufre o sulfuros que producen ácido cuando se oxidan. El ácido también puede presentarse como sulfatos de ácido o generarse por su erosión, producida originalmente a partir de la oxidación de los sulfuros.
Drenaje ácido de roca (DAR) - Una emisión de líquido de bajo pH con contenido metálico y rico en sulfuros que tiene lugar durante la perturbación de la tierra en la que el azufre o los sulfuros metálicos se exponen a las condiciones del ambiente. Se forma bajo condiciones naturales a partir de la oxidación de minerales sulfuros y donde la acidez supera la alcalinidad. Exposición debida a otras actividades no relacionadas con la minería como cortes para carreteras que pudieran producir descargas similares. También se le conoce como drenaje ácido de mina (DAM) cuando se origina en áreas mineras.
Potencial ácido (PA) - la capacidad de una roca o de un material geológico de producir lixiviados ácidos; se le puede denominar también como potencial de generación de ácido PGA .
Alteración - Un cambio producido en la roca debido a acciones químicas o físicas.
Anión - un ion con carga negativa.
Modelo de bloques - Un modelo de un depósito mineral generado a partir de la interpolación de valores de pruebas realizadas en orificios distribuidos irregularmente hacia una cuadrícula bi o tridimensional.
Catión - Ion con carga positiva.
Punto de descarga - Ubicación en la que los residuos del procesamiento de minerales se bombean hacia una cuenca o embalse.

Efluente - Un material, generalmente un residuo líquido, emitido por una fuente que con frecuencia es industrial, tal como un proceso metalúrgico o de tratamiento de agua. Los efluentes gaseosos generalmente se denominan emisiones .
evaluación de impacto ambiental - Un proceso requerido bajo la legislación ambiental nacional o regional en la que se analizan los posibles impactos ambientales, físicos y sociales, además de identificar, evaluar y analizar medidas de mitigación. Una disposición para notificar a los ciudadanos y considerar sus comentarios normalmente es parte integral del proceso.
Depósitos epitermales - Un depósito mineral que consiste de vetas y cuerpos de reemplazo que normalmente tiene lugar en rocas volcánicas o sedimentarias, contiene metales preciosos y en ocasiones metales comunes, aunque rara vez. Normalmente formada a profundidades someras. Por ejemplo, a aproximadamente 1km de la superficie de la tierra en un rango de temperatura de entre 50 a 200 °C que normalmente produce una estructura característica similar a las vetas.
Extracción - el proceso de explotar y retirar el mineral de una mina. Este término es de uso frecuente en relación a todos los procesos de obtención de metales a partir de minerales e involucra desintegrar el mineral tanto mecánicamente (trituración) como químicamente (descomposición) y separar el metal de la ganga a la que pueda estar unido.
Ganga - En un mineral, los componentes sin valor, la parte del mineral que no es deseable económicamente pero que no puede evitarse al explotar el yacimiento. Se separa del mineral durante el beneficio.
Agua subterránea - Agua en la zona debajo de la superficie de la tierra. Esto es lo opuesto al agua superficial.
Infiltración - El ingreso descendente de agua hacia el suelo u otro material geológico.
Piedra caliza - Una roca sedimentaria que consiste en gran medida de calcita (CaCO ₃).
Lixiviación - Remoción mediante disolución, desorción u otra reacción química a partir de una matriz sólida mediante el paso de líquidos a través del material.
Molido - La trituración y molienda del mineral. El término puede incluir la remoción de componentes dañinos o componentes sin valor económico del mineral y la preparación para procesamiento adicional o venta al mercado.
Mina - Una abertura o excavación en la tierra con el fin de extraer minerales.
Depósito mineral - La presencia de cualquier materia prima o mineral valioso de un tamaño y calidad (concentración) suficiente para tener potencial para su desarrollo económico bajo condiciones favorables
Minería - El proceso de extraer minerales útiles de la corteza terrestre.
Mitigación - Corrección del daño causado por la actividad minera (por ejemplo, hundimiento de la mina, impactos a humedales, drenaje ácido).
Monitoreo - La vigilancia periódica o continua o la realización de pruebas para determinar el nivel de conformidad con los procesos o requisitos legales en diversos medios o en los humanos, plantas y animales.
Drenaje neutral de mina - Una emisión de líquido de pH neutro con contenido metálico y rico en sulfatos que tiene lugar durante la perturbación de la tierra en la que el azufre o los sulfuros metálicos se exponen a las condiciones del ambiente. Se forma bajo condiciones naturales a partir de la oxidación de minerales sulfuros y donde la alcalinidad es igual o superior a la acidez.

Potencial de neutralización (PM) - La cantidad de material alcalino o básico en la roca o en los materiales del suelo que se calcula por reacción ácida seguida por titulación para determinar la capacidad de neutralizar el ácido a partir de la acidez intercambiable o la oxidación de la pirita. También se le puede llamar potencial de neutralización de ácido o PNA.
Mineral - el material natural del que se pueden extraer elementos con valor económico de manera rentable o para satisfacer objetivos sociales o políticos. En general, aunque no siempre, se utiliza el término para hacer alusión a un material metálico y con frecuencia se le modifica con los nombres de los componentes metálicos valiosos.
Depósito de mineral - Depósito al que se han realizado pruebas donde se ha encontrado que tiene el tamaño, la calidad y la accesibilidad para que se le extraiga de manera rentable en un momento específico con base en supuestos económicos.
Sobrecarga - material de cualquier naturaleza, consolidado o no consolidado que se sitúa sobre un depósito de materiales, o minerales, útiles y explotables, en especial aquellos depósitos que se extraen de la superficie a cielo abierto.
Oxidación - Un proceso químico que involucra una reacción o reacciones que producen un aumento en el estado de oxidación de elementos tales como el hierro y el azufre.
pH - una medida de la acidez (pH menos de 7) o de la alcalinidad (pH mayor a 7) de una solución; un pH de 7 se considera neutro. Es una medición de la concentración de iones de hidrógeno (más específicamente, el logaritmo negativo de la actividad de iones de hidrógeno para electrodos de vidrio) de una solución o suspensión de la tierra.
Lago del tajo - Cualquier cuerpo perenne o efímero de agua que ocupa una excavación en la superficie de la tierra creada por la extracción de material mineral.
Producción - La cantidad total de masa producida por una planta, mina, manto acuífero y demás.
Recuperación - Rehabilitación o retorno de la tierra perturbada para fines productivos, incluye todas las actividades de movimiento de tierra, nivelación y siembra, así como el retorno a una productividad igual o superior a la existente antes de la perturbación.
Redox - Modo abreviado para referirse a la reducción-oxidación. Describe todas las reacciones químicas en las cuales cambian los números de oxidación de los átomos (estado de oxidación), por lo común mediante la transferencia de electrones.
Evaluación de riesgos - Una evaluación cuantitativa y/o cualitativa del riesgo para la salud humana y/o el ambiente por la presencia potencial o real de contaminantes específicos y/o su uso. Las evaluaciones de riesgo se realizan por diversas razones, incluyendo para determinar si existe un riesgo ecológico, para identificar la necesidad de obtener información adicional, concentrarse en los peligros de un contaminante específico o los riesgos existentes para un sitio específico y para ayudar al desarrollo de planes de contingencia y otras respuestas a las emisiones de contaminantes.
Escorrentía (saliente o entrante) 1,2- La parte de la precipitación, deshielo o agua de riego que aparece en arroyos superficiales, ríos, desagües o alcantarillas no controlados (no regulados por una presa aguas arriba). La escorrentía se puede clasificar en escorrentía directa y de base, de acuerdo con la velocidad de su aparición después de la precipitación o por la fusión de la nieve, y como escorrentía superficial, pluvial o subterránea de acuerdo a su fuente. La escorrentía de salida es la porción del flujo terrestre que sale de un sitio. La escorrentía de entrada es la porción del flujo terrestre que llega a un sitio receptor.
Muestra - porción representativa de una población.

Filtración - normalmente se utiliza en ciencias ambientales para definir una zona de exfiltración donde el agua contaminada, por ejemplo, de vertederos de residuos sale del área de un sistema de residuos.
Pizarra - Una roca sedimentaria en lajas finas o una roca sedimentaria fósil formada de arcilla o limo.
Pala - Máquina usada para excavar mineral u otros materiales y para cargar dichos minerales para su transportación. El cubo se carga desde arriba y el fondo se abre para vaciar los contenidos.
skarn - Skarn es una roca metamórfica formada durante el metamorfismo y en la zona del contacto de las intrusiones magmáticas como granitos con rocas ricas en carbonato tales como la caliza o la dolomita.
Pendiente - El grado en el que el ángulo del suelo se desvía del plano horizontal, se expresa como un porcentaje de elevación o como un ángulo en grados.
Lodo - cualquier mezcla de sólidos y fluidos que se comporte como un líquido y que se pueda transportar hidráulicamente (por ejemplo, por tubería). Vea también jales .
Sorción - Se refiere a las acciones tanto de absorción como adsorción que tienen lugar de manera simultánea. Como tal, es el efecto de gases o líquidos que se incorporan a un material de un estado distinto y que se adhieren a la superficie de otra molécula. La absorción es la incorporación de una sustancia en un estado a otra en un estado distinto (por ejemplo, cuando un sólido absorbe líquido o cuando un líquido absorbe gases). La adsorción es la adherencia o unión física de iones y moléculas a la superficie de otra molécula.
Agua superficial - Agua en la superficie de la tierra o cerca de ella, tal como lagos y arroyos, lo contrario al agua subterránea.
Jales - El producto sólido residual (ganga y otros materiales) que se genera a partir de la molienda y el proceso de concentración del mineral (lavado, concentración y/o tratamiento) que se aplica al mineral molido. Este término generalmente se utiliza para el desperdicio similar a la arcilla que se considera demasiado bajo en valor mineral como para someterlo a tratamientos posteriores a diferencia de los concentrados que contienen metales valiosos.
Presa de jales - Ver embalse de jales .
Embalse de jales - Cualquier estructura diseñada y construida con el fin de capturar y retener los lodos líquidos-sólidos de jales de mina en donde se asientan los sólidos. El líquido puede ser o no liberado o capturado para reciclaje después de que los sólidos se han asentado saliendo del estado de suspensión. <i>Estanque de jales</i> y <i>presa de jales</i> se utilizan con frecuencia de modo intercambiable con los términos <i>embalse de jales</i> o <i>instalaciones de almacenamiento de jales</i> .
Residuo de roca - Roca estéril o mineralizada que se ha extraído pero cuyo valor es insuficiente para justificar que se le procese, y por tanto se elimina antes de los procesos metalúrgicos y se dispone del mismo en el sitio. El término normalmente se emplea para los residuos que son de tamaño menor a la arena y que puede ser del tamaño de rocas grandes, también se le refiere como vertedero de residuo de roca, pila de roca o instalación de almacenamiento de roca.
Estándares de calidad del agua - Normas ambientales para cuerpos de agua. Los estándares prescriben el uso del cuerpo de agua y establecen los criterios de calidad del agua que deben cumplirse para proteger los usos designados.
Erosión - Proceso en el que los materiales terrosos o rocosos cambian de color, textura, composición o forma (con muy poco o ningún movimiento) debido a la exposición a los agentes atmosféricos.
Laboreos - La totalidad del sistema de aperturas (subterráneas y en la superficie) en una mina.

A₁ <http://water.usgs.gov/edu/runoff.html>

A₂ Informe de expediente abierto 97-865 Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS),
pubs.usgs.gov/of/1997/0865/report.pdf

A₃ https://en.wikipedia.org/wiki/Seep_%28hydrology%29

Apéndice B - Geoquímica de la roca ácida

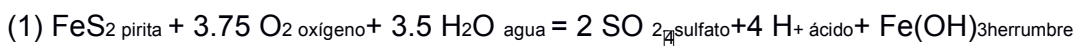
Drenaje/Lixiviación de metales (DAR/LM)

El Drenaje ácido de la mina (DAM) y la lixiviación de metales son preocupaciones medioambientales comunes. Se produce por reacciones redox cuando las rocas "frescas" o con contenido de sulfuros se exponen a la atmósfera debido a actividades de construcción o minería. Esta sección constituye una breve exposición de el origen y los controles sobre DAR/LM. Para una discusión más detallada, favor de consultar estos dos documentos útiles como guía: *Global Acid Rock Drainage (GARD) Guide (Guía Global sobre Drenaje Ácido de Roca)* (INAP 2009); y *Prediction Manual for Drainage Chemistry of Sulphidic Geologic Materials (Manual Predictivo para la Química del Drenaje de Materiales Geológicos Sulfurados)*.

2.1 Fuentes de la acidez

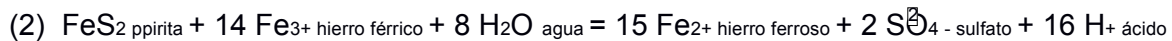
Los minerales sulfurados portadores de hierro como la pirita (FeS_2) son las principales fuentes naturales de acidez liberada de la roca al medio ambiente. Trazas de pirita son comunes en muchos tipos distintos de roca pero puede alcanzar porcentajes mayores en las rocas mineralizadas encontrados en los depósitos minerales. La erosión natural de las rocas comienza cuando el oxígeno (O_2) de la atmósfera y el agua pluvial reaccionan con la roca subyacente.

La erosión de la pirita puede describirse mediante las siguientes reacciones químicas (Plumlee 1999, Tabla 3.2). Oxidación de pirita producida por oxígeno (Reacción 1) produce la oxidación de azufre en forma de sulfuro (S_2^-) a azufre en forma de sulfato (SO_4) encontrado en el ácido sulfúrico (H_2SO_4) y la liberación de hierro reducido (Fe). Posteriormente el hierro se oxida hasta tomar la forma de hierro férrico (Fe^{3+}) formando herrumbre ($\text{Fe}(\text{OH})_3$), un residuo común encontrado en sitios de minas abandonadas.



Conforme el pH⁹ baja con la producción de ácido, las bacterias que metabolizan el hierro (*Thiobacillus ferroxidans*) rápidamente convierten el hierro ferroso (Fe^{2+}) a hierro férrico (Fe^{3+})

un oxidante muy fuerte (Reacción 2). La oxidación de la pirita continua con el hierro férrico (Fe^{3+}) como agente oxidante pero a un ritmo mayor. Aquí, los valores de pH para las reacciones 1 y 2 van de casi neutral a pH 3 para la reacción 1 y pH 3 a menos de pH 2.5 para la reacción 2 (INAP, 2009, Figura 2-10).



2.2 Fuentes de metales lixiviables (ML)

Otros minerales sulfurados de los que comúnmente se hallan trazas en diferentes rocas como la calcopirita (CuFeS_2), la galena (PbS) y la esfalerita (ZnS) son fuentes potenciales de metales solubles. Cuando las concentraciones de estos materiales en la roca son lo suficientemente altas, se vuelve económicamente viable extraer estos minerales como mineral de cobre, plomo y zinc, respectivamente.

Como con la pirita, solamente cuando la roca fresca no erosionada se expone a la atmósfera durante la construcción es que la LM se vuelve una preocupación ambiental.

Natural

Las reacciones de la erosión de los minerales con sulfuros se controlan por la oxidación de los minerales sulfurados mediante la reacción con el oxígeno y el agua de la atmósfera y por reacción con el ácido generado por la oxidación de la pirita.

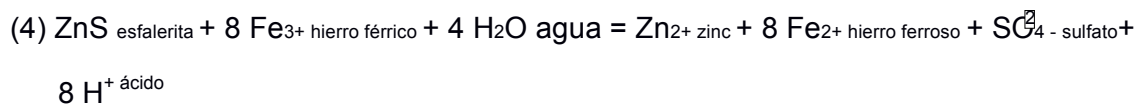
La oxidación de metales comunes con contenido de sulfuros se puede describir mediante la siguiente reacción (Plumlee 1999, Tabla 3.2). Utilizando esfalerita mineral (ZnS) como ejemplo, la Reacción 3 muestra que la reacción con el oxígeno produce la oxidación de azufre reducido (S^{-2}) al sulfato oxidado

⁹ el pH es una medida de la acidez de una solución y se define como el logaritmo negativo de la concentración de iones de hidrógeno ($\text{pH} = -\log_{10}[\text{H}^+]$). Los valores de pH van de 1 a 14 donde 1 es muy ácido y 14 muy alcalino. El agua pura es neutral (ni ácida ni alcalina) con un valor de pH de 7. El agua en contacto con el cemento es alcalina con un valor de pH de 12 a 13; el ácido de batería tiene un valor de pH de 1.

(SO₄) y la liberación de iones de zinc (Zn).



La reacción 4 sugiere que tal con la oxidación de la pirita, a valores más bajos de pH, (debajo de 3), el hierro férrico (Fe³⁺) puede actuar como el agente oxidante para promover la oxidación de minerales sulfurados con contenido metálico y la generación de ácido.



2.3 Fuentes de la neutralización ácida

Ya que hay minerales que pueden liberar ácido debido al drenaje ácido de roca (DAR) con la erosión, también hay materiales naturales tales como la calcita (CaCO₃), dolomita [Mg,Ca](CO₃)₂, y magnesita (MgCO₃) que neutralizan el ácido (potencial de neutralización de ácido - NP). Dependiendo del equilibrio de DAR y PN, un exceso de PN puede generar un drenaje alcalino de mina llamado drenaje neutral de mina o drenaje salino de mina (DNM/DSM) (INAP 2009, Figura 2.3).

Estos minerales que neutralizan ácidos normalmente se presentan:

- Como el componente principal de rocas sedimentarias químicas tales como piedra caliza (100% CaCO₃), o dolomita (100% [(Mg, Ca) (CO₃)₂]);
- Como cementos que unen vetas individuales en rocas clásticas sedimentarias tales como arenisca y pizarras; y
- En vetas que llenan fracturas en rocas preexistentes.

Las reacciones de neutralización de ácido se pueden describir mediante las siguientes reacciones químicas (Plumlee 1999, p. 74). La calcita reacciona con mucha rapidez y frecuentemente con violencia a los iones de calcio que liberan ácido (Ca²⁺) y alcalinidad (HCO₃⁻) al entrar en contacto con agua (Reacción 5). Los valores de pH para el agua en contacto con la piedra caliza variarían dependiendo de las concentraciones dióxido de carbono disuelto (CO₂) pero normalmente serían mayores a 7.



alcalinidad

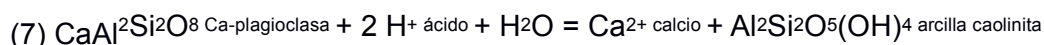
del

bicarbonato

Además, como se muestra en la Reacción 6, el carbonato disuelto en el agua puede capturar iones metálicos de la solución para formar minerales secundarios como la smithsonita mineral, un mineral de carbonato de zinc. (6) $Zn^{2+} CO_3^{2-} \text{ carbonato} = ZnCO_3 \text{ smithsonita}$

Las reacciones 5 y 6 sugieren que los minerales de carbonato pueden neutralizar los ácidos en el agua, convertir el agua ácida a agua alcalina y pueden retirar los metales disueltos en el agua mediante la formación de minerales secundarios.

Otros minerales primarios y secundarios que consumen ácidos tienen el potencial de neutralizar o amortiguar ¹⁰ la acidez del agua, pero a una tasa menor que los minerales de carbonato. Los minerales gibbsita ($Al(OH)_3$), ferrihidrita ($Fe(OH)_3$) y un rango de minerales de silicatos de aluminio (por ejemplo $CaAl_2Si_2O_8$) puede amortiguar el pH del agua alcalina de contacto a valores cercanos a 4.5, 3.2 y 2.2 respectivamente (INAP, 2009, Figura 2-10). La Reacción 7 es la reacción en la que el mineral de silicato de aluminio, Ca-plagioclasa ($CaAl_2Si_2O_8$), reacciona para consumir un ácido y producir un segundo mineral de arcilla, la caolinita ($Al_2Si_2O_5(OH)_4$) (Plumlee 1999, p. 62).



Los minerales como el óxido de ferrihidrita y el óxido de manganeso también pueden absorber metales a valores neutrales de pH, retirando los metales de la solución.

¹⁰ Un amortiguador es una mezcla de un ácido y de la base conjugada que cuando están presentes al mismo tiempo regulan el pH de la solución.