

ANEXO I

MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA



ÍNDICE

	PÁGINA
RESUMEN EJECUTIVO.....	III
I. MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA.....	1
I.1 Antecedentes y Objetivos.....	1
I.2 Aproximación a la predicción.....	3
I.3 Definición de los componentes.....	4
I.4 Geología de la Roca de Mineral	6
I.5 Caracterización Geoquímica	9
I.5.1 Roca de Mineral.....	9
I.5.2 Relaves.....	11
I.6 Química de la Solución de la Concentradora.....	13
I.6.1 Ensayos Metalúrgicos.....	15
I.6.2 Datos para el Modelamiento de la Calidad de Agua	17
I.6.3 Tratamiento de Agua	18
I.7 Cálculos de Carga de la Roca de Desmonte.....	19
I.7.1 Plan de Mina.....	19
I.7.2 Cálculos.....	20
I.8 Balance de Agua y Balance de Carga.....	23
I.8.1 Generalidades	23
I.8.2 Estructura del Modelo	26
I.8.3 Uso de Predicciones	28
I.8.4 Efectos Ambientales y Lineamientos	29
I.9 Predicción de la Calidad del Agua.....	30
I.9.1 Pre-minado	30
I.9.2 Química del Agua de los Efluentes de Relaves.....	31
I.9.3 Año 5	34
I.9.4 Año 10	36
I.9.5 Año 24	37
I.9.6 Post-cierre	38

TABLAS

Tabla I-1	Índices de Producción en las Celdas de Humedad.....	10
Tabla I-2	Agua de los relaves	17
Tabla I-3	Química del agua de los concentrados	18
Tabla I-5	Composición del Botadero para los Años 5, 10 y 15 (fin de la mina)	20
Tabla I-5	Influjo de la Poza de Relaves y Flujo de Decantación – Año Promedio Operacional	27
Tabla I-6	Química del Agua de Línea Base	31
Tabla I-7	Calidad del Agua de Efluentes Típica Mensual Predicha durante la Operación	32
Tabla I-8	Química del Agua Receptora Modelada en el Año 5.....	35
Tabla I-9	Química del Agua Receptora Modelada para el Año 10.....	37
Tabla I-10	Química del Agua Receptora Modelada para el Año 24.....	37
Tabla I-11	Química del Agua Receptora Predicha para Después del Cierre.....	39

FIGURAS

Figura I-1	Evaluación de la Calidad del Agua.....	5
Figura I-2	Resultados del Balance Ácido de Base en la Prueba Metalúrgica	11
Figura I-3	Cargas Relativas de los Botaderos para el Cobre Disuelto.....	23
Figura I-4	Cargas Relativas en los Botaderos para el Zinc Disuelto.....	23
Figura I-5	Influjo Neto de la Poza de Relaves	28

Resumen Ejecutivo

La mina Antamina propuesta es una operación minera a tajo abierto que producirá principalmente concentrados de flotación de cobre y zinc. Se calcula que durante los 24 años de vida productiva de la mina se extraerá aproximadamente 500 millones de toneladas de mineral y 1.4 mil millones de toneladas de roca de desmonte. La mayor parte de la roca de desmonte es caliza, la cual se colocará en tres áreas principales de almacenamiento de roca de desmonte. La roca de desmonte potencialmente reactiva se colocará en el Botadero Este, que se encontrará en la zona de captación de relaves, lugar donde se puede coleccionar la escorrentía para su monitoreo y tratamiento. Los relaves se almacenarán en un depósito de relaves diseñado que almacenará tanto relaves como agua durante la operación minera. Al momento del cierre, el depósito de relaves se mantendrá con una cubierta de agua para controlar la oxidación a largo plazo y la lixiviación de metales.

En este informe, se describe la predicción de la calidad de agua en la mina Antamina que pudiera resultar del desarrollo, operación y cierre de la mina. Para tal efecto, se utiliza un modelo de carga de masa y de balance de agua. Estas predicciones ya se han presentado anteriormente en el Anexo M-IV del Estudio de Impacto Ambiental de Antamina (Klohn Crippen – SVS, 1998) y se revisan en el presente informe para reflejar los cambios en el plan de mina y los datos adicionales colectados en 1998.

Los ensayos de laboratorio, el modelamiento y la evaluación ambiental mostraron que los parámetros clave que se tienen que considerar para Antamina son el cobre, el zinc y el molibdeno, pues reflejan los ambientes geológico y receptor. Se han utilizado los ensayos ambientales para desarrollar criterios específicos para el cobre y el zinc, a fin de asegurar la protección de las especies acuáticas. Los ensayos metalúrgicos mostraron que las concentraciones de metales disueltos y totales en el agua de proceso de los relaves son muy bajas, de hecho menores de las que se pueden lograr en una planta de tratamiento de cal. A la fecha, los ensayos actualizados muestran que las unidades litológicas de intrusivos y skarn son potencialmente reactivas, es decir, puede generar metales disueltos y acidez. Se ha desarrollado un plan de manejo para identificar la roca reactiva y el control de drenaje.

Como resultado de una aproximación iterativa al modelamiento de la calidad del agua, la evaluación del impacto y el diseño/manejo ambiental, se ha obtenido las predicciones de la calidad de los efluentes y del agua receptora durante todo el período que dure la actividad minera y después del cierre. Esto se ha logrado con el diseño y la implementación de planes de manejo de rocas de desmonte, relaves y agua (incluyendo tratamiento de agua) después de las operaciones y el cierre de la mina.

I. MODELAMIENTO DE CALIDAD DE AGUA

I.1 Antecedentes y Objetivos

La mina Antamina propuesta es una operación minera a tajo abierto que producirá principalmente concentrados de flotación de cobre y zinc. Se calcula que durante los 24 años de vida productiva de la mina se extraerá aproximadamente 500 millones de toneladas de mineral y 1.4 billones de toneladas de roca de desmonte.

La roca de desmonte se colocará en tres principales áreas de almacenamiento: el Botadero Tucush, el Botadero Sur y el Botadero Este. La mayor parte de la roca de desmonte consiste en caliza, que es un elemento considerado consumidor de ácido mas no así una fuente de metales lixiviables. La roca de desmonte potencialmente reactiva se colocará en el Botadero Este, donde se colectará la esorrentía para su posterior monitoreo y tratamiento. Al momento del cierre, la esorrentía de la roca de desmonte reactiva que tenga la posibilidad de oxidarse y liberar así acidez o metales disueltos será tratada según sea necesario, para cumplir con los criterios de calidad de agua receptora.

Durante la vida productiva de la mina, se utilizarán pilas de almacenamiento de mineral de baja ley, las cuales se ubicarán al este del Botadero Sur, en una zona donde se colectaría el drenaje. El material almacenado en estas pilas sería luego enviado al molino en los años posteriores a la vida productiva de la mina. Al momento del cierre, todo el material residual almacenado se colocará en el tajo a manera de relleno.

Los relaves se almacenarán en una instalación de almacenamiento de relaves diseñada, que almacenará tanto relaves como agua durante las operaciones mineras. Al cierre, el depósito de relaves se mantendrá con una cubierta de agua para controlar la oxidación y la lixiviación de metales a largo plazo.

Para evaluar los posibles impactos que pudieran darse a raíz de la explotación minera, se desarrolló un modelo de balance de aguas y de carga de masa para predecir la calidad de agua en el asiento minero y en el ambiente receptor. Se utilizaron datos de ensayos en campo y en laboratorio para predecir la química del agua de las operaciones mineras. Luego, se superpuso la química del agua predicha para los diferentes componentes de la mina sobre la química del agua de línea base (es decir, la química Watermark Consulting Inc.

del agua actual y anterior a las operaciones mineras) para estimar los cambios que pudieran presentarse en los flujos, concentraciones de los diferentes parámetros y por último el impacto que estos cambios han producido en el ambiente receptor.

El objetivo de este trabajo es brindar una base técnica para la predicción de la posible calidad del agua en la mina Antamina que pueda darse como resultado del desarrollo, operaciones y cierre de la mina. La predicción de la calidad de agua se basa en una combinación de ensayos en laboratorio y de planeamiento de manejo de desechos y de la mina. En consecuencia, los objetivos específicos son tener una información suficiente para evaluar:

- ☒ los posibles problemas relacionados con la calidad del agua
- ☒ la sensibilidad de las predicciones
- ☒ la sensibilidad del ambiente receptor
- ☒ los planes de manejo de aguas y de desechos, incluyendo las posibles medidas de mitigación
- ☒ impacto ambiental

En las siguientes secciones, se describen los métodos utilizados para realizar estas predicciones y los resultados de las mismas.

Este informe se basa en el informe de modelamiento de calidad de agua preparado para el EIA de Antamina y que se aprecia en el Anexo M-IV del Estudio de Impacto Ambiental (Klohn Crippen -SVS, 1998). Este informe se ha revisado a fin de que se reflejen los cambios en el plan de mina y los datos adicionales colectados en 1998. Los principales cambios de diseño en el plan de mina y estos datos son:

toda la roca de desmonte reactiva ahora se va a colocar en el Botadero Este

ahora la planta concentradora se encuentra en la zona de captación de relaves

ya no habrá Botadero Norte y el Botadero Tucush (caliza) se desarrollará en la captación de Tucush

no se requiere un tratamiento perpetuo del Botadero Sur, pues es un botadero de caliza

se seguirá tomando provisiones para tratamiento dentro de la planta concentradora durante la operación y después del cierre del sistema de relaves

La base de datos de química del agua de línea base utilizada para la caracterización de la calidad de agua pre-minado para esta evaluación se ha visto expandida con la inclusión de datos de campo colectados desde noviembre de 1997 a noviembre de 1998. Estos datos adicionales han reducido las concentraciones anteriores aparentemente elevadas en algunas estaciones que tenían datos limitados, por lo que se ha reducido las concentraciones predichas en el agua receptora en las entradas modeladas de la mina. Esto es particularmente evidente para el plomo.

I.2 Aproximación a la predicción

La predicción de la calidad de agua en una mina propuesta se basa en la combinación de ensayos de laboratorio y de la extrapolación de esta información a las condiciones de campo. Se sabe que estas predicciones intentan cuantificar tanto los complejos procesos naturales que controlan el intemperismo y la geoquímica de la roca, como las futuras operaciones mineras.

De esta manera, la aproximación a una predicción se basa tanto en los programas de ensayo técnicos y detallados que utilizan lo último en tecnología, como en la experiencia y el juicio de riesgo y sus consecuencias. Además, en todas las etapas de predicción, se han utilizado supuestos conservadores, se ha evaluado la sensibilidad de cada supuesto y se han desarrollado contingencias y estrategias de mitigación.

Los programas de ensayos de laboratorio brindan la información básica referente a las características geoquímicas de la roca de mina y los relaves. Luego, estos datos se combinan con el plan de manejo de desechos para predecir la química del agua en campo de cada uno de los componentes mineros (es decir, depósito de relaves, botaderos de desmonte, etc.). El resultado de esta combinación define las posibles cargas y concentraciones que se pudieran encontrar en cada componente.

Watermark Consulting Inc.

Posteriormente, los resultados de estas cargas se incorporan al balance total del agua del lugar para predecir la calidad del agua en el ambiente receptor.

Durante todo este proceso de predicción y evaluación de impacto, existen algunas reiteraciones donde se revisa el balance de agua o el plan de manejo de desechos, si es que la evaluación de impacto muestra que existen impactos adversos inaceptables. En consecuencia, los planes de manejo de agua y de desechos pueden desarrollarse para operar la mina de una manera ambiental y técnicamente responsable.

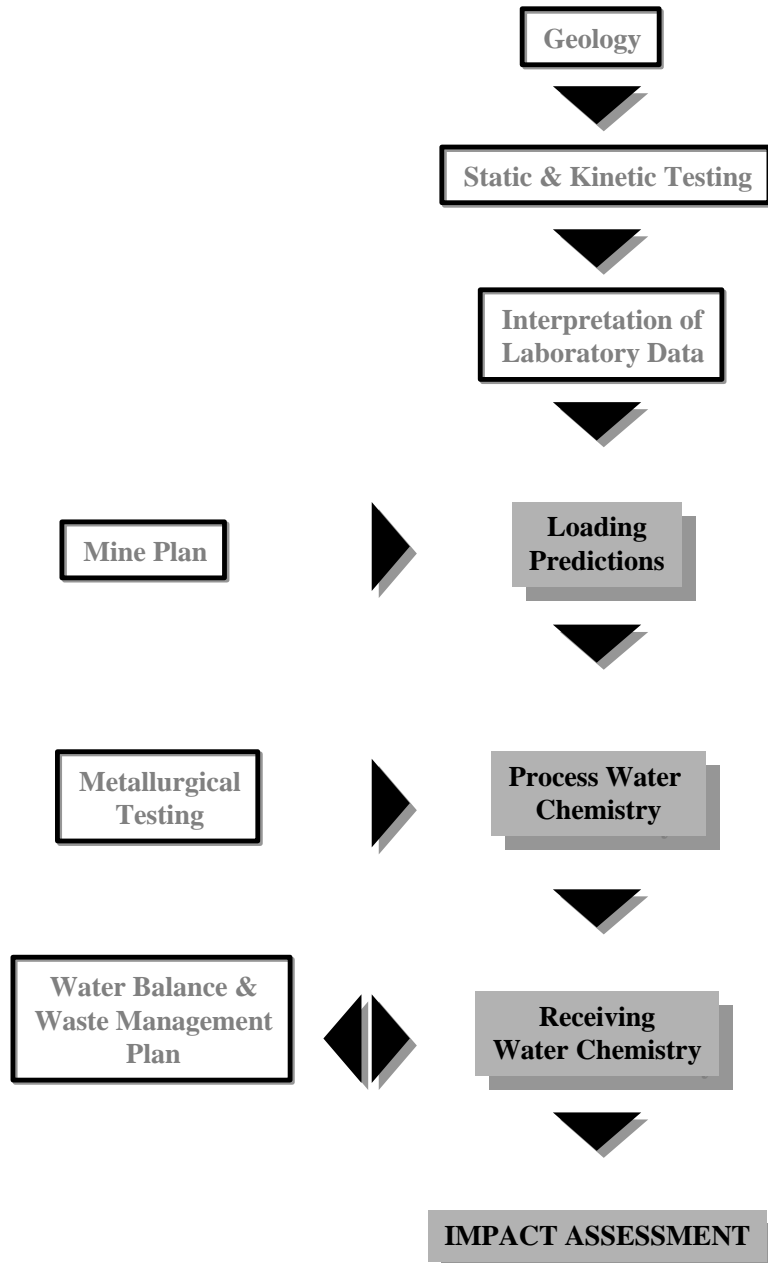
En la Figura I-1, se muestra esquemáticamente toda esta aproximación a la evaluación. En las siguientes subsecciones, se verá lo referente a la adquisición de datos de cada elemento que se encuentra en los casilleros de esta figura y de los cálculos de los elementos que se encuentran encerrados en un círculo en la figura.

I.3 Definición de los componentes

La mina está compuesta por un número de componentes que tienen características físicas y químicas específicas. Estos componentes son el tajo abierto, la planta concentradora, el depósito de relaves, los botaderos de desmonte y la infraestructura (que incluye carreteras o vías de acceso principales). En el informe principal, se describe cada uno de estos componentes.

Para la evaluación de impacto ambiental, se han caracterizado los aspectos ambientales específicos de cada uno de estos componentes por medio de programas de predicción y de laboratorio. La caracterización de la geoquímica del tajo abierto y de las pilas de roca (que incluyen los botaderos de desmonte y las pilas de almacenamiento) se ha realizado sometiendo a ensayos estáticos y cinéticos las muestras de la roca de mina. Por otro lado, la caracterización de los relaves se hizo por medio de programas de ensayos metalúrgicos y los subsecuentes ensayos estáticos y cinéticos en las muestras generadas por los programas de ensayos metalúrgicos.

Figura I-1 Evaluación de la Calidad del Agua



En la evaluación del posible impacto ambiental asociado a las pilas de roca de mineral y en menor grado a las paredes del tajo, los principales problemas relacionados a la química del agua se deben a:

Watermark Consulting Inc.

- ☒ los sólidos suspendidos liberados de la roca almacenada en botaderos y la roca que resulta de las explosiones
- ☒ el amonio que proviene de los agentes explosivos residuales
- ☒ la lixiviación de los productos solubles a largo plazo
- ☒ lixiviación de metales en un pH casi neutral
- ☒ drenaje ácido de roca

En las siguientes secciones, se tratará acerca de los trabajos de prueba y el modelamiento para dirigir estos problemas. El primero, el de los sólidos suspendidos, se dirigirá por medio de un manejo de aguas durante las operaciones. La mayor parte de los desechos son caliza en bloques relativamente competentes con una pequeña cantidad de finos. Si durante las operaciones la liberación de partículas desde los botaderos de caliza resultaran un problema, se pueden instalar zanjas de colección y pozas de sedimentación. En el Botadero Este, donde se contiene la mayor parte de intrusivos, skarn y suelo superficial, se colectará el drenaje superficial como parte de un programa de manejo de aguas.

Para evaluar la química del agua de la poza de relaves, se dirigirán los siguientes problemas en el programa de ensayos y predicción:

- ☒ química del agua de proceso asociada con los relaves sólidos
- ☒ efecto del pH, antigüedad e interacción del procesos y las aguas naturales en la poza de relaves
- ☒ lixiviación de metales desde los relaves sólidos a largo plazo
- ☒ drenaje ácido de roca (DAR) desde los relaves sólidos a largo plazo

I.4 Geología de la Roca de Mineral

El personal de geología de Antamina evaluó la geología detallada de la roca de mina a partir de una base de datos extensiva de exploración. Se sometieron a prueba algunas

Watermark Consulting Inc.

muestras para determinar el contenido de metales, las cuales también se analizaron para algunos parámetros de metales utilizando el método de análisis ICP (análisis de plasma inductivamente apareado). Las muestras extraídas para el ensayo geoquímico ambiental se seleccionaron de un programa extensivo de perforación para exploración, a fin de representar los diferentes contenidos de metales, álcalis y sulfuros en la roca de mineral.

Sin embargo, se ha reconocido que las muestras tienden más a tener mineral que desmonte, como era el objetivo del programa de perforación. Además, el programa de muestreo para los ensayos estáticos y cinéticos estuvieron dirigidos intencionalmente a representar los materiales que se consideraron podrían representar la situación actual de la calidad del agua; estas muestras no incluyen aquellas que claramente no tienen potencial de lixiviar metales o acidez.

En el informe principal, se presenta una discusión acerca de la geología de la propiedad. El EIA del proyecto Antamina (Klohn Crippen-SVS, 1998) contiene una discusión de la geología y mineralogía de las muestras ensayadas para la evaluación ambiental. En esta sección, se discute cómo incide la geología en las predicciones de la calidad de agua.

La base de datos de exploración contiene los análisis de 33 887 muestras sobre 97 500 m de testigos obtenidos de perforaciones. Esta base de datos se comparó con la base de datos de los ensayos estáticos para determinar en qué medida las muestras ensayadas representan las cantidades relativas de desecho esperadas en la mina.

En Antamina, existen cuatro unidades de roca principales: caliza, intrusivos, skarn y suelo superficial o vegetal. A su vez, el skarn se divide en skarn "granate verde" y skarn "granate marrón", según la composición mineral. El skarn granate verde tiende a cargar mineralización de zinc y cobre, mientras que el skarn granate marrón tiene principalmente mineralización de cobre. El suelo superficial asociado al desarrollo del tajo en su mayoría está compuesto de skarn.

La roca de desmonte intrusiva contiene mineralización de molibdeno y cobre y, en menor grado, mineralización de bismuto y zinc. Aunque el contenido de sulfuros es bajo comparado con muchos depósitos de mineral base, el potencial de neutralización

Watermark Consulting Inc.

también es bajo, dando como resultado la predicción a partir de datos de ensayos estáticos de que la mayoría de los intrusivos son potencialmente generadores de ácido. Sin embargo, exceptuando el cobre y en algunos grados el zinc, la mayoría de la roca de desecho intrusiva contiene bajas concentraciones de metales. Se ha considerado detalladamente la lixiviación de zinc bajo condiciones casi neutrales. Aproximadamente el 73% de las muestras de desechos en la base de datos indican que las concentraciones de zinc son menores a 0.01% Zn. La optimización del plan de mina y la operación probablemente darán como resultado de que gran parte de la roca de desmonte de intrusivos de cobre con leyes de mineral mayores se clasifiquen como mineral y sean procesados durante la operación. Por eso, ante la ausencia de generación ácida neta, la oxidación de gran parte de la roca de desechos intrusivos no representaría un mayor problema de calidad de agua en el campo.

Las muestras de roca utilizadas para los ensayos cinéticos muestran baja concentraciones de metal en comparación con la variedad y el promedio que se presentan en la base de datos para el zinc, cobre y sulfuro. Por esta razón, en el modelamiento de predicción de calidad de agua, se asume que la lixiviación de metales y los índices de producción de humedad son proporcionales a las concentraciones de sólidos. Mientras que por un lado éste es un supuesto conservador, por el otro, es posible hacer muestreos y ensayos adicionales para refinar la estimación de la calidad del agua. Es necesario realizar más muestreos y ensayos, incluyendo datos de campo, para determinar qué proporción de intrusivos podrían considerarse “reactivos”, es decir, una fuente de metales disueltos y/o de acidez a un nivel que podría representar un impacto ambiental adverso. Aunque las concentraciones de metales lixiviables son bajas, se sabe que la carga total de los intrusivos podría representar un problema de calidad de agua en el largo plazo. Por lo pronto, toda la roca de desecho intrusiva se estaría manejando como si fuera potencialmente reactiva y se colocaría en el Botadero Este.

La base de datos de las muestras de skarn muestran que aproximadamente la mitad del skarn podría considerarse como potencialmente generador de ácido. Parte de este material podría reclasificarse como “mineral de baja ley” y enviarse a la planta concentradora durante la fase de operaciones en base a sus leyes de cobre. Los metales potencialmente lixiviables asociados con este tipo de roca incluyen el cobre y, en menor grado, el zinc y el plomo. En el plan actual de manejo de desechos, este material es considerado potencialmente reactivo y se tiene que manejar como tal.

Watermark Consulting Inc.

La caliza es calcárea y consistentemente consumidora de ácido. Las concentraciones de metal son bajas, con excepción de las ocurrencias aisladas de sulfuro en zonas adyacentes al skarn. No se han identificado problemas de calidad de agua a partir de los ensayos hasta la fecha.

El diseño actual del tajo permite la remoción de la mayor parte de los intrusivos, skarn y suelo superficial del tajo, dejando principalmente caliza en las paredes del tajo. En la elevación final de inundación de 4215 m, la roca de la pared expuesta será 93% de caliza, 5.4% de skarn y 1.4% de intrusivo. Durante la operación, el agua del tajo se bombeará hacia el molino o al depósito de relaves, principalmente para el control de sedimentos y la remoción de cualquier contenido de metal disuelto menor del material minado. Al momento del cierre, la química del agua del tajo podría contener metales solubles y sería tratada con la adición de álcalis (cal) hasta que se logre una química de agua de descarga aceptable.

I.5 Caracterización Geoquímica

I.5.1 Roca de Mineral

Los programas de ensayos estáticos y cinéticos se realizaron con muestras de roca de desmonte y de mineral de baja ley, materiales proporcionados por los geólogos de campo. Los resultados de estos ensayos pueden utilizarse para representar la geoquímica de la roca de desmonte, las pilas de almacenamiento de mineral y las playas expuestas en la roca de la pared del tajo abierto. Estos programas de prueba se ven en detalle en el Anexo V del EIA del proyecto (Klohn Crippen-SVS, 1998). A continuación, se presenta un resumen de la información utilizada para la predicción de la química del agua en campo.

En base a los resultados de los ensayos estáticos, se seleccionaron cinco muestras de roca de mineral para realizar ensayos cinéticos. Estas muestras se seleccionaron para representar las unidades de roca mayores que se considera tienen posibilidad de generar acidez o lixiviar metales. Así, se seleccionaron muestras de:

- ☒ skarn granate marrón

Watermark Consulting Inc.

- ☑ skarn granate verde
- ☑ caliza
- ☑ dos muestras de intrusivos

Los ensayos cinéticos se realizaron utilizando celdas de humedad convencionales (Sobek) para evaluar los índices de oxidación y el potencial de lixiviación de metales. En el EIA de Antamina (Klohn Crippen-SVS, 1998), se describen los detalles del programa de ensayos. Semanalmente, la roca de muestra se lavaba con agua para remover los productos de oxidación almacenados y se analizaban para obtener las concentraciones de metales y los iones principales. Luego, se hicieron cálculos en la masa de cada parámetro (usualmente metales y sulfuros) que se liberaron semanalmente. El resultado se describe como el “índice de producción” de cada celda de humedad. Los índices de producción se calculan para las últimas cinco semanas de ensayos (semanas del 26 al 30) a partir del inicio del programa de celda de humedad y se utilizan para la predicción de la calidad de agua, tal como se describe en la Tabla I-1.

Tabla I-1 Índices de Producción en las Celdas de Humedad

Celda de Humedad		Monzonita	Monzonita	Skarn	Skarn	Caliza
Tipo de roca		cuársica	cuársica	granate	granate	
		(intrusivo)	(intrusivo)	marrón	verde	
Liberac.	Acidez	0.5	0.5	0.8	0.6	0.9
Final	Alcalinidad	7.3	5.0	13.4	9.9	11.4
	mg/kg/wk Sulfatos	5.6	3.5	14.4	14.8	13.9
	As	< 0.013	< 0.013	< 0.013	< 0.013	< 1.5E-05
	Cd	< 0.000	0.000	0.001	< 0.001	< 3.5E-07
	Cu	< 0.003	< 0.004	< 0.003	< 0.003	< 2.5E-06
	Fe	< 0.252	< 0.251	< 0.255	< 0.258	< 2.5E-04
	Pb	< 0.013	< 0.013	< 0.013	< 0.013	< 1.2E-05
	Mn	0.040	0.024	0.012	0.126	< 2.5E-06
	Mo	0.045	0.023	0.008	< 0.003	< 3.0E-06
	Ni	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 0.003	< 3.0E-06
	Zn	0.016	0.018	0.012	0.088	< 1.1E-04

Nota:

“<” indica que una o más muestras fueron menores al límite de detección

Para las muestras que estuvieron por debajo de la detección, se utilizó el límite de detección para los cálculos

Watermark Consulting Inc.

Debe observarse que el supuesto conservador de utilizar el valor de detección límite para las muestras que están por debajo del límite de detección puede llevar a la sobreestimación de las cargas de metal. Esto es particularmente evidente para el plomo, para el cual gran parte de las celdas han sido consistentemente menores que en la detección. Los futuros ensayos deben utilizar límites de detección más bajos para varios parámetros para refinar así estas predicciones. Las concentraciones de plomo en estas muestras son muy bajas, por lo que no se anticipa que haya lixiviación.

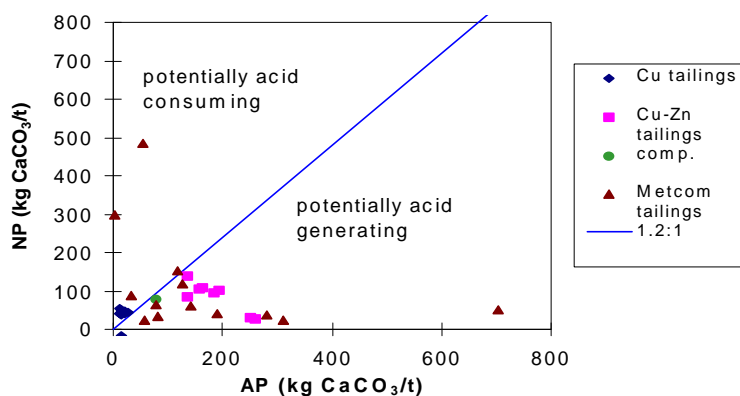
I.5.2 Relaves

En las muestras de relaves, se realizaron ensayos estáticos y cinéticos para evaluar:

- ☒ el potencial de oxidación y la lixiviación de metales bajo condiciones casi neutrales
- ☒ el potencial para la generación de ácido neto y de lixiviación de metales bajo condiciones ácidas
- ☒ la escala de tiempo en la que se espera pueda haber oxidación y generación de ácido para permitir diseñar las medidas de control durante las etapas de operación y cierre

Los ensayos estáticos realizados en las muestras sólidas indican que una parte de los relaves son potencialmente generadores de ácido, tal como se muestra en el gráfico de la Figura I-2. Las muestras con una relación de potencial de neutralización a potencial de ácido (NP:AP) de menos de 1.2:1 típicamente se les considera como potencialmente generadoras de ácido.

Figura I-2 Resultados del Balance Ácido de Base en la Prueba Metalúrgica



De la misma manera, se realizaron cinco ensayos cinéticos en las muestras de relaves. Al inicio, se hizo un ensayo cinético en una muestra de relaves compuesta que se obtuvo para el ensayo metalúrgico de escala de banco; esta muestra se describe como relaves “Metcom” en el gráfico de arriba. En muestras de relaves con alto contenido de sulfuro se hicieron dos ensayos cinéticos; tales muestras se obtuvieron de la mena de cobre, Metcom 101, y de la mena de zinc, Metcom 102. Una vez que se terminaron los ensayos piloto, se procedió a realizar dos ensayos cinéticos en muestras de relaves de cobre y de relaves de zinc (relaves PP8 y PP9, respectivamente). En el EIA del Proyecto Antamina se presentan en detalle los resultados de estos ensayos y una discusión adicional acerca de los ensayos estáticos (Klohn Crippen-SVS, 1998).

En resumen, los resultados de las pruebas estáticas muestran que las muestras de relaves tienen un rango de potencial de generación de ácido, dependiendo de las características del mineral. En general, los relaves que se obtienen del cobre tienden a ser consumidores de ácido, mientras que los relaves del zinc tienden a ser ligeramente generadores de ácido. No obstante, en general, el contenido de sulfuro y el potencial de generación de ácido son bajos, lo cual indica que estos relaves no son grandes generadores de ácido.

Los resultados de los ensayos de celdas de humedad son consistentes con los ensayos estáticos, que muestran que los relaves son relativamente lentos a reaccionar, pero que pueden lixiviar metales como zinc bajo condiciones casi neutrales. Se anticipa que en el largo plazo (en varias décadas), podría haber una generación ácida neta proveniente de los relaves, principalmente de algunas zonas de relaves expuestos con mayor contenido

Watermark Consulting Inc.

de sulfuro. Es por eso que, en base a esta información, será necesario que el depósito de relaves cuente con un control de oxidación y de generación de ácido a largo plazo, y que la cubierta de agua propuesta proporcione este control. En la industria minera, es bastante aceptado que el medio de control de oxidación y de generación de ácido neto más efectivo es la saturación de los relaves sólidos. Para lograr esto, típicamente se construye un depósito de relaves contenedor de agua que cumpla con las condiciones de inundación.

Durante la operación, habrá un espejo o poza que cubra la mayor parte de los relaves, aunque habrán algunas playas en la periferia del depósito. En estas playas continuamente se irán añadiendo relaves alcalinos frescos por pequeños períodos de tiempo. Se espera que durante las operaciones no se desarrollen condiciones ácidas netas.

Los resultados de los ensayos cinéticos se han utilizado para estimar las posibles cargas de los relaves expuestos en las playas, como resultado de su oxidación bajo condiciones casi neutras en los primeros 0.5 m. A manera de comparación, se hicieron cálculos teóricos de la oxidación y de los valores de lixiviación utilizando índices empíricos de consumo de oxígeno por parte de los relaves, dando valores similares a los predichos tomando como base los ensayos de celda de humedad. Estos valores de cargas se incluyeron en el modelamiento de la química del agua del depósito de relaves. El índice de producción de zinc calculado variaría de 55 a 500 mg Zn/m²/año, tasa proporcional a la concentración de zinc y sulfuro en los sólidos. Los datos de los ensayos cinéticos indican que los índices de producción de molibdeno son similares a los del zinc. La disolución del cobre se ve limitada por las restricciones de solubilidad/pH, por lo que muestra menos variabilidad en condiciones casi neutras. Los índices de producción de cobre son bajos en las celdas de humedad, teniendo un valor calculado de 5 mg/m²/año. En el modelamiento de calidad de agua, se utilizó el límite más alto de los índices de producción. Las evaluaciones de sensibilidad mostraron que la dimensión de las playas de relaves no afectan de manera significativa el impacto ambiental de descarga proveniente del depósito de relaves.

1.6 Química de la Solución de la Concentradora

Todas las soluciones provenientes del circuito de molienda se reciclan internamente en

la concentradora (molino), luego se descargan en los relaves o se derivan, conjuntamente con el concentrado, a las instalaciones portuarias por medio del concentraducto. En esta sección, se trata acerca de la química del agua en relación con el asiento minero. Luego se discutirá el manejo del agua en las instalaciones portuarias.

Durante la fase de operaciones, la química del agua de la poza de relaves se determinará principalmente por la calidad del agua asociada a los relaves. La calidad del agua de la poza de relaves se determinará por las condiciones del proceso metalúrgico (molienda, reactivos, pH) y las características del mineral y de los relaves. En la siguiente sección, se resume el trabajo de prueba metalúrgico que se utilizó como base de la predicción de la calidad del agua de la poza de relaves, el cual se describe en detalle en el EIA del proyecto (Klohn Crippen-SVS, 1998).

I.6.1 Ensayos Metalúrgicos

Con las muestras de mineral de Antamina, se hizo un programa extensivo de ensayos metalúrgicos, que incluían ensayos de escala de banco y ensayos de escala piloto. La mayoría de las muestras seleccionadas para los análisis ambientales fueron de los programas de la planta piloto, ya que estos ensayos a gran escala son los más representativos de las futuras operaciones mineras. Se hizo un total de 37 corridas de la planta piloto en todas las muestras de mineral de cobre y de cobre-zinc.

Las corridas de la planta piloto se utilizaron para evaluar las condiciones de proceso alternativas, es decir, la adición de reactivos, molienda, tiempo de residencia, etc. Para cada una de estas corridas, se realizaron análisis de las características de sólidos y de las características de solución. Los sólidos ensayados incluyen sólidos de concentrados y de relaves. De estas 37 corridas piloto, se seleccionaron cuatro como las más representativas de la hoja de flujo metalúrgico preferida, las características de mineral y el rango de química del agua anticipado. El trabajo analítico más detallado se hizo en los productos de estas corridas, etiquetadas como PP (por planta piloto) 8 y 18 de cobre, y PP26 y 20 de cobre-zinc. Las muestras de relaves de esta planta piloto también se utilizaron para la caracterización geotécnica del diseño del depósito de relaves.

Los sólidos de relaves y, si fue posible, de concentrados, se analizaron y ensayaron para:

- ☒ análisis granulométrico, densidad total, gravedad específica y conductividad hidráulica
- ☒ difusión y consumo de oxígeno, curvas de las características del agua del suelo
- ☒ metales, por el método ICP y toda la roca
- ☒ balance ácido de base (BAB) y potencial de generación ácida neta (NAG), extracción a corto plazo
- ☒ características de sedimentación y química del agua correspondiente en intervalos de períodos de ensayos de más de 48 horas

Watermark Consulting Inc.

Además, en el programa de ensayos cinéticos, se incluyeron cinco muestras de relaves sólidos, tal como se vio en la Sección I.5.2.

Asimismo, en el programa de ensayos ambientales en muestras metalúrgicas, se incluyó los análisis de las soluciones de relaves (de relaves frescos y relaves que ya han estado almacenados y tienen cierta antigüedad) y de agua del concentrado, para obtener:

- ☒ un conjunto de los metales disueltos y totales
- ☒ pH, conductividad y alcalinidad/acidez
- ☒ especies de cianuro y especies de azufre (tiosales) y nutrientes
- ☒ toxicidad

Estos datos fueron la base de la predicción de la química del agua en la poza de relaves.

Se hicieron análisis detallados de las corridas seleccionadas de la planta piloto, las cuales se utilizaron en las primeras fases de la evaluación de impacto. A partir de estos datos, se seleccionaron parámetros clave para el modelamiento más detallado de la calidad del agua. Estos parámetros incluyen todos los parámetros para los que existen lineamientos o criterios de agua receptora o efluentes, así como otros parámetros adicionales útiles para evaluar el impacto, como por ejemplo, dureza o nutrientes.

I.6.2 Datos para el Modelamiento de la Calidad de Agua

En la Tabla I-2 y Tabla 1-3, se presenta un resumen de los datos obtenidos de los programas de ensayos de laboratorio que se utilizaron como entradas para el modelamiento de la calidad del agua. En estas tablas, se resume la química del agua de los relaves para el cobre y el cobre-zinc, así como la química del agua del concentrado para los concentrados de cobre y zinc, respectivamente. Estas tablas son un resumen de los análisis detallados descritos en el EIA del proyecto Antamina (Klohn Crippen-SVS, 1998).

Tabla I-2 Agua de los relaves

Parámetro (mg/L dis.)	Mena de Cobre	Mena de Cobre-Zinc
pH (unidades)	11.7	~10
Bismuto	0.002	0.001
Calcio	221	252
Cobre	0.049	0.006
Hierro	0.021	0.062
Plomo	0.004	0.003
Molibdeno	0.251	0.055
Zinc	0.085	0.016
Amonio	0.595	0.595
Cianuro (total)	<0.01	<0.01
Sulfato	222	337

Los concentrados de cobre y zinc filtrados liberados a los relaves se modela conjuntamente con la química del agua mostrada en la Tabla I-3, que también provienen de las corridas de la planta piloto 8, 18, 26 y 29.

Tabla I-3 Química del agua de los concentrados

Parámetro	Agua con Concentrado de Cobre (mg/L dis.)	Agua con Concentrado de Zinc (mg/L dis.)
Bismuto	0.011	0.011
Cobre	0.79	0.002
Hierro	17	0.05
Plomo	0.006	0.014
Molibdeno	0.064	0.015
Zinc	0.039	1.01
Amonio	0.8	0.01
Cianuro (total)	2.7	0.01
Sulfato	124	509

Al momento del cierre, se inundará los relaves, lo cual inhibirá cualquier oxidación y mecanismos de lixiviación a largo plazo. Con el tiempo, cuando el agua de la poza se reemplace con agua fresca, la química del agua de la poza se aproximará a los valores anteriores a las operaciones mineras.

I.6.3 Tratamiento de Agua

La planta de tratamiento de agua propuesta es una planta de tratamiento de cal convencional que se incorporará a las instalaciones de la planta concentradora. Se han evaluado alternativas de adición de lodos de alta densidad y sulfuro pero estas alternativas no se consideraron necesarias para la química del agua anticipada en Antamina.

Para fines de modelamiento de calidad de agua, la química del agua para efluentes tratados se predijo en base a la experiencia que se tiene con estas plantas en minas de metal base. Esta tecnología de tratamiento de agua es tecnología convencional que se ha implementado en minas polimetálicas de todo el mundo y por eso el rango de la calidad de tratamiento puede predecirse con una confianza razonable. Se estima que las concentraciones totales de cobre en el fluente variarían de 0.05 a 0.1 mg/L, con Watermark Consulting Inc.

concentraciones disueltas de 0.02 mg/L de cobre. Se estima que las concentraciones totales de zinc en el efluente variarían de 0.1 a 0.3 mg/L, con concentraciones disueltas de zinc tal bajas como 0.05 mg/L. De igual manera, se estima que las concentraciones de molibdeno serán de 0.02 mg/L.

I.7 Cálculos de Carga de la Roca de Desmonte

I.7.1 Plan de Mina

Como parte del planeamiento de minado, también se han desarrollado cronogramas para la producción de roca de desmonte y de pilas de almacenamiento anualmente. El período programado para el minado es de aproximadamente 24 años, con un período de pre-producción de dos años. Las pilas de roca de mineral incluyen:

- ☒ Botadero Tucush, el cual contendrá 471 millones de toneladas de caliza y 2.4 millones de toneladas de skarn
- ☒ Botadero Sur, que comprenderá aproximadamente 317 millones de toneladas de caliza
- ☒ Botadero Este, que contendrá aproximadamente 171 millones de toneladas de caliza, 321 millones de toneladas de skarn, intrusivos y óxido, y 10 millones de suelo superficial

En la Tabla I-4.REF se muestra la composición de cada uno de los botaderos para los años seleccionados para el modelamiento.

Tabla I-4 Composición del Botadero para los Años 5, 10 y 15 (fin de la mina)

Destino de la roca de desmonte	Tonelaje Acumulable por Tipo de Roca (x 1000) 5 Años (2001 a 2005)					Total
	Skarn	Intrusivo	Caliza	Suelo Superf.	Óxido	
Botadero Este	43,486	45,695	142,051	7,174	2,755	241,161
Botadero Tuchus	2,403	-	240,074	-	-	242,477
Botadero Sur	-	-	21,723	-	-	21,723
Presa de relaves	-	-	28,128	-	-	28,128
Berma del pie	-	-	3,939	-	-	3,939
Carreteras	-	-	19,066	-	-	19,066
Total	45,889	45,695	454,982	7,174	2,755	556,494

Destino de la Roca de Desmonte	Tonelaje Acumulable por Tipo de Roca (x1000) 10 Años (2001 a 20010)					Total
	Skarn	Intrusivo	Caliza	Suelo Superf.	Óxido	
Botadero Este	59,594	102,467	171,091	8,197	3,638	344,987
Botadero Tucush	2,403	-	414,019	-	-	416,422
Botadero Sur	-	-	173,862	-	-	173,862
Presa de Relaves	-	-	28,128	-	-	28,128
Berma del pie	-	-	3,939	-	-	3,939
Carreteras	-	-	27,409	-	-	27,409
Total	61,997	102,467	818,449	8,197	3,638	994,747

Destino de la Roca de Desmonte	Tonelaje Acumulable por Tipo de Roca (x1000) Vida de la mina (24 años)					Total
	Skarn	Intrusivo	Caliza	Suelo Superf.	Óxido	
Botadero Este	89,010	228,329	171,091	9,786	3,656	501,872
Botadero Tucush	2,403	-	469,064	-	-	471,467
Botadero Sur	-	-	316,651	-	-	316,651
Presa de Relaves	-	-	38,194	-	-	38,194
Berma del Pie	-	-	3,939	-	-	3,939
Carreteras	-	-	29,397	-	-	29,397
Total	91,413	228,329	1,028,336	9,786	3,656	1,361,520

I.7.2 Cálculos

Se sabe que la predicción de la química del agua en campo que proviene de los botaderos de roca de desmonte basados en ensayos de laboratorio de celdas de humedad no es una ciencia exacta. Actualmente, estas predicciones están sujetas a investigaciones y búsquedas en la comunidad técnica. La aproximación que se utiliza aquí es una aproximación semi-empírica que combina los conocimientos teóricos de los controles físico y químico de las pilas de roca, con la experiencia que se tiene en minas operativas y cerradas en todo el mundo.

La aproximación que se describe a continuación es conservadora en lo referente a los supuestos, y está dirigida a brindar una base razonable para identificar los posibles problemas de calidad de agua, las unidades de roca de desmonte con posibles problemas y las medidas de control necesarias que se requieren a largo plazo. A partir de estas predicciones, se ha desarrollado un plan de manejo de desechos que se dirige a todos los materiales potencialmente reactivos. Es necesario resaltar que las predicciones de calidad de agua son una herramienta para desarrollar planes de manejo de desechos, y no es una predicción exacta de la química del agua en campo en todos los puntos en el espacio y tiempo.

Durante la operación, se utilizarán estos datos de campo para calibrar estos cálculos y refinar las actuales predicciones de calidad de agua en campo. Se espera que los valores medidos en campo, particularmente en resumaderos individuales, varíen a partir de los valores simples que se utilizan aquí. Sin embargo, es importante reconocer que el plan de manejo de desechos que se ha desarrollado brinda contingencias para controlar toda la roca de desmonte potencialmente reactiva durante las etapas de operación y cierre. Los datos de química del agua en campo y los datos geológicos se utilizarán para refinar las cantidades estimadas de roca potencialmente reactiva.

Los datos de los ensayos cinéticos realizados en laboratorio arriba mencionados se extrapolaron para obtener índices de producción en campo utilizando una serie de cálculos, a saber:

1. Los datos de ensayos cinéticos se utilizaron para desarrollar un índice de producción en el laboratorio (visto anteriormente).

2. El índice de producción en el laboratorio se corrigió para las temperaturas de campo más bajas – aproximadamente 35% del índice de laboratorio.
3. El índice de producción se ajustó para el contenido de metal en sólidos, utilizando el supuesto conservador de que el contenido de metal mayor corresponde directamente a los índices de producción también mayores.
4. El plan de mina se utilizó para determinar la composición de cada botadero en diferentes períodos de desarrollo.
5. Para calcular el índice de producción en campo tomando en cuenta las características físicas de la roca de desmonte en campo en comparación con las características mostradas en laboratorio, se aplicaron ciertos factores para representar el área total de la superficie de roca.
6. La carga total en cada unidad de tiempo también podría verse afectada por el área de superficie de roca lavada con agua de filtrado, generalmente entre 5% para el flujo canalizado en roca gruesa hasta 25 a 50% del total de la superficie para el área de material más fino. Para la roca gruesa, se utilizó el razonable valor conservador de 15% en estos cálculos.
7. Luego, los índices de producción calculados en campo se aplicaron a cada tipo de roca de cada botadero, para calcular la carga total.

En las Figuras I-3 y I-4, se muestra gráficamente las cargas relativas de cada botadero de desmonte y pila de almacenamiento en el último año de operación para el cobre y el zinc, respectivamente.

Figura I-3 Cargas Relativas de los Botaderos para el Cobre Disuelto

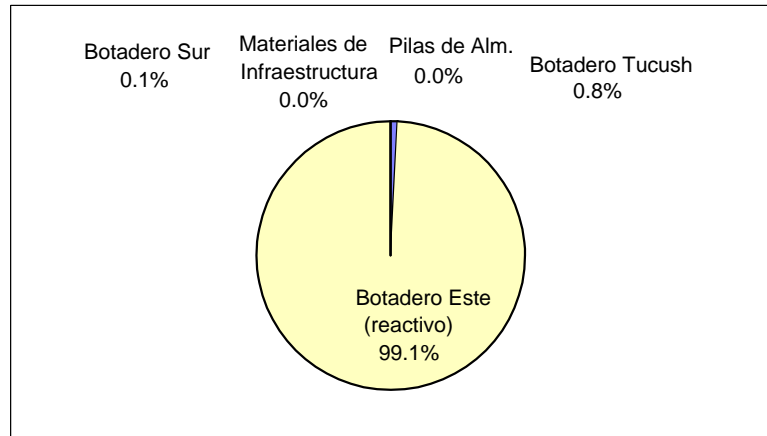
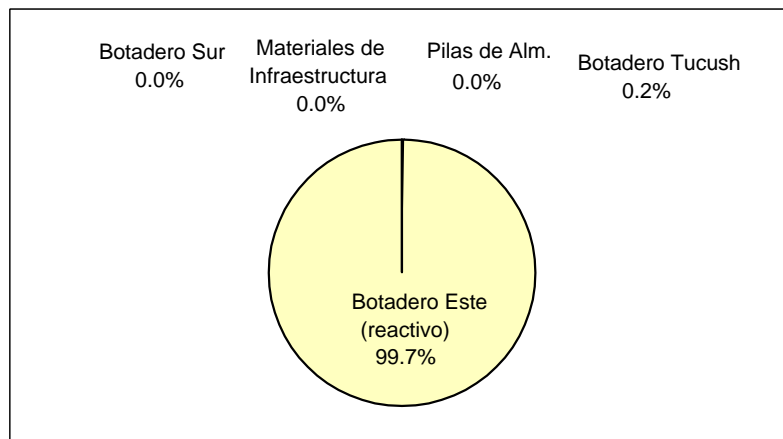


Figura I-4 Cargas Relativas en los Botaderos para el Zinc Disuelto



I.8 Balance de Agua y Balance de Carga

I.8.1 Generalidades

La evaluación de la química del agua del lugar es uno de los componentes clave en la evaluación de los impactos ambientales del proyecto minero propuesto, tanto durante la etapa de operación como después del cierre. La evaluación de la química del agua en

Watermark Consulting Inc.

el lugar incluye mediciones de las condiciones antes del minado y la predicción del flujo y de la química del agua en los diferentes componentes de la mina.

La química del agua y la hidrología de línea base se han ido midiendo en Antamina y las áreas circundantes desde agosto de 1996. Estos datos de línea base obtenidos desde agosto de 1996 hasta noviembre de 1998 se han utilizado para calcular las condiciones de línea base antes del inicio de las operaciones mineras para el modelo de carga. Por otro lado, los datos de los ensayos de laboratorio y de campo se han utilizado para predecir la química del agua en las operaciones mineras. Luego, la química del agua predicha en varios componentes de la mina se han superpuesto en la química de línea base (es decir, en los datos de química del agua anteriores al inicio de las operaciones), a fin de estimar el cambio que pudiere producirse en los flujos, concentraciones de parámetros y por último los impactos que estos cambios producen en el ambiente receptor.

Los cálculos del cambio en la química del agua se calcularon utilizando un modelo de carga de masas simple (frecuentemente llamado modelo de dilución). Tal como lo dice su nombre, éste es un modelo conservador que se basa sólo en la mezcla y la dilución. En esta etapa de las evaluaciones, no se asume ningún beneficio de las reacciones geoquímicas que pudieran atenuar y mejorar la calidad del agua, como neutralización, precipitación química y reacciones naturales de degradación. Aunque se sabe que estos mecanismos se presentarán en varios grados, no se ha hecho la evaluación correspondiente para este proyecto. Por eso, la aproximación del modelamiento de dilución es un supuesto conservador pero razonable para una base de diseño, al menos hasta que se disponga de datos de campo para calibrar el modelo.

En el modelo de carga de masa, existen dos componentes:

- ☒ el balance de agua en el cual se basan los flujos
- ☒ las concentraciones y/o cargas químicas sobre las cuales se calcula la carga química (contaminante)

En la siguiente sección, se tratará sobre la estructura de este modelo. Los datos de

entrada y los supuestos del modelo ya se han visto anteriormente y se resumen de la siguiente manera:

- ☒ El Botadero Sur se ubica en la captación de la Quebrada Canrash.
- ☒ El Botadero Este y el depósito de relaves se ubican en la captación de la Quebrada Ayash.
- ☒ El Botadero Tucush se ubica en la captación de la Quebrada Ayash, aguas abajo del depósito de relaves.
- ☒ Existe drenaje proveniente de la roca de mina, incluyendo las pilas de almacenamiento y las pilas de desmonte, que van hacia el agua superficial y subterránea.
- ☒ El drenaje proveniente de las pilas de almacenamiento de mineral de baja ley que se ubican inmediatamente al este del Botadero Sur se colectarán para su tratamiento respectivo, si es que fuera necesario.
- ☒ La química del agua predicha para estas pilas de almacenamiento se basa en la extrapolación de los datos de ensayos de laboratorio y la información del plan de minado.
- ☒ Existe una descarga controlada que va hacia el agua superficial del efluente que proviene del depósito de relaves, en base a la hidrología en el ambiente receptor y la química del agua en el depósito de relaves.
- ☒ Existe un control del pH en la descarga de los relaves al depósito, para minimizar la disolución y solubilidad de los metales.
- ☒ Existe un sistema de colección de filtración de agua subterránea proveniente de la presa de relaves.
- ☒ El agua se bombea del tajo abierto a la concentradora o a los relaves y no se descargan directamente.
- ☒ la escorrentía proveniente de la planta fluye hacia el depósito de relaves.

- ▣ El agua de proceso se descarga en los relaves.

1.8.2 Estructura del Modelo

La calidad del agua se modela con un modelo de dilución simple de hoja de distribución que combina el balance de agua en el lugar con la química del agua predicha en cada uno de los componentes de la mina. El modelo de calidad de agua es un cuaderno de trabajo en Excel que consiste en 16 hojas de cálculo relacionadas entre sí. Cada hoja de cálculo estima el balance de agua y la calidad del agua en un componente específico de la zona minera, como el Botadero de Desmonte Sur, la Quebrada Antamina o la poza de relaves. En base a los estimados de flujo unitario mensual que se muestra en la Sección 4.1.8 del EIA del Proyecto, se calculan los flujos promedio mensual. Las contribuciones de agua subterránea a los flujos se basan en los estimados descritos en los Anexos M-III. Todas las cargas contaminantes se derivan tal como se describe en este Anexo.

Al pie de la presa de relaves, se modela un sistema de colección filtración de agua subterránea. Se asume que la filtración proveniente de la poza de relaves va aumentando con la elevación que vaya alcanzando la poza durante el tiempo de vida de la mina, de 60 L/s en los primeros años del proyecto a 1080 L/s en el año 24. El sistema de colección de filtración se modela para que retorne el mismo volumen a la poza mientras dure la filtración, para una pérdida neta de volumen de cero en la poza de relaves.

En el área del Botadero Este, la carga modelada proveniente del botadero se divide entre la escorrentía/infiltración y el agua subterránea. Se asume que todos los flujos se colectarán y tratarán en el circuito de molienda (cuando sea necesario) y que el efluente tratado descargará hacia el depósito de relaves. Durante la operación, el tratamiento consistirá en mezclar el drenaje con los relaves alcalinos en la concentradora o en la caja de bombeo de relaves, a fin de lograr el control del pH y la precipitación de los metales. Se ha asumido que después del cierre se instalará un circuito de tratamiento de cal en la zona de la planta concentradora.

En la Tabla I-5, se muestran los componentes de influjo que van hacia la poza de relaves y el flujo de salida de decantación para un año promedio. En la Figura I-5, se

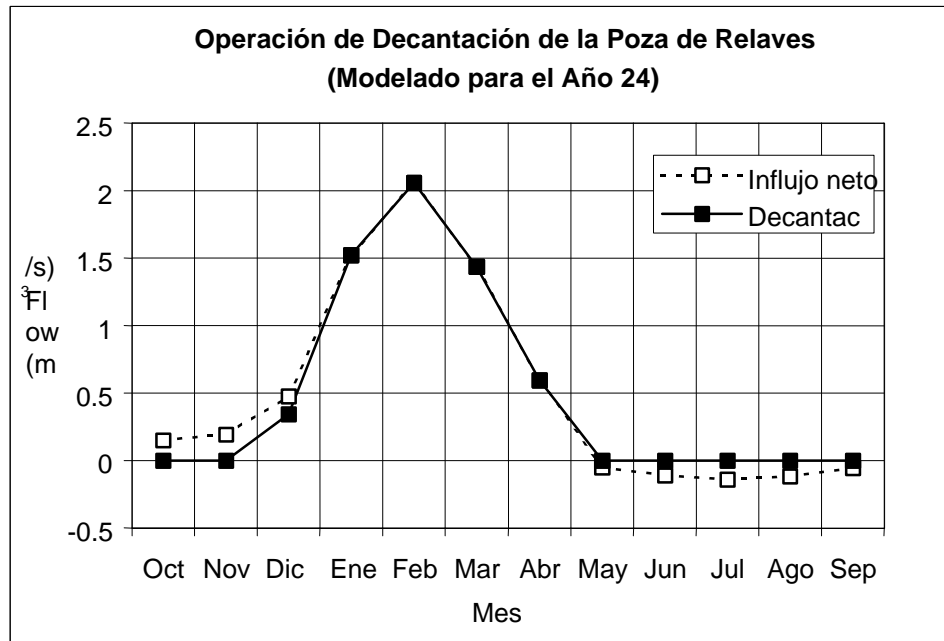
Watermark Consulting Inc.

ilustra la operación de decantación en la poza de relaves durante un período de un año. En este ejemplo, se ve que de enero a abril el influjo pasa, esto es, el influjo es igual al flujo de salida. En el período de octubre a diciembre, existe un influjo neto positivo, y de mayo a setiembre el influjo neto es negativo. De esta manera, la poza se opera de tal forma que almacena la suficiente agua como para compensar un posible déficit de agua que pudiere presentarse durante la estación seca. Además, las liberaciones de decantación se acortan en la estación seca para reducir los posibles efectos adversos que pudieran darse aguas abajo.

Tabla I-5 Influjos de la Poza de Relaves y Flujo de Decantación – Año Promedio Operacional

Ítem	Volumen (millón m ³)	
	Año 5	Año 24
Influjos Naturales	15.8	15.3
Drenaje de las pilas de almac.	0.2	0
Botadero Este	0.9	1.9
Planta Concentradora	50.7	50.7
Mina	4.7	4.9
Filtración Recirculada	9.5	33.1
TOTAL	81.8	105.9
Decantación	15.2	15.6

Figura I-5 Influjo Neto de la Poza de Relaves



I.8.3 Uso de Predicciones

Se sabe muy bien acerca de las dificultades inherentes referentes a la medición y predicción del flujo físico y de las características (geo)químicas de sistemas naturales complejos. Los datos de campo no son continuos todo el tiempo, y tampoco lo es la generación y el transporte de contaminantes instantáneos. Los datos de ensayos de laboratorio se deben extrapolar con las condiciones de campo en base a la comprensión actual de la geología del lugar y del plan de mina que, como se sabe, se refinará según lo establecen los procedimientos mineros actuales. Además, la intemperización de la roca de mina con el tiempo involucra una compleja gama de reacciones geoquímicas e interacciones que también cambian con el tiempo. Por eso, en todos los casos, las predicciones de la química y del flujo se basan en procedimientos de estimación y de pruebas prácticos y rigurosos que son consistentes con la buena ciencia e ingeniería. Los análisis de sensibilidad se utilizaron para examinar los supuestos y estimados que se utilizaron en todo el análisis.

Es por eso que se hace hincapié en que estas predicciones de la química del agua
Watermark Consulting Inc.

representan los mejores estimados que puedan hacerse hasta ahora, dado la información disponible y el estado actual de la industria. Sin embargo, debe reconocerse que la predicción de toda la química del agua del lugar durante varios años en el futuro no es una ciencia exacta, particularmente al nivel de concentración requerido para la evaluación del impacto ambiental. No obstante, lo que es muy importante es que estas predicciones modelo se han utilizado para identificar las principales posibles fuentes de efecto adverso, la ingeniería y las medidas de monitoreo apropiadas, y las medidas de diseño alternativas para minimizar los posibles impactos ambientales que pueda producir la explotación minera. A partir de las predicciones de carga de los botaderos de desmonte y de la química del agua de proceso, se han seleccionado parámetros clave para un modelamiento de calidad de agua más detallado. Estos parámetros incluyen aquéllos para los cuales existen lineamientos o criterios de efluentes o de agua receptora, y otros parámetros adicionales útiles para evaluar los efectos que pudieran producirse aguas abajo.

Tal como se vio detalladamente en las secciones siguientes, esta aproximación iterativa del modelamiento de la calidad de agua, de la evaluación de impacto ambiental y el diseño/manejo ambiental ha dado predicciones de calidad de agua y efluentes completos para todo el tiempo de vida de la mina y para después del cierre. Esto se logra con el diseño y la implementación de la roca de desmonte, relaves y planes de manejo de agua (incluyendo tratamiento de agua) para después de la vida de la mina y para el período de cierre.

1.8.4 Efectos Ambientales y Lineamientos

Los posibles efectos ambientales de la mina en la calidad del agua se evalúan en dos formas:

- ☒ comparando los Criterios Peruanos para Efluentes Líquidos y los Criterios de Antamina para el Efluente Líquido (tal como se define para el componente ambiental evaluado para la calidad del agua)
- ☒ en términos del efecto que puedan producirse en el agua que se utilice aguas abajo, en el ambiente receptor

En la Tabla 1-7, en la siguiente sección, se presenta una comparación entre los criterios para efluentes peruanos y de la compañía. En esta tabla, también se incluye, a manera de referencia, los lineamientos peruanos de calidad de agua receptora.

La determinación de los límites de la química del agua receptora se basa en la combinación de los lineamientos peruanos y ensayos de toxicidad específicos del lugar. En el Anexo Mina M-II del EIA (Klohn Crippen-SVS, 1998), se presentan los resultados de los ensayos realizados.

Las referencias bibliográficas, la experiencia en otras minas y las pruebas de toxicidad que se realizaron en el área del proyecto indicaron que los límites de calidad de agua de 0.4 mg/L de zinc y 0.05 mg/L de cobre servirán de protección contra la letalidad contra los peces en las aguas que se encuentran inmediatamente aguas abajo de las descargas del Proyecto Antamina.

Utilizando los lineamientos peruanos para calcular los límites de concentración en base a la multiplicación del valor LC_{50} por un factor específico del parámetro, se estimó que las concentraciones de 0.13 mg/L de zinc y 0.025 mg/L de cobre en las aguas receptoras asegurarán que todos los elementos importantes de la comunidad biológica estén adecuadamente protegidos, tal como se demostró en el monitoreo en otras minas. El valor de 0.07 mg/L de molibdeno en el agua para consumo humano recomendado por la Organización Mundial de la Salud se utilizará como estándar para este elemento.

Los límites arriba mencionados están dentro del rango de los lineamientos de calidad de agua para la protección de aguas superficiales sensibles en el Perú. Con la ayuda de pruebas de toxicidad adicionales y de monitoreo de efectos en el ambiente, se confirmará que estos límites sigan siendo adecuados.

I.9 Predicción de la Calidad del Agua

I.9.1 Pre-minado

En el EIA del proyecto (Klohn Crippen-SVS, 1998), se resume la química de agua de línea base que se utilizó para los promedios en la estación seca y en la estación húmeda; estos datos se actualizaron con los resultados de monitoreo de noviembre de

Watermark Consulting Inc.

1998. En la REFin Tabla I-6, se resume la química promedio anual de las condiciones actuales que se utilizaron en el balance de carga.

Tabla I-6 **Química del Agua de Línea Base**

Estación	Cobre (mg/L)	Plomo (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Zinc (mg/L)
AN-11	.0008	.0002	.0005	.003
AN-26	.0012	.0009	.0006	.006
AN-30	.0006	.0002	.0007	.003
AN-73	.0006	.0002	.0007	.003
AN-74	.0003	.0001	.0008	.005
Río Puchca	.0005	.0002	.0009	.008
Río Marañón	.0001	<.0001	.0001	.0013
AN-70	.0038	.0004	.025	.12
AN-71	.0016	.0002	.0046	.014
AN-72	.0017	.0003	.0043	.013
Río Mosna	.0008	.0003	.0009	.013

I.9.2 Química del Agua de los Efluentes de Relaves

La química del agua que provendrá del depósito de relaves es una combinación del agua de proceso de los relaves, agua natural y escorrentía que provendrán del Botadero Este, la planta concentradora y el tajo abierto. Se han evaluado una serie de parámetros, incluyendo las concentraciones de metales disueltos, metales totales, sólidos suspendidos, especies de azufre, nutrientes, reactivos y alcalinidad/acidez. Debido a la naturaleza comparativamente limpia del mineral y al circuito simple de procesamiento convencional, la mayoría de los parámetros están a concentraciones bastante bajas y con frecuencia se encuentran por debajo de los límites de detección analítico-práctico. Asimismo, los relaves son relativamente gruesos, por lo que las concentraciones de sólidos suspendidos en el agua de proceso son bajas. De ahí que las concentraciones de metales totales sean muy similares a las concentraciones de metales disueltos.

Watermark Consulting Inc.

El modelamiento de calidad de agua se hizo mensualmente. Así, se espera que pasado el año la química del agua típica en el depósito de relaves se encuentre dentro del rango que se resume en la REFTabla I-7. Para mayor referencia, en la columna de la mano derecha se presenta los lineamientos peruanos para la calidad del agua, a fin de mostrar que muchos de las concentraciones con efluentes se han predicho que estarán por debajo de los lineamientos del agua receptora.

Tabla I-7 Calidad del Agua de Efluentes Típica Mensual Predicha durante la Operación

Parámetro	Unidades	Rango			Criterios Efluentes Peruanos	Criterios Efluentes Antamina	Referencia: Lineamientos de Agua Receptora
pH	un de pH	7	a	9	5-9	6-9	
Total de sólidos suspendidos	mg/L	<10	a	25	-	25	
Aceite y grasa	mg/L	<10	--	--	--	10	
Cianuro			a				
CN total	mg/L	0.01		0.03	1.0		0.005 ^{2,3} – 0.20 ¹
CN libre	mg/L	<0.01					
Arsénico	mg/L	0.002	a	0.004	0.5	0.1	0.05 ³ – 0.20 ⁵
Cadmio	mg/L	<0.0002	--	--	--	0.1	0.004 ³ – 0.05 ²
Cobre	mg/L	0.01	to	0.04	0.3	0.3	0.5 ² , 1.0 ¹
Cromo	mg/L	<0.001	--	--	--	1.0	0.05 ^{1,3} – 1.0 ²
Hierro	mg/L	<0.1	---	---	1.0	1.0	0.3 ¹ – 1.0 ²
Plomo	mg/L	<0.002	a	0.005	0.2	0.2	0.03 ³ – 0.1 ²
Mercurio	mg/L	<0.0002	--	--	--	0.002	0.0002 ³ – 0.01 ²
Níquel	mg/L	<0.0005	a	0.001	--	0.5	0.002 ^{1,2,3}
Zinc	mg/L	0.05	a	0.15	1.0	0.5	5 ¹ , 25 ²

1. Agua para el abastecimiento doméstico en el Perú con desinfección simple..
2. Agua para la irrigación y para el consumo de ganado en el Perú.
3. Conservación de áreas de fauna acuática y de fuentes de pesca en el Perú.

Se reconoce que es posible que haya períodos de varios días en los que la química del agua exceda estos valores predichos como resultado de problemas de operación o de cambios inesperados en el mineral o la química de proceso en uno o más parámetros. Es por eso que estos valores deben acercarse periódicamente a los criterios de efluentes. Es importante enfatizar dos puntos en este análisis de impacto ambiental del depósito de relaves:

- ▣ La química del agua de relaves predicha es la calidad de agua que se espera resulte de las operaciones normales, tal como se representa en los programas de ensayos metalúrgicos y geoquímicos
- ▣ la poza de relaves y el sistema de manejo de aguas son lo suficientemente flexibles como para que el agua sólo se descargue desde el depósito de relaves, si es que la calidad del agua cumple con los criterios de efluentes o es mejor de lo que ellos especifican

La química del agua predicha se expresa en términos de metales disueltos, de acuerdo con los Criterios Peruanos para los Efluentes Líquidos y los criterios establecidos por Antamina. Durante la operación, donde se mantendrá un valor bajo de total de sólidos suspendidos, las concentraciones de metales totales son esencialmente las mismas que los valores predichos disueltos. Debe observarse que los valores que se presentan en la Tabla REFCOMFORMATOI-7 son independientes para cada parámetro. El hecho de que un parámetro tenga un valor máximo, no significa que todos los demás parámetros estén también en su valor máximo. Después del cierre, la calidad del agua de la poza de relaves se aproximará a la química del agua de línea base como el agua natural que proviene de los lugares de captación del agua de la poza.

La ubicación de las predicciones de agua aguas abajo se puede encontrar en el Mapa M-IV-1 del EIA de Antamina (Klohn Crippen-SVS, 1998).

I.9.3 Año 5

En la REFTabla I-8 se presenta la química del agua modelada en estaciones de predicción seleccionadas para el cobre, plomo, molibdeno y zinc. No se presentan los resultados de modelos para parámetros para los cuales no existen cambios tomando como base los valores del EIA previo, como cianuro, nitrato de amonio, etc. Los resultados presentados son concentraciones en mg/L promediados sobre el año de operación 5. Las concentraciones predichas son consistentemente menores a los valores establecidos en los lineamientos de calidad de agua y, por lo tanto, logran la protección de la vida acuática y del agua para consumo humano (para el Molibdeno).

Se anticipa que la química del agua de los relaves no variará en gran medida al término de la vida de la mina. Es posible que la química del drenaje y el volumen del drenaje proveniente de los botaderos de desmonte varíen con el tiempo. Tal como se muestra en la Tabla I-4REFREF, los botaderos de desmonte se construirán al término de la vida de la mina. Esto conllevará al incremento de carga con el tiempo, principalmente como resultado del tonelaje total de roca. Aunque la química del agua cambiará con la aceleración de los procesos de oxidación, la roca de desmonte es relativamente lenta en reaccionar y se prevé que no habrá condiciones ácidas netas durante la operación ni durante el cierre.

No se espera que las concentraciones de plomo descieran en gran manera en la Quebrada Ayash, aguas abajo de la poza de relaves, ya que la mayor parte del modelamiento de la carga de plomo se hizo en base a antecedentes, no en base a otras operaciones mineras. Esto puede verse como una comparación con los valores de la química del agua de línea base que se muestran en la SecciónREF I-9.

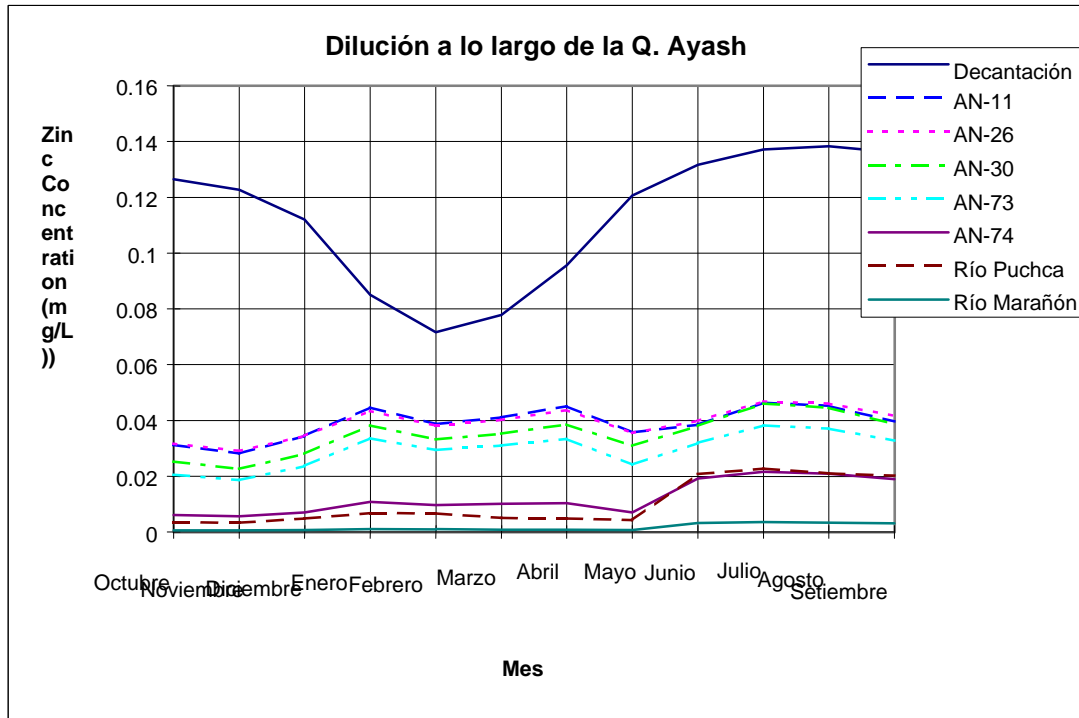
Tabla I-8 Química del Agua Receptora Modelada en el Año 5

Estación	Cobre (mg/L)	Plomo (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Zinc (mg/L)
AN-11	.009	.001	.043	.039
AN-26	.008	.002	.039	.039
AN-30	.008	.001	.038	.035
AN-73	.006	.001	.032	.030
AN-74	.002	.0004	.009	.012
Río Puchca	.0009	.0003	.0035	.010
Río Marañón	.0001	<.0001	.0005	.0016
AN-70	.004	.0004	.025	.11
AN-71	.002	.0002	.005	.014
AN-72	.002	.0003	.004	.013
Río Mosna	.0008	.0003	.0009	.009
Lineamientos del agua receptora	.025	.03	.07	.13

También debe tomarse en cuenta que habrá una restricción física en el flujo durante los primeros años del desarrollo del botadero, a medida que el agua que se filtra se atenúa dentro de la pila de roca “humedeciendo” las rocas. Una vez que el contenido de humedad en campo sea suficiente como para lograr un flujo, la cantidad de drenaje aumentará a los niveles predichos aquí utilizados.

Además de los cambios en las cargas con el año modelo, se espera que las concentraciones en las aguas receptoras que se encuentran aguas abajo varíen cada año, en respuesta a las fluctuaciones estacionales en la precipitación. La Figura I-6 muestra el cambio predicho en las concentraciones a lo largo de la Quebrada Ayash durante el modelo del año 5.

Figura I-6 Variación en la Química del Agua Receptora en el Modelo del Año 5



I.9.4 Año 10

En la REFTabla I-9, se muestra la química del agua modelada durante las operaciones para el año 10. En comparación con el modelo del año 5, las concentraciones en la Quebrada Ayash y aguas abajo son similares. Esto resulta razonable, ya que no existe un cambio en la concentradora y el agua de relaves, por lo que se ha hecho una provisión para el tratamiento en la concentradora del drenaje del Botadero Este antes de la descarga con relaves en la poza de relaves.

Las concentraciones en la Quebrada Carash y aguas abajo también son similares al año 5, con la pequeña diferencia de que muestra valores de molibdeno ligeramente mayores. Para el año 10, habrá una pequeña carga conservadoramente predicha para la caliza en los Botaderos Tucush y Sur. Sin embargo, las concentraciones predichas aún son muy bajas en el ambiente receptor y son consistentes con la protección de los recursos de agua receptora.

Watermark Consulting Inc.

Tabla I-9 Química del Agua Receptora Modelada para el Año 10

Estación	Cobre (mg/L)	Plomo (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Zinc (mg/L)
AN-11	.01	.002	.049	.044
AN-26	.009	.002	.044	.044
AN-30	.008	.001	.044	.040
AN-73	.007	.001	.036	.033
AN-74	.002	.0004	.011	.013
Río Puchca	.001	.0003	.004	.012
Río Marañón	.0002	<.0001	.0006	.002
AN-70	.004	.0004	.025	.108
AN-71	.003	.0002	.004	.014
AN-72	.002	.0003	.004	.014
Río Mosna	.0008	.0003	.001	.013
Lineamientos del agua receptora	.025	.03	.07	.13

I.9.5 Año 24

En la REFTabla I-10, se muestra la química del agua predicha para el término de la vida productiva de la mina, que se calcula será en el año 24 a partir de su funcionamiento. Las concentraciones en las aguas receptoras siguen elevándose ligeramente, pero el sistema de Ayash muestra un pequeño aumento predicho en las concentraciones. Este conjunto de corridas de modelos muestra la química del agua antes del desmantelamiento de los botaderos de desmonte, pero a la vez se muestra conjuntamente con la colección continua de datos en el agua del tajo.

Tabla I-10 Química del Agua Receptora Modelada para el Año 24

Parámetro	Cobre	Plomo	Molibdeno	Zinc
-----------	-------	-------	-----------	------

Watermark Consulting Inc.

	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
AN-11	.010	.002	.052	.047
AN-26	.010	.002	.047	.046
AN-30	.009	.0015	.0547	.042
AN-73	.007	.0013	.038	.035
AN-74	.002	.0004	.011	.014
Río Puchca	.001	.0003	.004	.011
Río Marañón	.0002	<.0001	.001	.002
AN-70	.004	.0004	.025	.108
AN-71	.002	.0002	.005	.015
AN-72	.002	.0003	.004	.014
Río Mosna	.0008	.0003	.001	.013
Lineamientos del agua receptora	.025	.03	.07	.13

I.9.6 Post-cierre

La predicción de la química del agua después del cierre y a largo plazo se basa en la implementación exitosa de medidas de cierre propuestas en la documentación del EIA, a saber:

- ☒ tratamiento del agua a largo plazo para el drenaje proveniente del Botadero Este
- ☒ tratamiento a largo plazo de la descarga del tajo
- ☒ recuperación de la superficie de los botaderos de desmonte
- ☒ recuperación general del lugar
- ☒ saturación de los relaves, limitando de esta manera la oxidación y la consecuente liberación de metales

En la Tabla I-11REF, se muestra la química del agua predicha para después del cierre en un promedio anual predicho. Se anticipa que dentro del período de post-cierre las concentraciones en las aguas receptoras alcanzarán un solo punto ligeramente elevado

sobre las condiciones de pre-minado

Tabla I-11 Química del Agua Receptora Predicha para Después del Cierre

	Cobre (mg/L)	Plomo (mg/L)	Molibdeno (mg/L)	Zinc (mg/L)
AN-11	.002	.002	.011	.019
AN-26	.002	.002	.01	.02
AN-30	.001	.003	.01	.016
AN-73	.001	.002	.009	.015
AN-74	.006	.0007	.003	.008
Río Puchca	.0005	.0004	.002	.009
Río Marañón	.0001	.0001	.0003	.001
AN-70	.004	.0004	.025	.11
AN-71	.002	.0002	.005	.015
AN-72	.002	.0003	.004	.014
Río Mosna	.0008	.0003	.001	.013
Lineamientos del agua receptora	.025	.03	.07	.13