



ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL PROYECTO
DE EXPLOTACIÓN “LAS NAVAS” ACTUALIZADO
Y REFUNDIDO SEPTIEMBRE 2022
DOCUMENTO DE MEJORA





Jesús Gallardo García
Director Técnico de Cinclus Soluciones

Alfonso Pérez Gago
Licenciado en Ciencias Ambientales

Zoë Rohrer Rodríguez
Doctora en Ecología

Susana de Murga de Abajo
Ingeniera Ambiental

Javier Cots Berbegal
Licenciado en Ciencias Ambientales

Andrés Martín Pastor
Graduado en Ciencias Ambientales

Diciembre 2022



1 INTRODUCCIÓN

Como consecuencia de la constante evolución del Proyecto LAS NAVAS, el contenido del Proyecto de Explotación y del Plan de Restauración del citado proyecto ha experimentado mejoras que han sido incorporadas al expediente en forma de documentación anexa y aclaraciones.

Entre las mejoras introducidas al Proyecto y su Plan de Restauración, y de cara al análisis del “ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN “LAS NAVAS” ACTUALIZADO Y REFUNDIDO SEPTIEMBRE 2022” presentado ante el Organismo Ambiental en noviembre de 2022 de acuerdo con *la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de Evaluación de Impacto Ambiental*, destaca la nueva consideración como Instalación de Residuos Mineros (IRM) del relleno de las cortas a partir de la rasante del terreno y de la berma visual proyectada alrededor de las cortas, el depósito temporal de estériles mineros y la planta de beneficio y sus instalaciones auxiliares.

La consideración de estas estructuras ahora como Instalaciones de Residuos Mineros (IRM) en el Proyecto de Explotación y en el Plan de Restauración, no tiene en sí incidencias desde el punto de vista ambiental, ya que los aspectos relacionados con la evaluación del impacto ambiental de estas instalaciones se hallaban ya contemplado y analizado en el Estudio de Impacto Ambiental presentado en noviembre de 2022 ante el Organismo Ambiental. Dicho de otra forma, la consideración de estas instalaciones ahora como Instalaciones de Residuos Mineros (IRM) en grado alguno modifica el análisis de las alternativas, el análisis de impactos, las medidas preventivas, correctoras y complementarias o el plan de vigilancia ambiental del Estudio de Impacto Ambiental.

Con vistas a lograr una total concordancia entre la información contenida en el Estudio de Impacto Ambiental y en el Proyecto de Explotación y Plan de Restauración del Proyecto LAS NAVAS, se elabora el presente documento mediante el que se introducen las mejoras descritas a continuación en la información inicial presentada.

A continuación, con objeto de sistematizar la información entregada, se detallan los capítulos modificados para que se incorporen y sustituyan a los originales del “ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN “LAS NAVAS” ACTUALIZADO Y REFUNDIDO SEPTIEMBRE 2022”, todo ello para que el presente documento de mejora forme parte integrante de la documentación a analizar por la Administración actuante en el expediente en tramitación.



2 MEJORAS INTRODUCIDAS AL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN "LAS NAVAS" ACTUALIZADO Y REFUNDIDO SEPTIEMBRE 2022

A modo de resumen, los capítulos reflejados a continuación que incluyen las mejoras descritas y que sustituyen a los del Estudio de Impacto Ambiental original son:

PARTE DEL EsIA	CAPÍTULO
Parte I. Introducción	1. Introducción
Parte II. Análisis de alternativas	11. Metodología de valoración de alternativas
Parte III. Descripción del proyecto	15.7.3. Berma visual
Parte III. Descripción del proyecto	15.10.1. Zona de explotación e instalaciones exteriores
	15.13. Gestión de residuos mineros
	15.13.1. Balance de residuos
	15.13.3. Parámetros constructivos y de diseño de las IRM
	15.13.4.6. Relleno del hueco e IRM sobre el mismo
	15.13.5.3. Relleno de los huecos mineros e IRM
Parte V. Impactos ambientales y vulnerabilidad del proyecto	21.2.2. Fase de Explotación
	21.3.2.3. Afecciones sobre el medio hídrico e hidrogeológico
Parte VIII. Epítome	40.2.4. Instalaciones de Residuos Mineros
Anexo XXVIII. Información adicional técnica de relleno con pasta cementada (PATERSON & COOKE).	

A continuación, se plasma el contenido completo de cada uno de estos capítulos mejorados para que se incorporen y sustituyan a los originales del "ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN "LAS NAVAS" ACTUALIZADO Y REFUNDIDO SEPTIEMBRE 2022" presentado ante el Organismo Ambiental en noviembre de 2022.

PARTE I. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

El proyecto sobre el que se realiza el presente Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) Refundido y Actualizado es el "Proyecto de explotación "Las Navas" actualizado y refundido septiembre 2022", de acuerdo con la *Ley 21/2013*, de 9 de diciembre, de Evaluación de Impacto Ambiental. La estructura y contenidos del presente estudio se desarrollan en base a la citada ley, los contenidos necesarios para abordar el procedimiento de Autorización Ambiental Integrada y dando respuesta a los requisitos expuestos en el Documento de Alcance asociado al EXPTE.: IA20/0629.

El proyecto presentado supone materializar y poner en operación las reservas y los derechos mineros de Ampliación a Retamar, cuya empresa promotora de explotación es *Lithium Iberia S.L.*, siendo el objeto principal la explotación y beneficio de la mineralización de Las Navas, caracterizada por Litio y



estaño, en mayor medida, y cuyo producto resultante irá destinado a la industria del almacenamiento energético. Los recursos minerales estimados, para una ley de corte de litio de 2.000 ppm, son un tonelaje de aproximadamente 85,75 Mt con una ley media de litio del orden de 4.400 ppm y de estaño de 479,6 ppm.

La implantación de este proyecto se plantea para un total de 30 años, siendo 2 años preoperacionales o labores preparatorias, los 4 primeros exclusivamente a cielo abierto, 2 compaginando cielo abierto y subterráneo y otros 22 exclusivamente en interior. La producción de mineral durante los 6 años de vida de la explotación a cielo abierto ascenderá a 9,67 Mt con un *ramp up* el primer año del orden de 500.000 t y picos de producción de 2.300.000 t/año y un descenso en los dos años finales en los que se iniciará la producción subterránea. La producción de mineral alcanzará un máximo de 1.800.000 t/año cuando la explotación se desarrolle en interior excepto los dos primeros años en que se considera una menor y los doce años finales en los que la producción irá decreciendo. Según proyecto, se estima una creación de unos 400 empleos directos y 1200 indirectos durante toda la vida del proyecto, incluyendo mina y planta.

El desarrollo del proyecto conlleva una serie de impactos sociales y económicos generalmente positivos y unas afecciones al medio ambiente que son objeto de estudio y análisis detallado en este EsIA Refundido y actualizado.

Para la configuración final del proyecto, se han ido valorando de forma separada en cascada todas las instalaciones del proyecto que fuesen técnica y económicamente viables, para que junto con la alternativa cero, de no actuación, se lleve a cabo una comparación ambiental y socioeconómica con el fin de seleccionar la opción más favorable. El proyecto seleccionado implica:

- El desarrollo de una explotación mixta que contempla labores mineras a cielo abierto y subterránea.
- La generación de una escombrera permanente en zonas agrícolas del T.M. de Holguera y separada por una distancia aproximada de 3,8 kilómetros de la zona de extracción y procesado de mineral, ocupando una superficie en planta de 80,9 ha y una altura máxima de 35 m sobre la superficie.
- El establecimiento de un depósito de carácter temporal de material no inerte no peligroso procedente de la planta de beneficio, formado por dos celdas ocupando una superficie de 24,83 ha, con una altura máxima de 15 m sobre la cota original. Estará dotado de una berma adicional de protección para evitar daños incontrolados en caso de un evento catastrófico. Dicho depósito estará vaciado en el año 8 de explotación y completamente restaurado en el año 10.
- El empleo del estéril de planta como material de relleno de los huecos mineros subterráneos y a cielo abierto. Sobre la propia corta rellena se ubicará la instalación de residuos mineros (IRM) de planta con el fin de reducir la huella de afección sobre otra área no alterada. Esta instalación tiene una capacidad de 1.664.005 m³, alcanzando una altura máxima de 21 metros.
- El establecimiento de una berma perimetral que rodea las instalaciones y hueco minero generando una barrera física naturalizada que amortigua notablemente los impactos de ruido, polvo, emisiones y paisaje, entre otros. Esta berma, al generarse a partir de estériles de mina y de tierra vegetal de las labores de construcción y establecerse por un periodo superior a tres años, se ha venido a considerar, de acuerdo con el Real Decreto 975/2009, instalación de residuo minero, cuya



capacidad es de 650.000 m³, incluyendo 585.000 m³ de estéril minero y 65.000 m³ de tierra vegetal. La altura varía entre 6 y 8 metros.

- La construcción y operación de una Planta de Beneficio que desarrolla un proceso minero hidrometalúrgico para la obtención del hidróxido de litio como producto final (LiOH·H₂O) de alta pureza, así como cuatro subproductos comercializables sulfato de potasio (K₂SO₄) y sulfato de sodio (Na₂SO₄) y concentrados de estaño (Sn) y tántalo (Tn). El tratamiento en la Planta de Beneficio se divide en los procesos de Trituración y molienda, Concentración gravimétrica, Calcinación del mineral todo-uno e Hidrometalurgia del material calcinado.
- Una gestión de aguas en condiciones de vertido cero de aguas industriales o contaminadas. Para ello, toda el agua requerida en la Planta de Beneficio será recuperada y reutilizada en la operación.

Analizando el proyecto en todas sus etapas se han identificado un total de 38 acciones susceptibles de ocasionar afecciones ambientales. Su análisis detallado ha permitido extraer conclusiones que permiten establecer la jerarquización de las acciones y factores ambientales más relevantes.

Así, según se expone en apartados posteriores, no se han caracterizado impactos con clasificación de severo o crítico, considerándose el proyecto como COMPATIBLE con los factores del medio analizados. Sin embargo, dicho análisis y clasificación de impactos está supeditado al cumplimiento de ciertos condicionantes que dada la naturaleza y escala del proyecto no pueden ser resueltos en la fase actual de desarrollo, estos son:

- Afecciones a atmósfera: Se estiman emisiones que no superan el límite establecido en el *Real Decreto 102/2011*. Su modelado y estimación se ha realizado a través de una aproximación teórica de emisiones equiparándose a la industria cementera (ANEXO VIII.B de Estudio de dispersión de contaminantes) y en ausencia de datos de emisión de los hornos provistos por el fabricante (KUTEC). Quedan por tanto sujetas a una validación posterior con materiales representativos de la operación.
- Afecciones al medio hídrico: El excedente del agua de bombeo no empleado posteriormente en el tratamiento del mineral (flujo de agua fresca) será monitorizado en distintos puntos (en la balsa de agua fresca, previo y posterior al punto de vertido) para asegurar cumplir con las normas de calidad ambiental establecidas para su vertido a cauce. De igual manera, el proyecto minero prevé el uso de estériles de planta para su uso en forma de pasta (ANEXO XXVIII Nota técnica referente a rellenos con pastas cementadas, Paterson & Cooke Iberia). El cementado de la pasta resultante con cemento Portland sulfuro resistente (SR 42.5) busca encapsular las partículas de materiales metálicos y sulfatos presentes para la obtención de diferentes beneficios ambientales. Dichos resultados están ampliamente referenciados en bibliografía, experiencias y estudios previos.

Vinculado a lo anterior, el análisis de impactos ha permitido elaborar una serie de medidas Preventivas, Correctoras y Complementarias que, junto con la implementación del Plan de Vigilancia Ambiental y el Plan de Restauración asociado al proyecto minero, ha permitido reducir significativamente los impactos previstos y alcanzar la clasificación de “Compatible” o “Moderado” para la totalidad de estos.

Además, se ha constatado la ausencia de afecciones significativas a la Red Natura 2000, aunque se ha contemplado un riesgo de disminución de la conectividad entre espacios Natura 2000. Por ello, se han



habilitado medidas conducentes al fomento de la conectividad ecológica, incluyendo un corredor ecológico, que pretende mejorar netamente la funcionalidad de los hábitats y el tránsito de fauna alrededor y a través del proyecto minero. Su eficacia será máxima al finalizar la fase de conformación de la escombrera permanente y consecuente reducción de intensidad del tráfico rodado.

PARTE II. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS

11. METODOLOGÍA DE VALORACIÓN DE ALTERNATIVAS

En este apartado se analiza cada una de las alternativas de diseño y ubicación de las diferentes instalaciones del proyecto:

- Método de extracción.
- Proceso de beneficio del mineral.
- Cortas de explotación.
- Escombrera permanente.
- Depósito temporal.
- Ubicación de planta de beneficio e instalaciones auxiliares.
- Accesos.
- Balsa de agua fresca.
- Planta solar fotovoltaica.
- Línea eléctrica.

Respecto a las instalaciones de residuos mineros (IRM) denominadas “berma” y “sobre relleno cortas”, no se han considerado otras alternativas ya que, el motivo de generación de la berma visual está es el diseño de una medida mitigadora de impactos (visual, atmosférico, etc., al actuar como pantalla para reducir la dispersión del polvo y ruido) y, por tanto, será perimetral rodeando la corta, la planta de beneficio y sus instalaciones auxiliares.

Respecto a la instalaciones de residuos mineros sobre las cortas, ésta surge una vez la cota original del terreno es superada por el relleno del hueco minero (cortas norte y sur) con estéril de planta. La ubicación de esta instalación se plantea y establece sobre el relleno de la corta para reducir los potenciales impactos del proyecto desde la fase de diseño, ya que cualquier otra ubicación daría lugar a una mayor huella de afección con los impactos que ello supone sobre el suelo (ocupación), vegetación (eliminación de hábitats), sistema hídrico (riesgo de contaminación en función de la proximidad a masas de agua), etc., además de suponer una mayor distancia desde la planta, por lo que la afección a la atmósfera por polvo y emisiones sería mayor.

La ubicación seleccionada, sobre el relleno de la corta hasta la rasante del terreno únicamente supondría una afección al paisaje, por la modificación de este ya que no se recuperaría la orografía original, aunque se mitigará dicho impacto con las plantaciones e instalación de la laguna como



acciones de restauración. Sí ha sido analizada la capacidad y la altura que alcanzará la instalación sobre la corta en función de las distintas alternativas de corta estudiadas.

Para el análisis de alternativas del resto de instalaciones del proyecto sólo se han incluido alternativas técnica, económica y ambientalmente viables, y compatibles con el resto de las partes del proyecto.

La metodología de diseño y planteamiento de alternativas ha seguido un método en “cascada”, de forma que decisiones previas influyen los criterios de generación de alternativas de siguientes valoraciones.

Además, el estudio de alternativas se ha realizado sin tener en cuenta las medidas preventivas o correctoras definidas con posterioridad, como por ejemplo las plantaciones para crear un corredor ecológico o el establecimiento de una berma visual para prevenir el impacto paisajístico, emisión de ruido y polvo (Parte VI de Medidas Correctoras).

Para realizar la justificación de la elección de las alternativas de las diferentes instalaciones que componen el proyecto, se han establecido criterios cuantitativos para valorar cada una de ellas. Este análisis ha permitido realizar una evaluación de los potenciales impactos de cada una de las alternativas consideradas.

En primer lugar, se describen las diferentes instalaciones cualitativa y cuantitativamente cuando ha sido requerido por las características que se estén tratando.

En segundo lugar, se ha llevado a cabo una metodología de análisis de impactos basada en un análisis cartográfico. Para ello, se han cartografiado los diferentes factores ambientales estudiados (fauna, flora y vegetación, sistema hidrográfico, arqueología, montes de utilidad pública, vías pecuarias, caminos públicos, etc.). Posteriormente, se ha analizado esta información en base a la cartografía de todas las alternativas estudiadas, con el fin de obtener tanto los impactos directos, como sería la ocupación de suelo o eliminación de capa vegetal, como los indirectos, tales como impactos a la fauna y flora debido a afecciones al medio hídrico.

En tercer lugar, se analizan los resultados para cada uno de los factores estudiados.

A continuación, se explica cómo se han tratado los datos para casos concretos de factores susceptibles de ser afectados:

- En el caso de las afecciones a la atmósfera por polvo y ruido, se ha extrapolado a partir de sus estudios específicos (**ANEXO VIII** para el polvo y **ANEXO XI** para el ruido), la expansión de la afección para cada instalación, generándose áreas de influencia concretos para las mismas.
- Para las afecciones al clima, se han realizado estimaciones cualitativas acerca de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) a partir de la información disponible (**ANEXO IX** de huella de carbono), realizando las estimaciones de forma indirecta cuando fuera necesario, a partir de distancias de transporte, volúmenes de material a desplazar, etc.
- Respecto al medio hídrico, se han utilizado estudios hidrológicos (**ANEXO V**) e hidrogeológicos

**(ANEXO VI).**

- Respecto al suelo y geología, se ha utilizado información relativa a la ocupación en superficie y las modificaciones a la topografía y geomorfología que podrían ocasionarse.
- Para la flora, se ha utilizado el estudio de campo de hábitats y vegetación (**ANEXO III**), así como el inventario forestal nacional y el específico realizado (**ANEXO I**).
- Respecto a la fauna, su estudio comprende áreas específicas de relevancia para las aves, herpetos, mamíferos y artrópodos (**ANEXO II**). Se ha determinado de manera cuantitativa la afección a estas áreas, y se ha valorado de manera cualitativa dicho impacto, ya que la perturbación varía según la especie, existiendo, por ejemplo, algunas más resilientes que otras a los cambios producidos de manera antropológica.
- A pesar de que el proyecto no se localice sobre espacio Red Natura 2000, sí se ha estudiado las repercusiones a la misma debido a la cercanía del proyecto. Utilizando los mismos criterios que los establecidos en el **ANEXO IV** (Evaluación de repercusiones a Red Natura 2000) se ha generado un área de influencia de 500 m en torno a las ZEC/ZEPA. Aquellas instalaciones que se encuentren dentro de esta área de influencia y solapen espacialmente elementos clave de flora, se han evaluado de formar conservadora asumiendo que esta sería afectada en la superficie evaluada. De distinta manera se ha tratado a los elementos clave de fauna, ya que estos no son estáticos. Las instalaciones que se han considerado susceptibles de generar afección a los elementos clave faunísticos de las ZEPA son los accesos, cortas, instalaciones industriales (planta de beneficio, balsas de agua de proceso, etc.), balsa de agua fresca y línea eléctrica. El resto de las instalaciones se encuentran a una distancia suficiente para no generar afección.
- En cuanto a paisaje, para el caso de las escombreras, al tratarse de una instalación permanente, y por tanto, que no se desmantelará, se ha llevado a cabo un estudio de cuencas visuales desde distintos puntos de observación dentro de un radio de 30 km. También se han tenido en cuenta los análisis realizados en el Estudio de Impacto Paisajístico (**ANEXO XIII**), extrapolarlo las conclusiones cuando era necesario.
- Para el medio territorial se ha considerado la cartografía de Montes de Utilidad Pública y Vías Pecuarias disponibles en el Sistema de Información Territorial de Extremadura (SITEX).
- Para calcular afecciones a los núcleos habitados, se han tenido en cuenta las afecciones directas a los núcleos de población en el entorno del proyecto (como emisión de polvo, ruido, impacto visual), así como afecciones indirectas, como a la calidad de vida.
- Respecto a las infraestructuras, se han analizado las infraestructuras de comunicación y los caminos públicos presentes en el entorno de estudio.
- Para el patrimonio arqueológico y etnográfico, se ha utilizado el inventario detallado del **ANEXO XIV**.
- Para la economía y población, se han considerado los impactos positivos que puede suponer el proyecto, debido a la creación de empleo, freno al despoblamiento... Estos se han relacionado fundamentalmente con las alternativas al método de extracción y al proceso de la planta de beneficio, ya que de estas dependen el resto de las instalaciones y definen el proyecto.

Finalmente, se utilizan los resultados cuantitativos y la valoración cualitativa de estos para hacer un análisis final, basado en la Metodología de CONESA. Este análisis permite llevar a cabo la comparación y selección global de alternativas. Se realiza a través de un análisis multicriterio en el cual se genera una tabla en la que en las filas se representan los factores ambientales y socioeconómicos, con sus



respectivos pesos. Esto es el valor de importancia, sobre 1.000, que tiene cada factor en el entorno de estudio. En las columnas, se incluyen las distintas alternativas por instalación. Las alternativas se valoran del 1 al 5, siendo 1 el valor óptimo. Así, se obtiene un índice multiplicando este valor por el peso del factor dividido entre 1000. Para finalizar, se realiza el sumatorio y aquella alternativa que obtenga menor valor, será la seleccionada.

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.7 INFRAESTRUCTURAS DE SUPERFICIE

15.7.3 Berma visual

Con el fin de disminuir el impacto visual de las cortas y las instalaciones de mina se realizará la construcción de una berma visual que las rodee a partir de estériles de mina y de tierra vegetal de las labores de construcción. Como la temporalidad de esta será superior a tres años, y alberga estéril de mina, se considera instalación de residuos mineros. Esta tendrá una altura media de 8 m, pudiendo alcanzar en algunos tramos la referencia de 3 m por limitaciones constructivas de espacio. El ángulo de talud será siempre de 30° y contará como máximo de dos bancos de 4 m de altura.

Las zonas de menor altura tendrán una base inferior de 12 m y una pequeña berma superior de 1,6 m como máximo, que pueda permitir el paso de vehículos ligeros y camiones de riego.

Los sectores de mayor altura que cuenten con dos bancos tendrán una berma intermedia y una superior de 2 m de ancho, para de nuevo poder permitir el paso de vehículos ligeros y camiones de riego, con el fin de regar la berma desde la parte superior. A pesar de necesitar una base inferior mucho más ancha (máximo 34 m), no supera el límite de ocupación decidido que cuenta con 30 m de protección alrededor del borde exterior de la berma visual de 12 m de ancho.

En las siguientes figuras se muestran los diseños máximos y mínimos de las posibles bermas visuales.

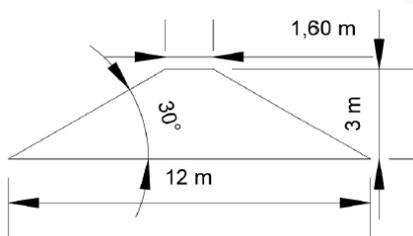


Figura 47. Diseño Berma Visual (altura 3 m)

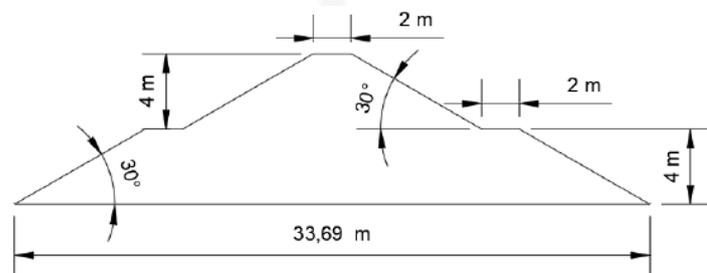


Figura 48. Diseño Berma Visual (altura máxima 8 m)

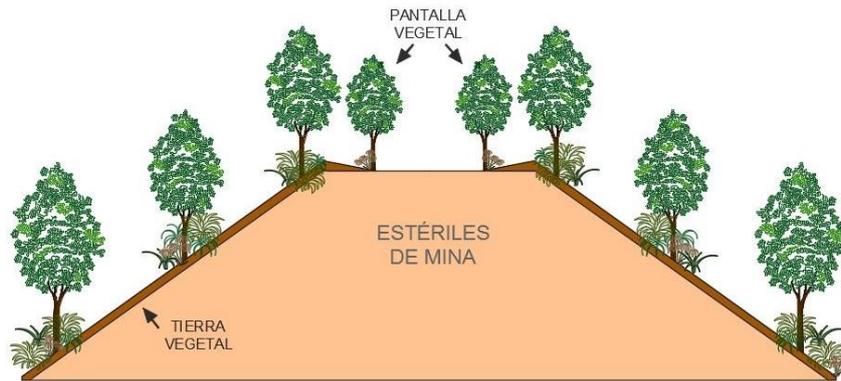


Figura 49. Perfil tipo de la berma visual



Figura 50. Localización Bermas Visuales (verde claro)

En la tabla se muestran los volúmenes de cada parte de la Berma.

	Área (m ²)	Volumen (m ³)
Berma Norte	20.950	16.513
Berma Este	26.663	21.045
Berma Sur	8.341	6.486
Berma Oeste	24.560	19.350
Total	80.514	63.394

Tabla 19. Volumen de la berma visual

En la zona del depósito temporal se creará así mismo una berma visual de similares características durante el tiempo de utilización de esta.

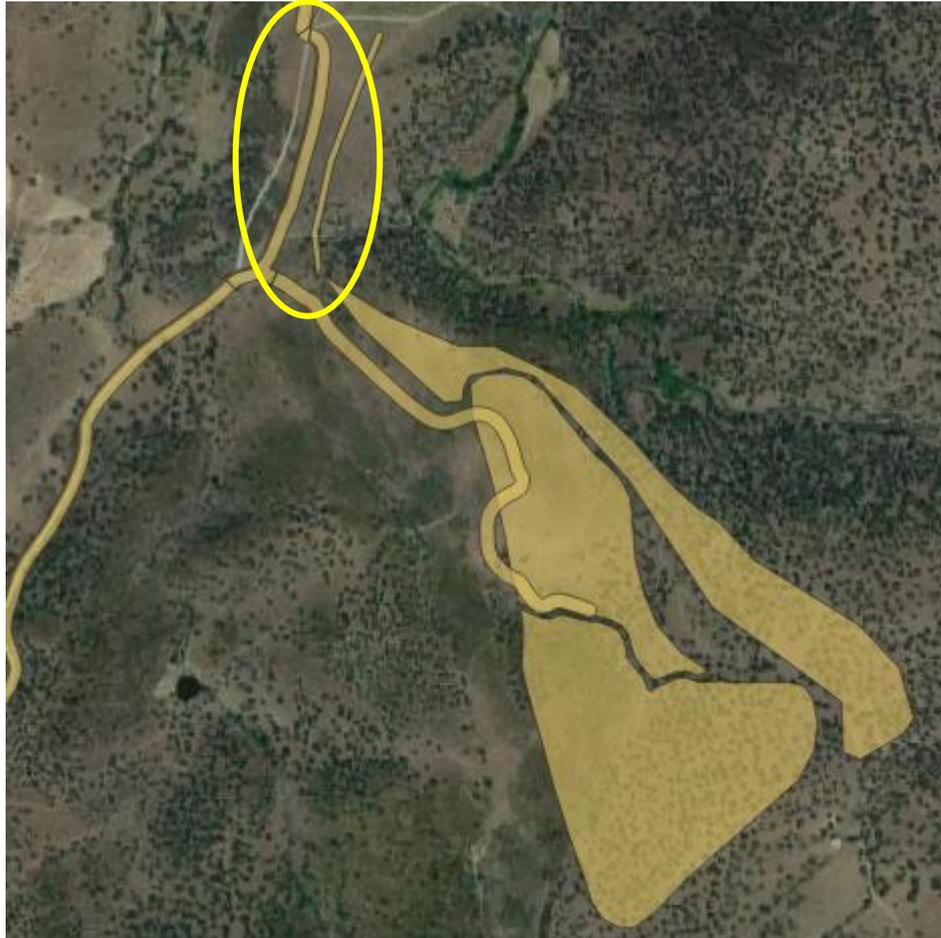


Figura 51. Berma visual sobre el depósito temporal

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.10 NECESIDADES DEL USO DE LA TIERRA

15.10.1 Zona de explotación e instalaciones exteriores

Se trata de la zona situada al sur, en esta zona además de las cortas a cielo abierto, que ocuparán una superficie de 27,19 ha, también se encuentran los dos emboquilles de la explotación subterránea, todas las instalaciones y las infraestructuras para el correcto desarrollo de la explotación (planta de beneficio, oficinas generales, comedores, laboratorio, naves almacén, parque móvil y aparcamiento, etc.). En la figura siguiente se representan todas estas instalaciones.

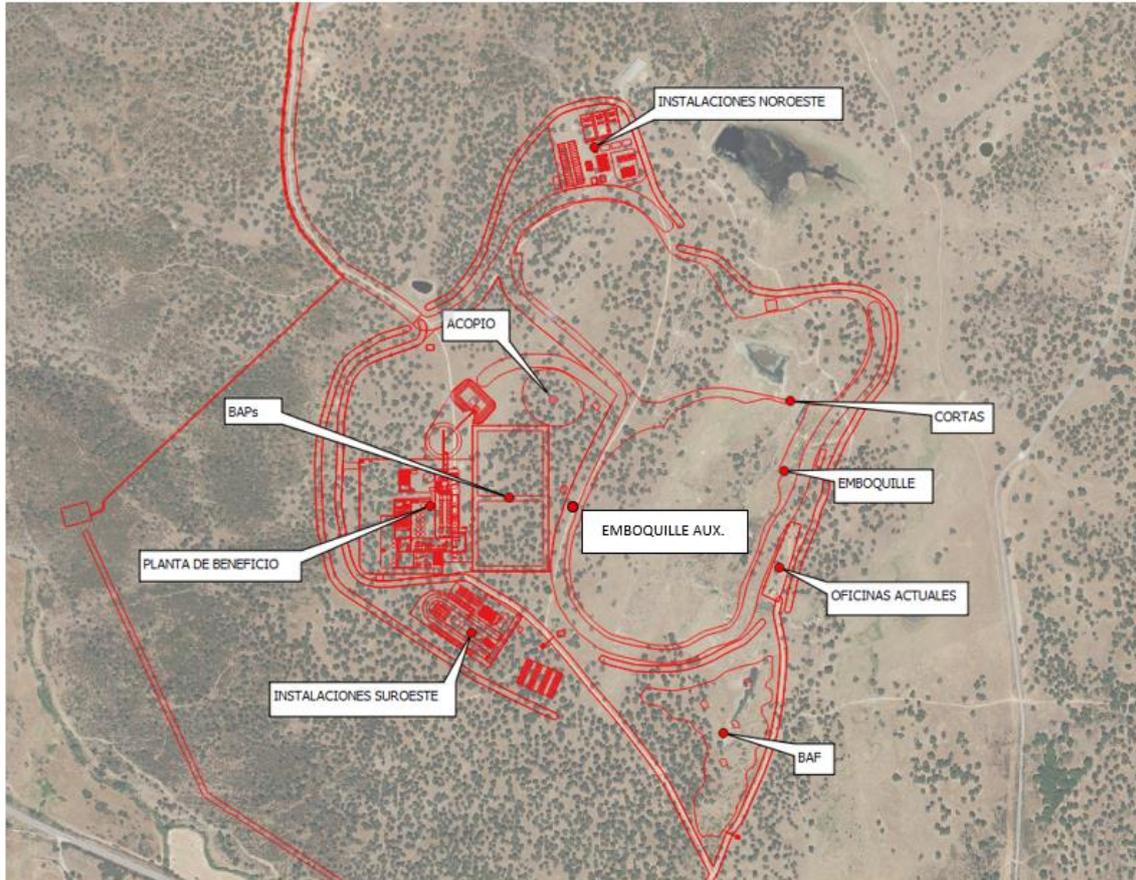


Figura 90. Distribución en la zona de explotación e instalaciones

En la zona del proyecto de explotación las edificaciones implicadas se dividen en tres zonas:

- **Instalaciones Noroeste**, próxima a las cortas norte de la explotación a cielo abierto, donde se ubican los edificios necesarios para la explotación: instalaciones de gasóleo, sala de control de mina, aparcamiento de personal de mina, oficinas mina, taller almacén mina, aparcamiento de maquinaria de mina, taller, almacén, almacén de testigos, laboratorio de muestras, Estación de acondicionamiento y readaptación de aguas. Estas instalaciones ocuparán un total de 2,19 ha.
- **Instalaciones Suroeste**, situado al sur de la corta sur y próximo a la planta de beneficios, donde se sitúan las siguientes construcciones: oficinas generales, comedor, vestuarios, almacén de testigos, taller, control de accesos, aparcamiento de personal, sala de primeros auxilios, local comité de empresa, Estación de acondicionamiento y readaptación. Estas instalaciones ocuparán un total de 1,69 ha.
- **Instalaciones actuales**, las oficinas generales se encuentran actualmente en el acceso este de la explotación. Esta zona dispone actualmente de unas edificaciones existente, situadas al este de la corta sur que cuentan con 5 edificios independientes y que ocuparán 0,047 ha.

Entre la zona de instalaciones NW y SW se localiza **la planta de beneficio** de 5,43 ha de superficie, además se sitúa una plataforma asfaltada, para el acopio de mineral. Esta plataforma ocupará una superficie de 0,94 ha, siendo su ubicación exacta al Oeste de la Corta Sur.



Además, en la misma zona se encuentran las dos **balsas de agua de proceso** con una superficie que ocupará 1,44 ha cada una y al sur de las instalaciones actuales se encuentra la balsa de agua fresca de 3,53 ha.

Encontramos **tres subestaciones eléctricas**, cada una de ellas ocupa una superficie de 0,17 ha.

No se contabiliza para la ocupación del terreno la instalación de residuos mineros sobre las cortas, al ubicarse sobre superficie ya alterada por el proyecto.

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS

El proyecto contempla la realización de cuatro instalaciones de residuos mineros, además del relleno de los huecos de explotación creados tanto a cielo abierto como por la explotación subterránea cuya ubicación, diseño, parámetros constructivos se han valorado teniendo en cuenta condicionantes técnicos, sociales y ambientales.

Las instalaciones de residuos de mina (IRM) en superficie serán cuatro: escombrera permanente, depósito temporal, berma y “sobre el relleno de la corta”. La escombrera permanente albergará los estériles de mina hasta que finalice la explotación a cielo abierto. El depósito temporal albergará los residuos de planta durante los dos primeros años, mientras que no sea posible el relleno de los huecos de explotación a cielo abierto y subterráneos. La berma visual alberga estériles de mina durante toda la vida del proyecto, por lo que al superar el plazo establecido por el *Real Decreto 975/2009* de tres años se considera instalación de residuo minero a pesar de tratarse de una medida mitigadora de impactos. Respecto a la última instalación se cataloga como IRM el relleno de estas cortas que se sitúan por encima de la cota original del terreno.



Figura 108. Situación de la escombrera permanente, el depósito temporal y el relleno de los huecos mineros en superficie

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS

15.13.1 Balance de residuos

Se generan dos tipos de residuos, cuyas cantidades y gestión se resume a continuación:

- **Estériles de mina:** se diferencian dos tipos de estériles de mina.
 - **Estériles de mina provenientes de la explotación a cielo abierto,** procedentes de la excavación de las zonas no mineralizadas. Se generan un total de 15,95 Mm³ (volumen in situ). De estos, 16,33 Mm³ (esponjados y compactados) serán almacenados en la escombrera permanente, berma y el resto utilizados para el relleno de las cortas. Inicialmente se transportan todos a la escombrera, pero una vez se van agotando las cortas se utilizan para la regularización de los taludes antes de proceder a su impermeabilización. Se utilizan también para labores de restauración: creación del caballón perimetral, conformación final de las cortas, relleno de excavaciones realizadas en la preparación del proyecto, etc.
 - **Estériles de mina provenientes de la explotación de interior,** procedentes de las galerías de acceso y desarrollos que discurren por parte no mineralizada de la explotación subterránea.



Se generan un total de 1,33 Mm³ (volumen in situ) y serán reubicados en su totalidad en los huecos de interior.

- **Estériles de planta:** el estéril de planta se genera durante el proceso de beneficio del mineral. Se generan un total de 30,00 Mm³ de estériles de planta. Estos estériles se gestionan de la siguiente manera:
 - Depósito temporal: alberga los dos primeros años de residuos de planta, una vez estén finalizadas y preparadas las cortas, serán trasladadas a las mismas de forma definitiva. En este depósito se almacenen temporalmente 1,8 Mm³.
 - Relleno de las cámaras de interior: según se vaya teniendo hueco disponible, estos estériles se utilizan para rellenar las cámaras, previo paso por la planta de pasta para ser mezclados con cemento. Se destinan un total de 10,94 Mm³ de residuos con del orden de un 13,9 % de humedad al relleno de interior.
 - Relleno de cortas e IRM sobre las mismas: una vez estén las cortas debidamente impermeabilizadas, se trasladarán los estériles de planta hasta las cortas. Se destinan un total de 19,06 Mm³ de residuos con del orden de un 13,9 % de humedad al relleno de interior.

Los residuos hidrometalúrgicos permanecerán acopiados hasta su traslado, por lo que se ha previsto un acopio temporal en la zona de planta con una capacidad de hasta 3.000 m³. Este acopio intermedio dispondrá de todos los elementos (impermeabilización, drenajes, etc.) necesarios para garantizar la no afección al entorno, cuyo diseño de capas es idéntico al definido para la escombrera permanente.

A continuación, se muestra la figura que representa la gestión de los residuos durante toda la vida del Proyecto de Las Navas, los residuos mineros serán gestionados conforme al plan de residuos de acuerdo con el *Real Decreto 975/2009*.

Gestión de residuos del proyecto Las Navas

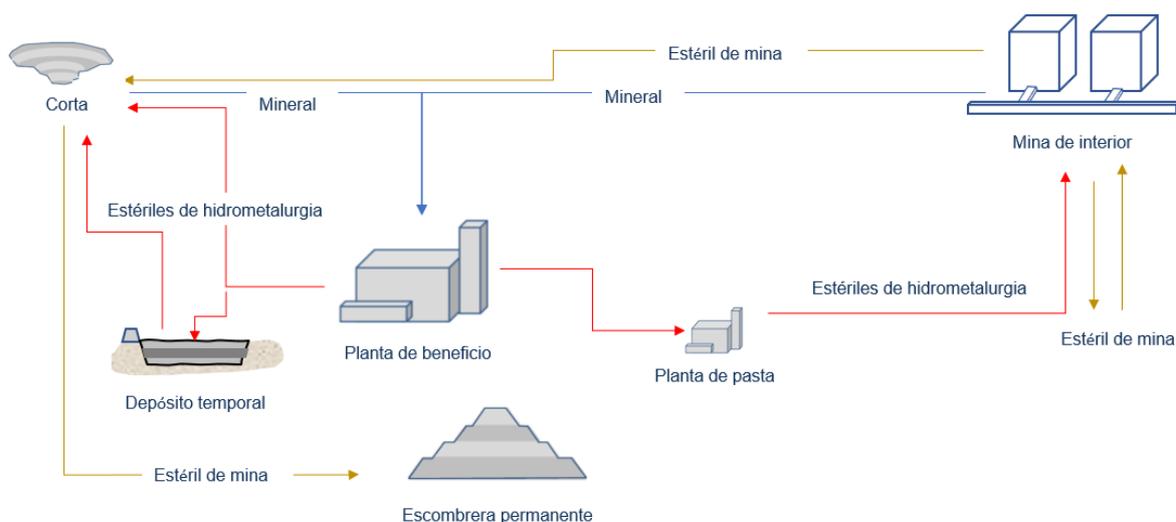


Figura 109. Gestión de residuos.



PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS

15.13.3 Parámetros constructivos y de diseño de las instalaciones de residuos mineros

Las instalaciones de residuos en superficie serán dos: uno permanente y otro temporal, además del relleno de los huecos de explotación generados tanto por la actividad a cielo abierto, como por la explotación subterránea. La escombrera permanente albergará los estériles de mina. El depósito temporal albergará los residuos de planta durante los primeros años, mientras que no sea posible el relleno de los huecos de explotación a cielo abierto y subterráneos. Su ubicación, diseño, parámetros constructivos se han valorado teniendo en cuenta condicionantes técnicos, sociales y ambientales.

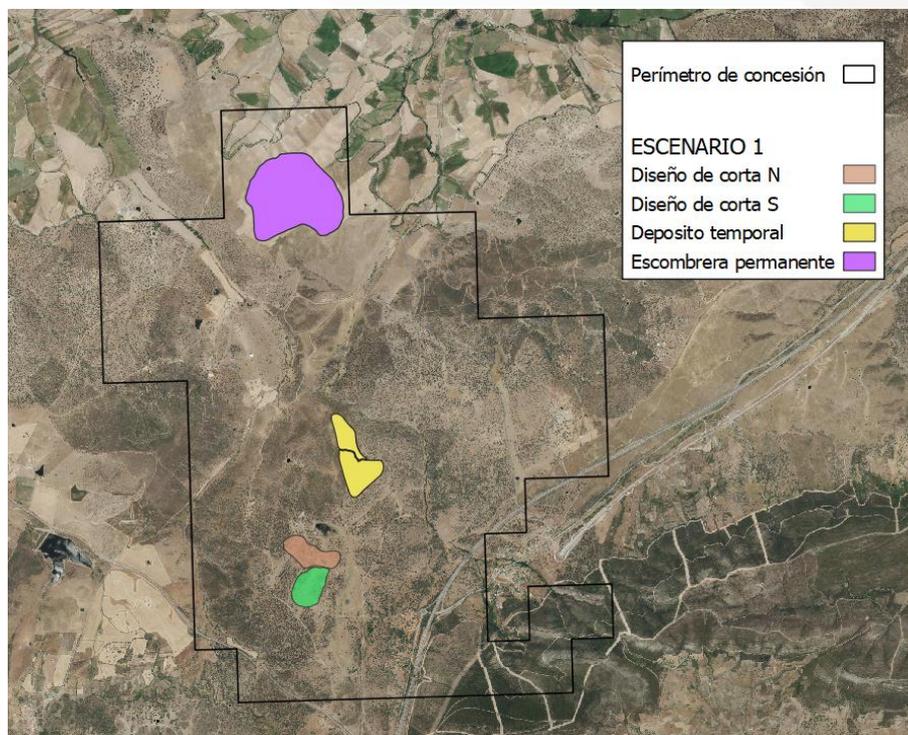


Figura 110. Situación de la escombrera permanente, el depósito temporal y el relleno de los huecos mineros en superficie

15.13.3.1 Escombrera permanente

Se ha previsto la construcción de una escombrera permanente al Norte de la explotación a cielo abierto a una distancia de 3.800 m, medida en línea recta, de las cortas. Tendrá capacidad para albergar un máximo de 16,33 Mm³ de material inerte ocupando una superficie en planta de 80,90 ha y una altura máxima de 35 m sobre la superficie. Los taludes de esta escombrera se han diseñado con un ángulo continuo de 25º que asegura la estabilidad de la instalación y posibilita su revegetación posterior.



Figura 111. Vista 3D de la escombrera permanente

Los residuos que se van a almacenar en esta escombrera están clasificados como inertes según lo establecido en los RD 975/2009 y 777/2012, pero aun así la escombrera dispondrá de un sistema de impermeabilización en la base y un sistema de drenaje que garantice la seguridad de las aguas y permita tener un control durante y tras la operación del contenido en arsénico, y otras sustancias potencialmente contaminantes, de los potenciales lixiviados generados (ver apartado de Medidas Preventivas, PARTE VI, apartado SISTEMA HIDROLÓGICO E HIDROGEOLOGÍCO).

La clasificación de esta instalación de residuos mineros se ha definido en el plan de restauración tal y como establece el RD 975/2009 y los criterios de riesgos contemplados en la Decisión 2009/337/CE, de 20 de abril de 2009. Atendiendo a las tablas de valoración y a las características de los materiales almacenados en la instalación, la clasificación de la escombrera permanente es de categoría NO A.

15.13.3.2 Depósito temporal de residuos hidrometalúrgicos

Para dar acogida a los residuos hidrometalúrgicos procedentes del tratamiento del mineral que no puedan ser ubicados en los huecos de explotación realizados en los primeros años de vida del proyecto, se llevará a cabo la construcción de un depósito temporal con capacidad suficiente para albergar 1.800.000 m³ de material. La instalación está situada en una zona de vaguada ocupando temporalmente una superficie de 24,83 ha. El depósito temporal se habrá vaciado al final del año 8 y quedará completamente desmantelado y restaurado a mediados del año 10.

Cada una de las celdas que componen el depósito, situado en ladera, constará de una zona excavada en la mitad sur y un dique de contención construido en relleno en la zona norte. El dique de contención se ha diseñado con un ángulo de talud exterior de 25°, ángulo de talud interior de 30°, altura máxima de 15 m sobre la cota original del terreno y anchura de berma en coronación de 10 m.

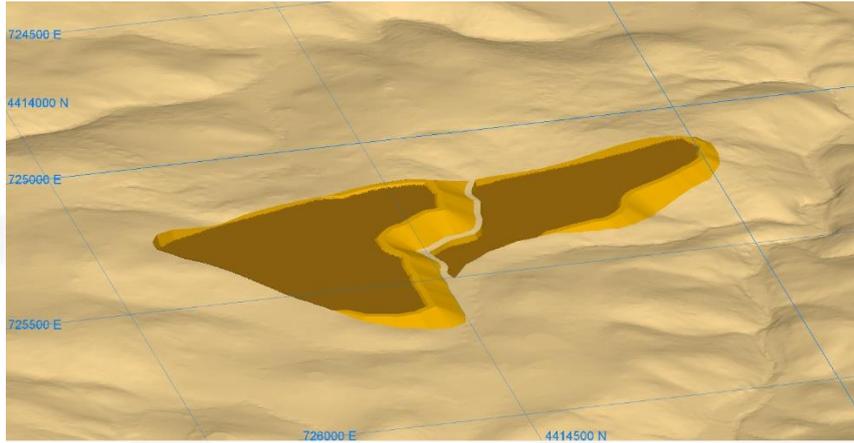


Figura 112. Vista 3D del depósito temporal

El depósito está diseñado para almacenar un total de 1.930.000 m³ considerando el llenado hasta un metro por debajo de la coronación del dique. Sin embargo, considerando el momento de máximo llenado, los residuos se sitúan 2 metros por debajo de esta cota de coronación.

En este sentido, cabe destacar que el depósito cuenta con un volumen de seguridad de 130.000 m³. En el hipotético caso de que se diera un evento de fuertes lluvias, el depósito tiene capacidad suficiente para almacenar esta agua sin que se produzca un rebose. Considerando el peor de los escenarios, el del periodo de retorno de 500 años (T=500), las lluvias serían de 142 mm/día, lo que supone un volumen de agua sobre el depósito de 26.294.850 l (26.295 m³) (considerando que la superficie de la lámina de agua un metro por debajo de coronación es de (185.175 m²). Es decir, el depósito tiene una capacidad para albergar el agua caída durante 24 días seguidos de lluvia del T=500, hecho prácticamente imposible de que ocurra.

El dique está diseñado con todas las medidas de seguridad, considerando eventos naturales posibles como por ejemplo un terremoto. No obstante, para estar del lado de la seguridad, se diseña una berma de protección a inmediatamente al Noreste de los diques. Esta berma se construye para evitar cualquier tipo de daño en el caso de un evento catastrófico provocado imposible de predecir.

En el hipotético caso de la rotura del dique del depósito, cualquier residuo será retenido por la berma sin causar ningún tipo de daño adicional. Esta berma tendrá 10 metros de altura y una anchura de berma en coronación de 2 metros. Se ha diseñado con un ángulo de talud exterior de 30°, ángulo de talud interior de 35°.

Los residuos depositados en el depósito pierden humedad con relativa rapidez por lo que se solidifican y ganan consistencia.

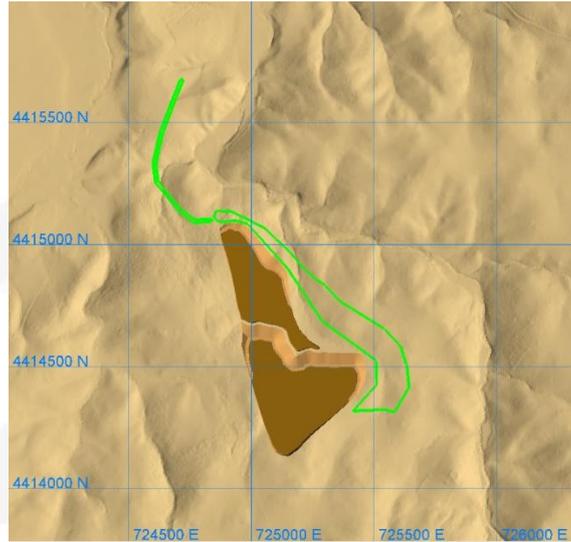


Figura 113. Ubicación de la berma de protección (en verde)

Los residuos que se van a almacenar en este depósito temporal están clasificados como no inertes no peligrosos según lo establecido en los *Real Decreto 975/2009* y *777/2012*, sin embargo, hay varios aspectos que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar los sistemas de protección. Los estériles para almacenar en el depósito temporal corresponden a estériles de planta, caracterizados como no inertes no peligrosos.

La clasificación de esta instalación de residuos mineros se ha definido en el plan de restauración tal y como establece el *Real Decreto 975/2009* y los criterios de riesgos contemplados en la *Decisión 2009/337/CE, de 20 de abril de 2009*. Atendiendo a las tablas de valoración y a las características de los materiales almacenados en la instalación, la clasificación del depósito temporal es de categoría NO A.

15.13.3.3 Berma visual

Esta berma visual se distribuye de forma perimetral en torno a la zona de Planta de Beneficio y cortas, con el fin de armonizar paisajísticamente la zona de instalaciones del proyecto. Se trata de una medida de mitigación de impactos que minimizan los impactos de polvo, ruido, flora y fauna, entre otros.

Esta berma alberga estériles de mina durante toda la vida del proyecto, por lo que es considerada como IRM, al superar el plazo de permanencia establecido por el *Real Decreto 975/2009* de tres años.

15.13.3.4 Relleno del hueco minero e IRM sobre el relleno de las cortas

La remodelación del terreno en la explotación a cielo abierto consistirá en una adecuación morfológica que se adapte al entorno y que permita una correcta revegetación de este de acuerdo con el plan de restauración planteado. Tendrá capacidad para almacenar $20,73 \text{ Mm}^3$ de material repartido de la siguiente manera: $19,07 \text{ Mm}^3$ de estériles de planta y $0,96 \text{ Mm}^3$ de estériles de mina y $0,71$ de materiales para el cierre y restauración. No obstante, se consideran IRM el relleno de estas cortas que se sitúan por encima de la cota original del terreno.



Esta instalación de residuos mineros tiene una capacidad de 1.664.005 m³, alcanzando una altura máxima de 21 metros.

El relleno de la explotación subterránea se realizará con pasta consistente en una mezcla de estériles del tratamiento de mineral, agua y un conglomerante (cemento). Su deposición en los huecos creados mejorará la estabilidad de la explotación subterránea y posibilitará la extracción de las cámaras vecinas, pilares y niveles superiores, aumentando la recuperación del yacimiento.

La distribución de la pasta de relleno hasta los diferentes subniveles se llevará a cabo por gravedad desde el taladro de servicio; por este taladro circulará la pasta necesaria para el relleno integral de las zonas explotadas. Se ha considerado una eficiencia del relleno de los huecos subterráneos del 95%, por lo que se tendrá capacidad para almacenar hasta 10,34 Mm³ de estériles de planta.

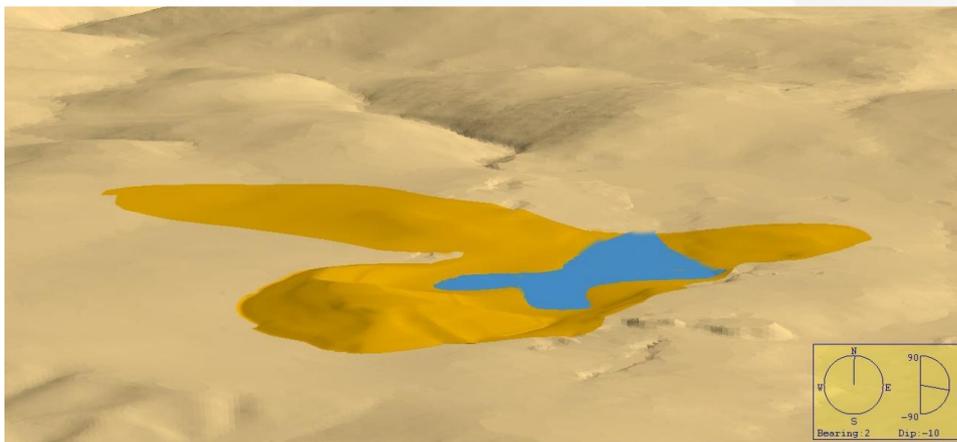


Figura 114. Vista 3D del relleno del hueco minero e IRM sobre el mismo

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS

15.13.4 Método constructivo de las IRM

15.13.4.6 Relleno del hueco e IRM sobre el mismo

El relleno se divide en dos zonas, la corta Norte y la corta Sur y corresponde a la zona de explotación a cielo abierto durante las primeras fases de explotación. Su restauración comienza con el relleno de las cortas con los propios estériles. La primera en explotarse y por tanto en rellenarse es la corta Norte, cuya morfología final se alcanza en el año 8 y restaurándose completamente en el año 10. La corta Sur se irá rellenando paulatinamente hasta finalizar el periodo de explotación donde se restaurará por completo.



Las cortas se rellenarán principalmente con residuos procedentes del proceso hidrometalúrgico. Estos estériles se clasifican como no inertes no peligrosos por lo que, previo a su vertido, se debe impermeabilizar el fondo de estas.

De cara a una correcta colocación de la geomembrana que evitará una potencial contaminación del entorno, se debe regularizar el fondo de corta. El objetivo es alcanzar la pendiente adecuada para albergar de forma correcta la geomembrana.

Para esta regularización del fondo de la corta se utilizan estériles de mina, así como para la construcción de bancos intermedios para recibir la geomembrana.

El estéril de mina se colocará en capas de 1 m de espesor, compactadas con rodillo según especificaciones, a determinar en terreno con zonas de prueba relativas a humedad óptima y número de pasadas.

Tanto en el fondo de las cortas como en los bancos se dispondrá una capa de 1 m de material seleccionado o material protección para después colocar el geotextil y la geomembrana. Se extenderá en capas de 0,5 m de espesor, compactadas con rodillo y se perfilará hasta alcanzar la pendiente de talud de diseño (Figura 118).

El sistema de impermeabilización cuenta con una geomembrana colocada sobre geotextil. Ambos se fijarán mediante zanjas de anclaje en la berma superior de los bancos y por soldadura de termo fusión o extrusión a la berma inferior. Esta impermeabilización tiene el objetivo de impedir lixiviados de los materiales de relleno.

Posteriormente se rellenan con los materiales acopiados el depósito temporal de estériles hasta alcanzar los niveles de cota originales generando una geomorfología irregular sobre el terreno que permita la recreación de ambientes diferenciados y tras la conformación de un suelo apto para la implantación de la cubierta vegetal, se procede a acometer los trabajos de revegetación con especies vegetales propias del entorno natural. En la Figura 117 se representa el esquema de relleno propuesto.

Para el relleno de las cortas se utilizarán los siguientes materiales:

- 955.000 m³ de material para la regularización (estériles de mina).
- 19.064.912 m³ de estériles de hidrometalurgia.
- 709.850 m³ de materiales para el cierre y restauración (556.000 m³ de estériles de mina y 153.850 m³ de tierra vegetal).

Durante el relleno de las cortas el agua que recogen los huecos mineros es deficitaria. Pese a ello se plantea la ubicación de plataformas flotantes que permitan recoger esas aguas mediante bombas. Este sistema permitirá, en caso necesario, recoger esas aguas y dirigirlas a las balsas de agua de proceso directamente.



Los residuos ubicados en la IRM sobre las cortas mineras serán encapsulados al finalizar su deposición en la misma mediante un sistema de sellado mediante una capa de arcillas compactados más geomembrana que, unidas al sistema de impermeabilización de las cortas, impedirá que el agua penetre en la masa de residuos.

Tal y como se muestra en la siguiente figura, los estériles de hidrometalurgia (planta) estarán convenientemente encapsulados para evitar que las aguas entren en contacto con la masa de residuos evitando así la generación de lixiviados una vez se alcance la capacidad total de llenado con los mismos.

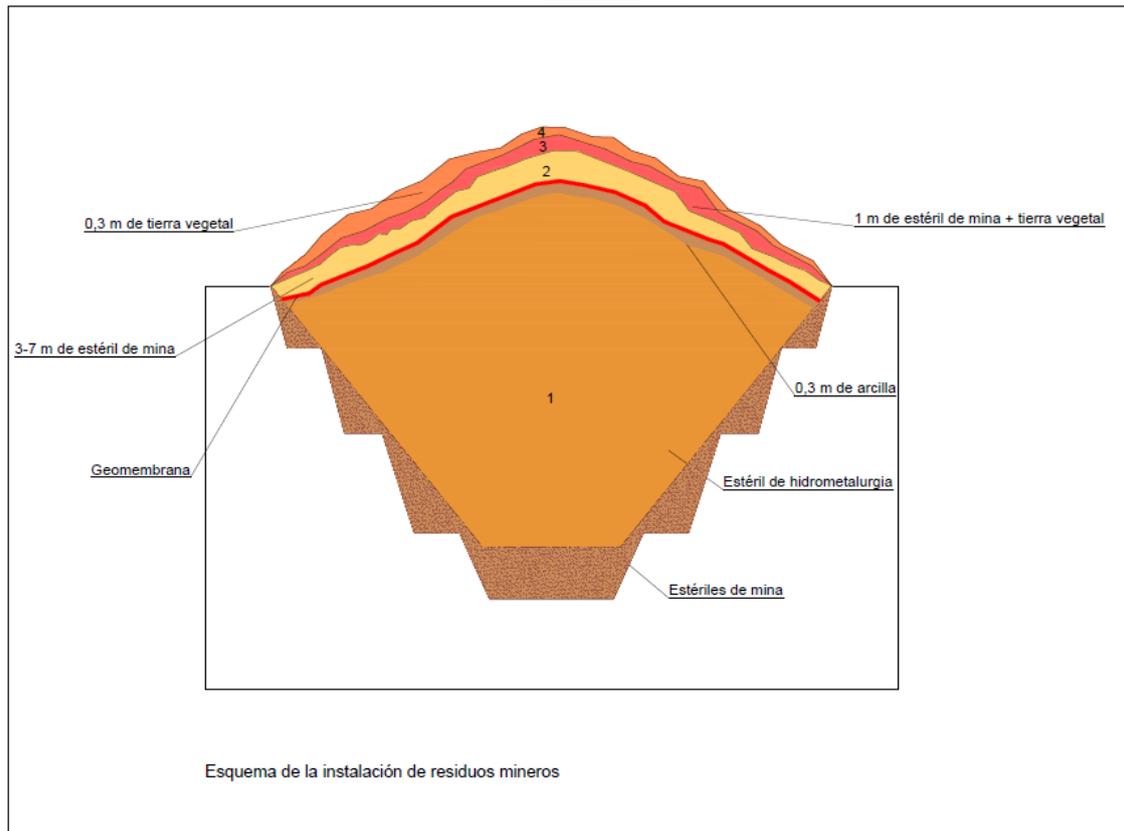


Figura 117. Impermeabilización y encapsulamiento de los residuos ubicados en las cortas

**PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO****15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN****15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS****15.13.5 Secuencia de operación y fases de la gestión de residuos****15.13.5.3 Relleno de los huecos mineros e IRM**

En este apartado el relleno de las cortas y la IRM se consideran como una única infraestructura con el fin de entenderla como una unidad y poder comprender mejor en qué momento de la explotación esta puede entrar en fase de restauración y puede procederse a su clausura.

El relleno de los huecos mineros realizados, tanto en el interior como a cielo abierto, se realizará con los estériles de mina y los estériles de planta. En el relleno de las labores subterráneas se emplearán los residuos hidrometalúrgicos y de concentración obtenidos en el tratamiento de mineral, que serán mezclados con un conglomerante (cemento); de esta manera se posibilita la explotación de cámaras vecinas y la recuperación máxima del yacimiento.

El relleno de los huecos de explotación a cielo abierto tiene como objeto principal dejar una configuración morfológica del terreno apta para los usos proyectados y acorde con el entorno en el que se ubica, de forma que se facilite su integración en el mismo y que reproduzca en la medida de lo posible unas vertientes hidrológicas que sean lo más similares a las originales y que permitan restaurar la funcionalidad de la red de drenaje superficial.

Las dos cortas serán rellenas con estériles y se generarán morfologías irregulares para recrear distintos biotopos y crear ambientes diferenciados. Mediante esta técnica se restaurará la charca original que se localiza sobre la corta.

A continuación, se muestra la evolución del llenado de los huecos de explotación a lo largo de la vida del proyecto. El relleno de la corta norte quedará finalizado en el año 8.

RELLENO A CIELO ABIERTO					
Año concesión	Año extracción	Estéril de mina esponjado y compactado (m³)	Residuos hidrometalúrgicos (m³)	Volumen total (m³)	Volumen total acum. (m³)
Año 3	Año 1	0	0	0	0
Año 4	Año 2	0	528.276	528.276	528.276
Año 5	Año 3	0	1.880.794	1.880.794	2.409.070
Año 6	Año 4	0	1.771.261	1.771.261	4.180.332
Año 7	Año 5	0	1.547.135	1.547.135	5.727.467
Año 8	Año 6	0	1.019.652	1.019.652	6.747.119
Año 9	Año 7	127.562	1.623.598	1.751.160	8.498.279
Año 10	Año 8	105.587	1.643.995	1.749.582	10.247.862
Año 11	Año 9	73.312	773.953	847.265	11.095.127



RELLENO A CIELO ABIERTO					
Año concesión	Año extracción	Estéril de mina esponjado y compactado (m ³)	Residuos hidrometalúrgicos (m ³)	Volumen total (m ³)	Volumen total acum. (m ³)
Año 12	Año 10	128.055	723.141	851.196	11.946.323
Año 13	Año 11	102.987	746.409	849.396	12.795.719
Año 14	Año 12	98.307	750.753	849.060	13.644.778
Año 15	Año 13	74.600	772.758	847.358	14.492.136
Año 16	Año 14	84.818	763.274	848.092	15.340.228
Año 17	Año 15	6.139	836.304	842.443	16.182.671
Año 18	Año 16	34.315	810.151	844.466	17.027.137
Año 19	Año 17	52.853	418.720	471.573	17.498.710
Año 20	Año 18	42.283	334.976	377.259	17.875.969
Año 21	Año 19	7.270	367.475	374.745	18.250.714
Año 22	Año 20	6.362	321.540	327.902	18.578.616
Año 23	Año 21	4.544	229.672	234.216	18.812.832
Año 24	Año 22	0	233.889	233.889	19.046.722
Año 25	Año 23	0	233.889	233.889	19.280.611
Año 26	Año 24	0	233.889	233.889	19.514.501
Año 27	Año 25	0	233.889	233.889	19.748.390
Año 28	Año 26	0	265.516	265.516	20.013.906
Año 29	Año 27	0	0	0	20.013.906
Año 30	Año 28	0	0	0	20.013.906

Tabla 62. Relleno a cielo abierto. Fuente: Proyecto de explotación.

RELLENO EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA					
Año concesión	Año extracción	Residuos hidrometalúrgicos (m ³)	4% Cemento + Agua (m ³)	Volumen total Pasta (m ³)	Volumen total acum. (m ³)
Año 3	Año 1	0	0	0	0
Año 4	Año 2	0	0	0	0
Año 5	Año 3	31.657	13.205	44.862	44.862
Año 6	Año 4	141.190	58.894	200.084	244.945
Año 7	Año 5	365.127	152.304	517.431	762.376
Año 8	Año 6	662.732	276.443	939.175	1.701.551
Año 9	Año 7	773.016	322.445	1.095.461	2.797.012
Año 10	Año 8	752.618	313.937	1.066.555	3.863.567
Año 11	Año 9	722.661	301.441	1.024.101	4.887.669
Año 12	Año 10	773.473	322.636	1.096.109	5.983.777
Año 13	Año 11	750.205	312.930	1.063.135	7.046.912
Año 14	Año 12	745.861	311.118	1.056.979	8.103.892
Año 15	Año 13	723.856	301.939	1.025.795	9.129.687
Año 16	Año 14	733.340	305.895	1.039.235	10.168.922
Año 17	Año 15	660.310	275.433	935.742	11.104.664
Año 18	Año 16	686.463	286.342	972.804	12.077.469
Año 19	Año 17	412.732	172.161	584.893	12.662.362
Año 20	Año 18	330.185	137.729	467.914	13.130.276
Año 21	Año 19	297.687	124.173	421.860	13.552.136
Año 22	Año 20	260.476	108.651	369.128	13.921.264
Año 23	Año 21	186.054	77.608	263.663	14.184.926



RELLENO EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA					
Año concesión	Año extracción	Residuos hidrometalúrgicos (m ³)	4% Cemento + Agua (m ³)	Volumen total Pasta (m ³)	Volumen total acum. (m ³)
Año 24	Año 22	181.837	75.849	257.685	14.442.612
Año 25	Año 23	181.837	75.849	257.685	14.700.297
Año 26	Año 24	181.837	75.849	257.685	14.957.982
Año 27	Año 25	181.837	75.849	257.685	15.215.668
Año 28	Año 26	206.424	86.105	292.530	15.508.197
Año 29	Año 27	0	0	0	15.508.197
Año 30	Año 28	0	0	0	15.508.197

Tabla 63. Relleno de la explotación subterránea. Fuente: Proyecto de explotación

15.13.5.3.1 Cierre de la IRM sobre relleno cortas

Una vez ubicados todos los residuos de planta se procede, como ya se ha comentado, a encapsular los mismos mediante una capa de sellado consistente en una geomembrana colocada sobre una capa de 30 cm de arcillas.

Sobre esta capa de sellado se deposita una capa de entre 3 y 7 metros de estériles de mina inertes sobre la que se ubica un metro adicional de mezcla de estériles de mina y tierra vegetal. Este grosor permite poder revegetar por encima con cualquier especie sin el riesgo que el sistema radicar de las mismas pueda profundizar lo suficiente como para dañar el sistema de sellado de los residuos.

El relleno está proyectado con una morfología suave y ondulada, sin fuertes pendientes y acorde con la morfología presente en el entorno. El objetivo es integrar la zona en el entorno y recrear ambientes aptos para la correcta revegetación.

Las dos cortas serán rellenas con estériles y se generarán morfologías irregulares para recrear distintos biotopos y crear ambientes diferenciados. Mediante esta técnica se restaurará la charca original que se localiza sobre la corta.

Con el fin de obtener una heterogeneidad ambiental, posteriormente se revegetarán en función de la orientación y exposición solar así como las condiciones de humedad disponibles. Así los trabajos de revegetación se realizan con especies vegetales propias del entorno natural mediante la selección de especies propuesta correspondiente a la unidad del “Alcornocal”, “Encinar” y “Zonas Higrófilas”.

En la figura siguiente se representa el remodelado propuesto en la zona de las cortas donde se observa la recuperación de una morfología integrada en el entorno.

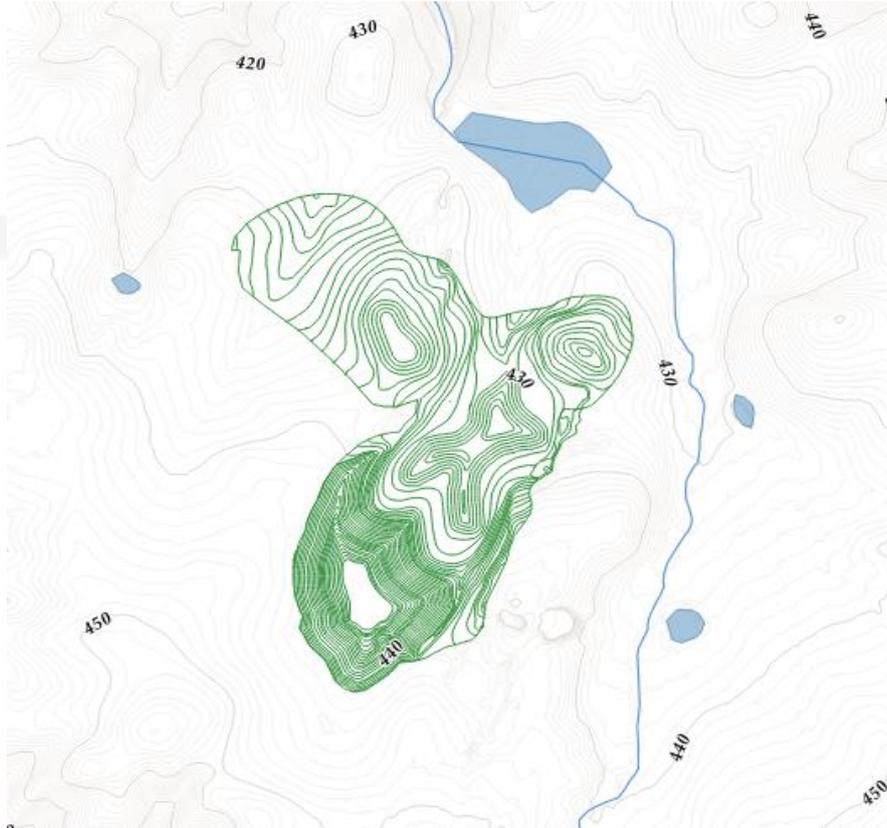


Figura 130. Remodelado propuesto en la zona de cortas

Al finalizar este relleno, se restituirá la charca original situada sobre la zona de la corta perteneciente al HIC 3150 (Lagos eutróficos naturales con vegetación *Magnopotamion* o *Hydrocharition*). A continuación, se indican los detalles de esta charca restituida.

PARTE III. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

15. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO DE EXPLOTACIÓN

15.13 GESTIÓN DE RESIDUOS MINEROS

15.13.5 Secuencia de operación y fases de la gestión de residuos

15.13.5.4. Berma visual

La berma visual se comienza a construir desde las primeras fases del proyecto con los estériles de mina inertes y la tierra vegetal extraídas de la zona de instalaciones y las cortas mineras.

Ésta se distribuye de forma perimetral en la zona central del proyecto con el fin de armonizar paisajísticamente la zona de instalaciones del proyecto. Se trata de una medida de mitigación de impactos que minimizan los impactos de polvo, ruido, flora y fauna, entre otros. No obstante, debido a que alberga residuos mineros inertes, se considera una instalación de residuos mineros del conjunto del proyecto.



Una vez construida se realizará una revegetación de esta con fines de pantalla visual y de mitigación de impactos. Una vez retiradas todas las instalaciones, la berma será completamente retirada siendo los materiales utilizados para labores de prestación, en concreto, el remodelado final de los huecos rellenados.

La berma visual desaparece totalmente al finalizar la explotación y se procederá a la restauración de toda el área afectada por la misma. Los materiales almacenados en ella son empleados en las labores finales de restauración geomorfológica de los huecos (estériles) y como sustrato edáfico en las labores de revegetación (tierra vegetal). Esta reutilización de la tierra vegetal obtenida en el mismo lugar permite una mejor recuperación del lugar afectado por la explotación minera.

Una vez reutilizados todos los materiales, la superficie de asentamiento de la berma quedará expuesta y se procederá a su rehabilitación:

- Extensión de tierra vegetal en función del tipo de revegetación a realizar (30 cm para siembras / hidrosiembras, 40 cm para plantaciones forestales)
- Revegetación con las formaciones de encinar y/o alcornocal en función de la orientación.

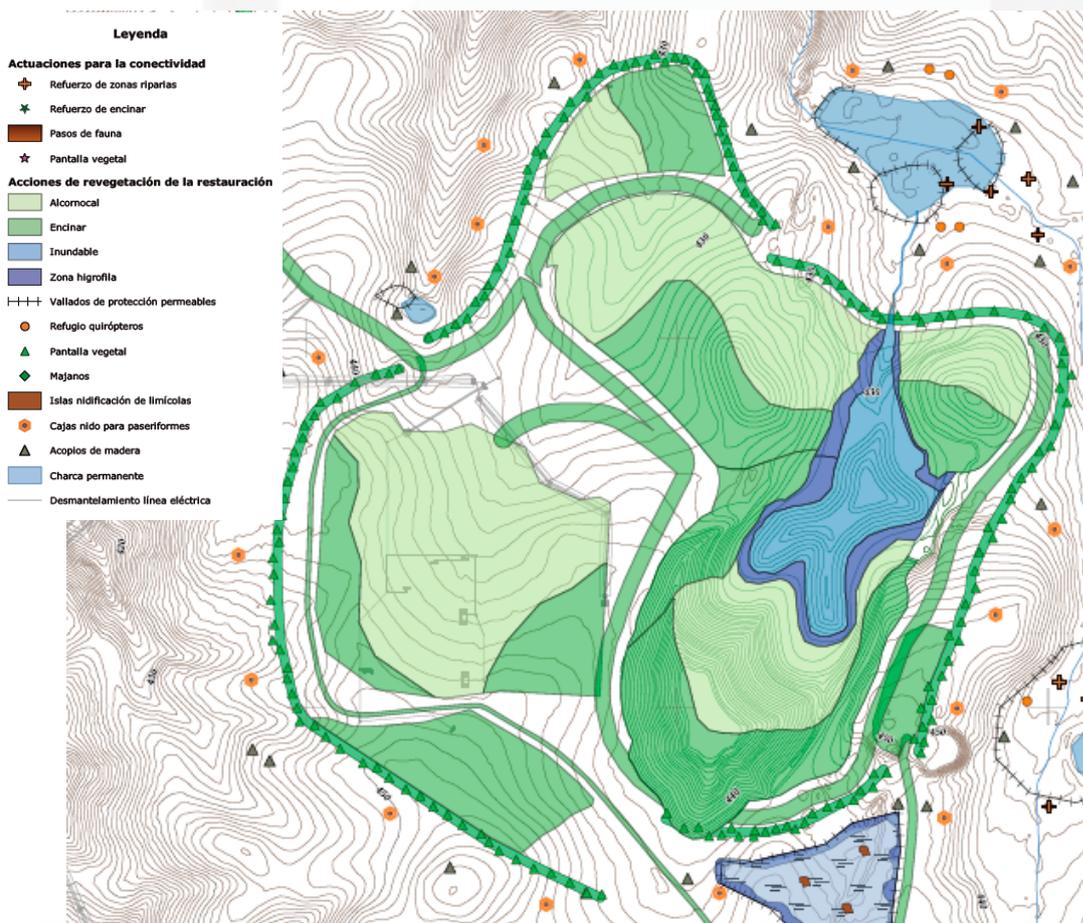


Figura 131. Restauración en la zona de la berma visual



PARTE V. IMPACTOS AMBIENTALES Y VULNERABILIDAD DEL PROYECTO

21. IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

21.2. IDENTIFICACIÓN DE ACCIONES SUSCEPTIBLES DE PRODUCIR IMPACTOS

21.2.2. Fase de Explotación

Una vez acondicionado el terreno y construidas las infraestructuras necesarias, se dará comienzo a la fase de operación donde se llevará a cabo la fase de explotación del yacimiento. Esta se hará mediante dos métodos, como se ha explicado en la PARTE III: PROYECTO DE EXTRACCIÓN MINERA, una primera a cielo abierto y una segunda mediante minería de interior por cámaras y pilares con *backfilling* a partir del año 5 de explotación.

Se entiende por acciones susceptibles de provocar impactos durante la fase de explotación a las siguientes:

- Perforación: Riesgo de generación de **polvo** y **ruido**. Las emisiones sólidas pueden depositarse sobre la vegetación circundante afectando a su **vitalidad foliar**. El ruido puede ocasionar **molestias** a la fauna y a los usuarios de la vía pecuaria.
- Arranque mediante voladura: Riesgo de generación de **polvo** y **onda aérea**. Las emisiones sólidas pueden depositarse sobre la vegetación y alcanzar los cursos de agua (**vitalidad foliar, sólidos en suspensión y modificación de la escorrentía**). Estas emisiones sólidas no se considera que puedan ser transportadas a zonas habitadas debido a la distancia de la corta al núcleo urbano más cercano (Grimaldo) con una distancia de aproximadamente 1.800 m. La maquinaria puede provocar **molestias** a la fauna. Además, existirán efectos sobre el relieve y topografía, **modificando la geomorfología**, derivándose en afección a la **calidad del paisaje**, así como **impacto visual**.
- Carga y transporte interno del material: Consiste en la carga del material procedente del arranque por voladura y su transporte desde el frente de explotación hasta la Planta de Beneficio y la escombrera permanente, donde será descargado. Se trata por tanto de un transporte interno, no afectando *a priori* vías de comunicación. Esta acción supone sobre la atmósfera emisión de **polvo, ruido, GEI y contaminación lumínica**. El polvo generado afectará a la **vitalidad foliar** de las plantas y a las **aguas superficiales** por deposición de sólidos en suspensión. El movimiento de camiones puede suponer **riesgo de atropello** a la fauna, así como **molestias** a los usuarios de la vía pecuaria.
- Bombeo drenaje aguas subterráneas: para llevar a cabo la apertura del hueco minero es necesario realizar un bombeo de las aguas subterráneas, lo que supone una **modificación del estado cuantitativo** de las mismas, así como de la superficiales ya que el Arroyo Pizarro podrá ver comprometido su caudal al encontrarse dentro del radio del cono de descenso.
- Activad planta de beneficio: la planta de beneficio, como se ha descrito en la PARTE III, comprende en su proceso dos etapas, una inicial de concentración y una segunda de piro e hidrometalurgia. En la primera etapa se produce la trituración, molienda, concentración gravimétrica del material. En la segunda, se realiza una calcinación, lixiviación del calcinado, el proceso hidrometalúrgico y suministro de reactivos químicos. Todo ello supone emisiones de **polvo, ruido, GEI (CO₂), SO₂ NO_x HF y contaminación lumínica**. El polvo proveniente del tratamiento, además de a la atmósfera ocasiona **pérdida de vitalidad foliar** a la vegetación. Como efecto indirecto se encuentran las



molestias a la fauna, por contaminación lumínica, así como a los usuarios de la vía pecuaria. Habrá afección a la **calidad del paisaje** por las emisiones propias de la planta. Respecto al sistema hídrico, éste se verá afectado en el **estado cuantitativo de las aguas subterráneas**, ya que son las que alimentarán al sistema de tratamiento del mineral.

- Actividad en instalaciones auxiliares: Posibles **molestias** a fauna por la iluminación de las instalaciones, así como **contaminación lumínica**. **Riesgo de contaminación de suelos** por algún vertido accidental en el almacén.
- Explotación minería subterránea: la explotación subterránea supone una menor generación de impactos ambientales respecto de la minería a cielo abierto, en este caso es posible el **riesgo de subsidencia y sismicidad**, emisión de **GEI** y la reducción temporal del estado cuantitativo agua subterránea por la extracción asociada al hueco, aunque este impacto no se contabiliza íntegramente, para evitar duplicidades, ya que una fracción del agua captada se emplea en el tratamiento de la planta de beneficio y por tanto se contabiliza en este apartado.
- Relleno de cámaras con backfilling: aporta una mayor **estabilidad geológica** y **modificación de la corriente subterránea** por generación de nuevos cuerpos o cavidades impermeables.
- Actividad depósito temporal: Al tratarse de un depósito de rechazo de la planta de beneficio (estéril no inerte no peligroso), se considera que puede haber un **riesgo de contaminación de aguas subterráneas**, en caso de rotura de la impermeabilización, así como **riesgo de contaminación de los suelos** y **riesgo de intoxicación** de la fauna. Además, puede suponer molestias a los usuarios de la vía pecuaria por impactos visuales y de tránsito de vehículos.
- Conformación escombrera permanente: Los acopios de estériles de mina, generan **ruido**, emisiones de **GEI** y **polvo**, afectando así a la **vitalidad foliar** de la flora y a la fauna por **molestias** a la misma. Aunque los materiales destinados a la escombrera son inertes procedentes de los materiales excavados para la creación de los huecos mineros, se contempla un **riesgo de contaminación** de las aguas subterráneas por el riesgo de rotura o deterioro del sistema de impermeabilización. Esta contaminación puede originarse por el contacto de los materiales con la atmósfera y el agua de lluvia, pudiendo generar lixiviados de metales pesados e infiltrar en el subsuelo. A lo largo de la vida del proyecto se realizarán análisis químicos cinéticos de los inertes destinados a la escombrera con el fin de caracterizar los diferentes cuerpos del yacimiento para evitar dichos lixiviados. Del mismo modo que en el sistema hídrico sucede con el suelo, **riesgo de contaminación** por rotura del sistema de impermeabilización. Además, la conformación de la escombrera supone una modificación de la morfología del terreno y **pérdida de estabilidad de taludes**. El paisaje se verá alterado disminuyendo su **calidad**, dando lugar a **impacto visual**.
- Actividad ETAP, Estación de acondicionamiento y readaptación de aguas y BAP (balsa de agua de proceso): Las estaciones de depuración y tratamiento de aguas suponen **emisión de gases, ruido y gases de efecto invernadero**. Se contempla el **riesgo de contaminación de suelos** en caso de rotura del sistema de tuberías y tratamiento siendo este categorizado como compatible, por quedar contenido por la berma en la zona industrial. En cuanto a las afecciones a la fauna, no se considera impacto por riesgo de intoxicación ya que estará situada en una zona poco atractiva para la misma debido a la actividad minera, además de las medidas de seguridad que esta instalación requiere.
- Revegetación escombrera permanente: Generación de **polvo, ruido** y **GEI** como impactos negativos. Esta acción lleva asociada la siguiente serie de impactos positivos. **recuperación de**



sustrato edáfico, regeneración de hábitats, regeneración cubierta vegetal y mejora calidad del paisaje.

- Clausura depósito temporal: La clausura del depósito temporal supondrá la emisión de **polvo, ruido y GEI**. Las aguas superficiales de la Rivera de Holguera podrían verse afectadas por la aparición de **sólidos en suspensión** con el desmote del dique de contención. Positivamente la clausura mejorará la **estabilidad geológica** y la **calidad del paisaje**. **Regeneración de la cubierta vegetal y hábitats, recuperación del sustrato edáfico.**
- Relleno corta: Entendido como una única unidad el relleno de la corta como la instalación de residuos mineros sobre la misma. Esta acción supone la emisión de **polvo, ruido y GEI**. Las aguas superficiales podrían verse afectadas por la deposición de **finos**. Mejora la estabilidad geológica y la calidad del paisaje. **Regeneración de la cubierta vegetal y hábitats, recuperación del sustrato edáfico.**
- Operación regular de los paneles fotovoltaicos: El empleo de paneles solares para el suministro de energía da lugar a la **mitigación del cambio climático**. A la avifauna le puede generar deslumbramiento, aunque se considera poco relevante, puesto que el panel fotovoltaico aprovecha la radiación solar, por lo que toda radiación reflejada sería energía no aprovechada por el panel. Por ello el vidrio de los módulos tiene una capa anti-reflejante o ARC, la cual mitiga la reflexión de la luz sobre el módulo, para incrementar la eficiencia y que a su vez evita que se produzca el deslumbramiento. Se considerará impacto leve a la avifauna por la posibilidad de sobrevolarlos y no significativo a los usuarios del camino rural.
- Mantenimiento de los paneles fotovoltaicos: las labores de mantenimiento de los paneles solares suponen la **inhibición del crecimiento de la vegetación** por las podas o desbroces realizados.
- Operación regular de la red eléctrica: **riesgo de electrocución** de la avifauna, en la sección correspondiente al trazado de 45 kV.
- Mantenimiento de la red eléctrica: **inhibición del crecimiento de la vegetación.**
- Uso de recursos naturales: los recursos naturales se analizan como acción (uso de estos) y no como factor susceptible de recibir impactos, al ser requisito del Documento de Alcance: *“Entre las acciones a estudiar figurarán las siguientes: (...) El uso de recursos naturales, en particular la tierra, el suelo, el agua y la biodiversidad (recursos naturales), teniendo en cuenta, en la medida de lo posible, la disponibilidad sostenible de tales recursos (...)”*. Los recursos naturales empleados son los **combustibles**, cuya acción se refleja en el cambio climático al emitirse como Gases de Efecto Invernadero, **gas natural licuado**, reflejado en atmósfera, las aguas **subterráneas** y el **aprovechamiento del mineral**, el cual supone un impacto positivo sobre la economía.

En esta segunda fase del proyecto no se contempla la afección paisajística propia de la implantación de las instalaciones construidas durante la fase de preoperación, como sería la planta de beneficio, las instalaciones auxiliares, tendedero eléctrico y paneles fotovoltaicos, para no duplicar el impacto.

A excepción de las actividades propias de la minería subterránea y los mantenimientos, el resto de las acciones (aunque muchas de ellas de carácter temporal, como el tráfico por la pista de la escombrera, que prácticamente aparecerá tras el fin de la conformación de la escombrera en el año 6 de explotación) repercutirán sobre la Red Natura 2000 al afectar sobre la conectividad y el esparcimiento, además de los efectos propios del tendido eléctrico.



En cuanto a la economía y población local, el impacto es positivo con la **generación de puestos de trabajo** y el **freno al despoblamiento**.

PARTE V. IMPACTOS AMBIENTALES Y VULNERABILIDAD DEL PROYECTO

21. IDENTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN Y VALORACIÓN DE IMPACTOS AMBIENTALES DE LA SOLUCIÓN ADOPTADA

21.3. IDENTIFICACIÓN DE LOS ELEMENTOS DEL MEDIO AFECTADOS

21.3.2. Fase de Explotación

21.3.2.3. Afecciones sobre el medio hídrico e hidrogeológico

La **escorrentía superficial** se verá modificada en las labores de voladura. La conformación de la escombrera permanente no se cuenta como afección a la escorrentía ya que, a pesar de que modifique la geomorfología, la escorrentía se ha modificado previamente con la impermeabilización de la superficie.

En cuanto a las aguas superficiales, el diseño de la corta escogido, teniendo en cuenta las necesidades técnicas del proceso, busca afectar lo mínimo posible al arroyo Pizarro y la charca que se encuentra al norte, localizando la explotación en la zona de las antiguas labores, no restauradas, de la Mina “Las Navas”.

Los efectos sobre el sistema hídrico se pueden dividir en:

- **Afección al estado cuantitativo, tanto en las aguas superficiales como subterráneas.**

Del caudal extraído en el bombeo realizado para hacer posible la explotación del mineral parte será empleado en el suministro de la Planta de Beneficio.

De acuerdo con el Estudio de “Evolución Piezométrica prevista en la corta, efecto sobre cauces y puntos de abastecimiento cercanos” (ANEXO VI.B) se estima un caudal entrante al área de la corta durante la explotación a cielo abierto y subterránea de unos 36,12 L/s (24,92 L/s de origen subterráneo y 11,2 por infiltración de la precipitación) y unos 69 L/s respectivamente (datos reales obtenidos a través de sondeos), lo que hace necesarios la instalación de pozos distribuidos alrededor de la corta para la extracción del agua. Esta extracción de agua generará un flujo radial hacia el origen del bombeo, también denominado cono de descenso, cuyo radio de influencia, distancia a partir de la cual el descenso producido por un bombeo es nulo y, por lo tanto, ya no influye sobre la variación de niveles, máximo estimado es de 200 m para la corta sur, 160 m para la corta norte y 240m para la explotación subterránea.



Respecto al Acuífero Galisteo los radios de influencia generados en el agotamiento no llegan al límite del acuífero y, por tanto, no debería existir una afección por el bombeo de las labores mineras sobre el acuífero de Galisteo.

Respecto a las masas próximas al radio de influencia, a pesar de que el efecto de sumidero se encuentre restringido al área de la corta, debido a la baja permeabilidad del medio y el efecto localizado de las fallas, el radio de influencia alcanzará el Arroyo Pizarro y la balsa de agua al norte de la corta, dando lugar a posibles infiltraciones reduciendo el estado cuantitativo de los mismos.

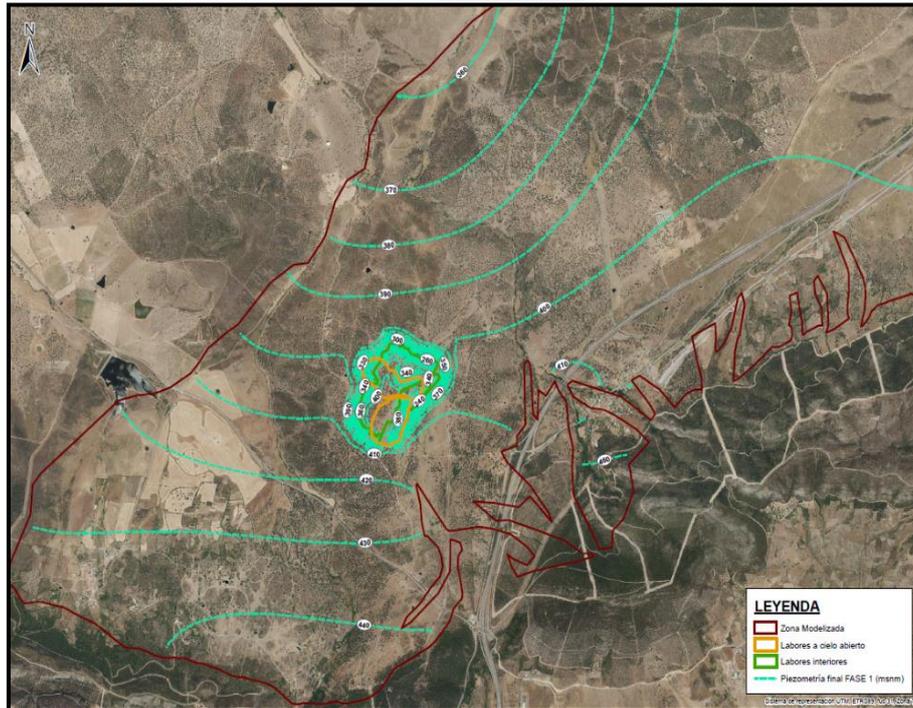


Figura 3. Radio de influencia y conos de bombeo durante la explotación de la corta norte. Fuente: ANEXO VI

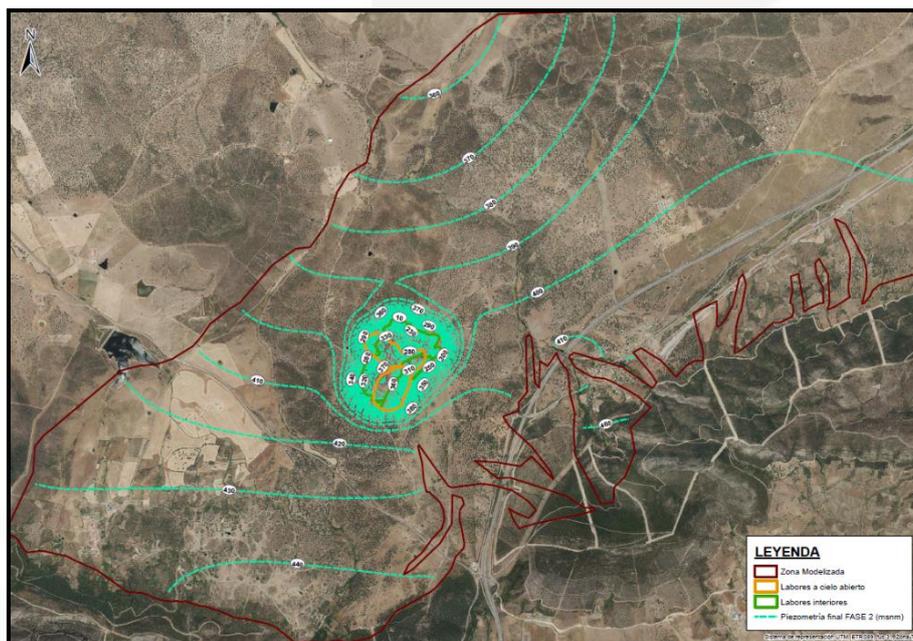


Figura 4. Radio de influencia y conos de bombeo durante la explotación de la corta sur. Fuente: ANEXO VI

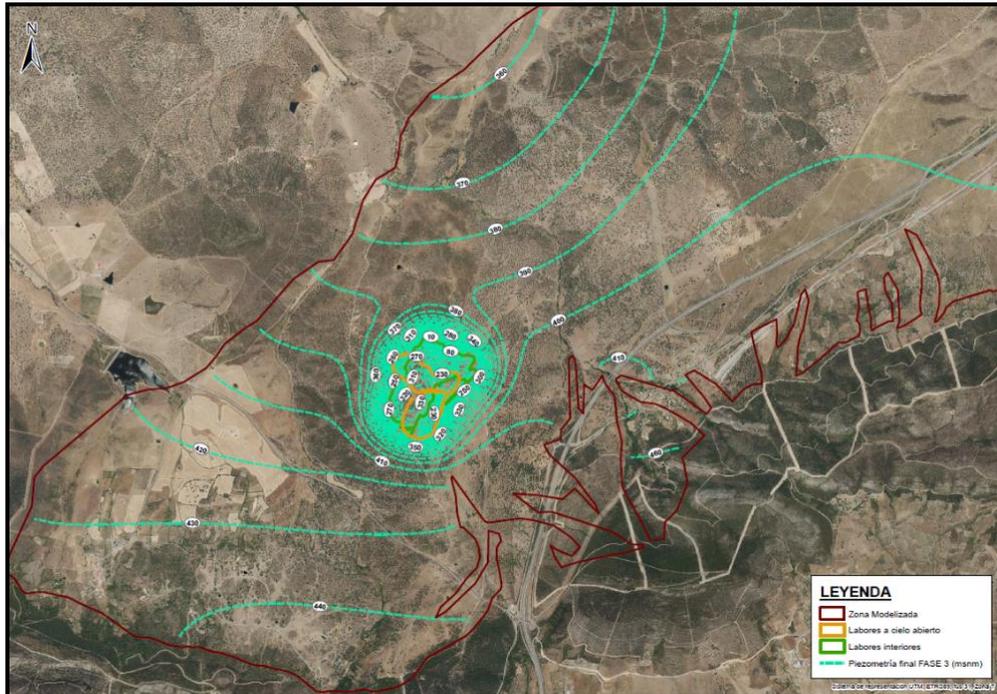


Figura 5. Radio de influencia y conos de bombeo durante la explotación subterránea. Fuente: ANEXO VI

La afección al estado cuantitativo, tanto en aguas superficiales como subterráneas tendrá una temporalidad igual a la duración de la fase de explotación, siendo mayor durante la explotación subterránea (ver volumen detráido en apartado Gestión de aguas en la Planta de Beneficio).

Como medida para la reducción de la afección sobre el caudal del Arroyo Pizarro se propone la aportación, desde la balsa de agua fresca, de un caudal tal que mantenga las condiciones actuales del arroyo y su temporalidad natural. Esta aportación se realizará siempre y cuando se cumpla con las normas de calidad ambiental establecidas en el *Real Decreto 817/2015*. Para la verificación de estas se establece un estricto control de calidad previo a la entrada de flujo de agua en la Balsa de Agua Fresca y previo al punto de vertido en el Arroyo Pizarro.

- **Afección al estado cualitativo, para aguas subterráneas y superficiales.**

En primer lugar, debido al riesgo de afección por la rotura del depósito temporal. En caso de deterioro o rotura de la capa impermeable del depósito temporal existe el riesgo de aportar al medio sustancias no inertes no peligrosas. Se considera muy remoto el escenario de rotura del depósito temporal (ver apartado de Vulnerabilidad antes accidentes graves, PARTE V). En primer lugar, la instalación cumplirá con las medidas exigidas en seguridad para evitar dicho accidente. Además, se implantará la medida de construcción de un dique de contención por la cercanía a la Rivera de Holguera, con el fin de que en caso de rotura de contaminación sea la menor posible sin alcanzar el cauce. El residuo que se albergará en el depósito temporal presenta una fracción acuosa muy baja por lo que, incluso sin dique de contención, los materiales no alcanzarían una gran superficie. Además, las aguas pluviales serán recogidas en una berma de coronación.



Respecto a los impactos al estado cualitativo debidas a la operación el proyecto se ha diseñado de forma que no se realizan vertidos, y se considera de “vertido cero” (PARTE III Descripción del Proyecto).

Como se ha comentado anteriormente, respecto a la escombrera permanente, el conjunto de los estériles de mina se clasifica como **inertes** según lo establecido en el *RD 777/2012* (PARTE III Descripción del Proyecto). Además, el proyecto realizará análisis de materiales depositados para garantizar la no generación de lixiviados. También se llevará a cabo la impermeabilización de la escombrera permanente y la creación de una red de drenaje en el fondo de ésta, que permitiría la captura y control de lixiviados durante la operación garantizando la protección de las aguas subterráneas de Galisteo (030.021). Por tanto, se establece, tras la valoración del potencial daño, que no existen riesgos para el medio ambiente ni la salud humana debidas a la escombrera permanente y, por tanto, no se refleja en la matriz de impactos.

Las medidas de control de la escorrentía superficial y de lixiviados, así como el drenaje, la impermeabilización de la escombrera y el análisis y caracterización de estériles de forma regular, se incluye en el proyecto con carácter preventivo por la presencia de arsénico de forma natural en aguas y muestras puntuales de suelo. El proyecto incluye realizar un análisis de los materiales depositados para garantizar la no generación de lixiviados y para reforzar la seguridad propone un sistema de impermeabilización de la escombrera permanente. Impidiendo que los lixiviados entren en contacto con el suelo y aguas subterráneas. Realizándose una captura y control de lixiviados durante la operación de esta.

Además, la presencia de niveles elevados de arsénicos en algunas muestras de agua y suelo hace pensar en la necesidad de realizar analíticas de control sobre el estéril de mina para evitar fracciones heterogéneas con elevados contenidos en arsénico u otros elementos con capacidad de alterar el estado cualitativo de la masa de agua subterránea o superficial.

- Afección por **finos**, en el caso de las aguas superficiales por la deposición de partículas, debido del arranque por voladura, carga y transporte del material, relleno de la corta y clausura del depósito temporal así como el desmantelamiento del dique de contención. La conformación de la escombrera permanente no se considera que afecte a las superficiales por deposición de finos debido a la distancia de esta a los caudales superficiales.
- Por último, las aguas subterráneas verán la dirección de su flujo modificada por el relleno de cámaras por *backfilling* por la introducción de un cuerpo no permeable. De manera indirecta, el bombeo también modificará la dirección de flujo.

Además, el proyecto minero prevé el uso de los estériles de planta para su uso en forma de pasta (ANEXO XXVIII.- Nota técnica referente a rellenos con pastas cementadas, Paterson & Cooke Iberia). El cementado de la pasta resultante con cemento Portland sulfuro resistente (SR 42.5) busca encapsular las partículas de materiales metálicos y sulfatos presentes para la obtención de beneficios ambientales como:



- Estabilización del pH y neutralización de las aguas en el entorno de la mina de interior.
- Reducción de los lixiviados debido a la baja conductividad hidráulica de la pasta.
- Inhibición de los sulfatos y materiales metálicos debido al uso de cementos sulfuro resistente que encapsula estos elementos en la matriz de la mezcla.
- Reducción de la capacidad de oxidación, debido principalmente a la reducción del índice de huecos lo que hace que haya una menor capacidad para capturar partículas de oxígeno que promueven la oxidación.
- Por las características de las Pastas (conductividades hidráulicas bajas), se considera que el relleno de la cámara difícilmente será atravesado por agua de infiltración.
- Por último, en referencia a la calidad de agua a largo plazo, la misma “a priori” no sería peor de la que actualmente está presente el macizo rocoso antes de la operación minera.

Dichos resultados están ampliamente referenciados en bibliografía, experiencias y estudios previos, pero están pendientes de validación para el proyecto que nos ocupa.

En cuanto al uso de recursos, son las aguas subterráneas las que se ven afectadas, ya que, como se ha explicado, el bombeo y drenaje de las subterráneas que se realiza para la apertura del hueco se aprovecha para el suministro de la Planta de Beneficio.

Respecto a la posibilidad de modificación del estado cualitativo del embalse de Torrejoncillo debido a la proximidad del proyecto, este embalse se encuentra aguas abajo del proyecto por lo que no puede verse modificado ya que, el Arroyo de la Ribera y el Arroyo de las Rozas, de los cuales alimenta el embalse, no se verán afectados por las acciones del proyecto. Por tanto, el impacto que el embalse podría recibir debido al proyecto sería la inmisión de partículas en suspensión procedentes del polvo. Una vez consultado la memoria de dispersión de polvo se concluye que, teniendo en cuenta la dirección dominante del viento, de este a oeste y de oeste a este, la concentración que alcanzaría al embalse se encuentra entre 0,1-0,3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En el caso de la extracción del agua del hueco minero, parte será utilizada en el proceso. Sin embargo, el excedente de agua será dirigido la balsa de agua fresca. Cuando se considere necesario y previo control de las aguas, la balsa de agua fresca aportará caudal al Arroyo Pizarro con el fin de disminuir el impacto por la reducción de este.

PARTE VIII. EPÍTOME

40 PROYECTO EXPLOTACIÓN

40.2 DESCRIPCIÓN DE LA EXPLOTACIÓN

40.2.4 Instalaciones de Residuos Mineros

Las instalaciones de residuos de mina (IRM) en superficie serán cuatro: escombrera permanente, depósito temporal, berma y sobre el relleno de la corta. La escombrera permanente albergará los



estériles de mina hasta que finalice la explotación a cielo abierto. El depósito temporal albergará los residuos de planta durante los dos primeros años, mientras que no sea posible el relleno de los huecos de explotación a cielo abierto y subterráneos. La berma visual alberga estériles de mina durante toda la vida del proyecto por lo que al superar el plazo establecido por el *Real Decreto 975/2009* de tres años se considera instalación de residuo minero a pesar de tratarse de una medida mitigadora de impactos. Respecto a la última instalación se cataloga como IRM el relleno de estas cortas que se sitúan por encima de la cota original del terreno.

40.2.4.1 *Escombrera permanente*

Se ha previsto la construcción de una escombrera permanente al Norte de la explotación a cielo abierto a una distancia de 3.800 m, medida en línea recta, de las cortas. Tendrá capacidad para albergar un máximo de 16,33 Mm³ de material ocupando una superficie en planta de 80,90 ha.

Los residuos que se van a almacenar en esta escombrera están clasificados como inertes según lo establecido en los *Real Decreto 975/2009* y *777/2012*. De forma preventiva la superficie de la escombrera se impermeabilizará previo a la conformación de esta, de forma que garantice la seguridad de las aguas y permita tener un control de estas durante y tras la operación.

40.2.4.2 *Depósito temporal*

Para dar acogida a los residuos hidrometalúrgicos procedentes del tratamiento del mineral que no puedan ser ubicados en los huecos de explotación realizados en los primeros años de vida del proyecto, se llevará a cabo la construcción de un depósito temporal, compuesto de dos celdas, con capacidad suficiente para albergar 1,8 Mm³ de material, y una superficie total de 24,83 ha.

El depósito temporal se habrá vaciado al final del año 8 y quedará completamente desmantelado y restaurado a mediados del año 10.

Cada una de las celdas que componen el depósito, situado en ladera, constará de una zona excavada en la mitad sur y un dique de contención construido en relleno en la zona norte.

El depósito está diseñado para almacenar un total de 1.930.000 m³. Cabe destacar que el depósito cuenta con un volumen de seguridad de 130.000 m³. En el hipotético caso de que se diera un evento de fuertes lluvias, el depósito tiene capacidad suficiente para almacenar esta agua sin que se produzca un rebose.

El dique está diseñado con todas las medidas de seguridad, considerando eventos naturales posibles como por ejemplo un terremoto. No obstante, para estar del lado de la seguridad, se diseña una berma de protección a inmediatamente al Noreste de los diques. Esta berma se construye para evitar cualquier tipo de daño en el caso de un evento catastrófico provocado imposible de predecir.

40.2.4.3 *Berma visual*



Esta berma visual distribuye de forma perimetral a la zona central del proyecto con el fin de armonizar paisajísticamente la zona de instalaciones del proyecto. Se trata de una medida de mitigación de impactos que minimizan los impactos de polvo, ruido, flora y fauna, entre otros.

No obstante, esta berma alberga estériles de mina durante toda la vida del proyecto, es decir, supera el plazo establecido por el *Real Decreto* 975/2009 de tres años para ser considerada IRM.

40.2.4.4 *Relleno del hueco minero e IRM sobre el relleno de las cortas*

La remodelación del terreno en la explotación a cielo abierto consistirá en una adecuación morfológica que se adapte al entorno y que permita una correcta revegetación de este de acuerdo con el plan de restauración planteado. Tendrá capacidad para almacenar 20,73 Mm³ de material repartido de la siguiente manera: 19,07 Mm³ de estériles de planta y 0,96 Mm³ de estériles de mina y 0,71 de materiales para el cierre y restauración. No obstante, se consideran IRM el relleno de estas cortas que se sitúan por encima de la cota original del terreno.

Esta instalación de residuos mineros tiene una capacidad de 1.664.005 m³, alcanzando una altura máxima de 21 metros.

El relleno de la explotación subterránea se realizará con pasta consistente en una mezcla de estériles del tratamiento de mineral, agua y un conglomerante (cemento). Su deposición en los huecos creados mejorará la estabilidad de la explotación subterránea y posibilitará la extracción de las cámaras vecinas, pilares y niveles superiores, aumentando la recuperación del yacimiento.

ANEXO XXVIII. INFORMACIÓN ADICIONAL TÉCNICA DE RELLENO CON PASTA CEMENTADA (PATERSON & COOKE)

(Se sustituye por el siguiente)

NOTA TECNICA			
Para	Lithium Iberia S.L	De	Santiago Castro
Att.:	Juan Murillo	Tel No:	
E-mail:		E-mail:	
Fecha:	15 Diciembre2022	Hoja:	Hoja 1 de 13
Proy. No:	LLE-52-0016	Doc No:	52-0016-00-GE-TEC-0002 Rev A

INFORMACIÓN ADICIONAL TÉCNICA : RESPUESTA ADMINISTRATIVA RELACIONADA LA CARACTERIZACIÓN DEL RELLENO CON PASTA CEMENTADA REF: EXPEDIENTE 10C102020-10

Paterson & Cooke Iberia S.L (en adelante P&C), ha realizado el presente memorando a solicitud de Lithium Iberia S.L (en adelante LI), para aportar una mejora a la documentación entregada a la Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Junta de Extremadura (en adelante DGIEM) en referencia al requerimiento (exp: 10C10220) con fecha 20 de Octubre de 2022) relativo a la concesión de explotación del proyecto "LAS NAVAS".

1. INTRODUCCIÓN

A modo de introducción, cabe indicar que, la pasta de relleno es un subproducto obtenido a partir de los estériles del proceso procedentes del beneficio de mineral (lodos de tratamiento) y un elemento cementante (Generalmente Cemento Portland). Este material se emplea durante la operación minera para el relleno del hueco generado tras la extracción de mineral en mina.

La Industria tiene aceptados como métodos de relleno del hueco minero que utiliza de forma indistinta los siguientes tipo:

- Rellenos rocosos con estéril de mina,
- Rellenos hidráulicos, mezclas de arenas con agua,
- Rellenos rocosos cementados; y
- Rellenos con Pastas

La evolución y el mayor uso de unos u otros ha venido marcada por las mejoras realizadas en los procesos tecnológicos asociados para la obtención de estos productos. Un ejemplo claro ha sido el desarrollo de la tecnología de espesado de lodos y los avances relativos al comportamiento de estos, permitiendo la implantación del uso de pastas dentro de la operación minera para el relleno de las cámaras durante la década de los 80 y 90, ya que presenta una serie de ventajas operacionales y ambientales tales como:

- Reducción de las necesidades de almacenamiento en superficie;

- Optimizar los rellenos del hueco minero;
- Diseñar un producto que se ajuste a las necesidades geotécnicas de interior, para conseguir la resistencia portante del terreno;
- Permitir la recuperación de las cámaras secundarias y optimizar los desarrollos mineros.
- Disminuir la superficie expuesta de sulfuros en las zonas de trabajos mineros, disminuyendo por lo tanto capacidad de que ocurran reacciones de oxidación y por lo tanto generación de aguas acidas.

1.1 Antecedentes

El proyecto de Explotación de Las Navas tiene previsto beneficiar un yacimiento de litio-estaño, localizado al oeste de la autovía A-66 y la vía férrea de alta velocidad Plasencia-Cáceres, y al norte de la carretera EX 109 que dará acceso al futuro complejo minero.

Existen varios núcleos urbanos cercanos a la futura instalación, quedando los principales centros urbanísticos, Cáceres y Plasencia en el radio de unos 50km.

Los trabajos de investigación de reservas del proyecto han permitido plantear la explotación de 36,09Mt de mineral y la obtención de unas 745 000 t de hidróxido de Li para baterías, durante el periodo de explotación (30 años).

El proceso metalúrgico propuesto para el beneficio del mineral contempla en una primera etapa la concentración del mismos por procesos convencionales y en una segunda etapa el empleo de técnicas piro e hidrometalúrgicas para la obtención del Hidróxido de litio, así como otros subproductos comercializables. Es de esta última etapa de donde se aprovecharán los estériles obtenidos para la fabricación del material de relleno en forma de Pasta.

1.2 Marco Legal y Mejores Prácticas disponibles

Dentro del marco legal existente en España, en lo referente a la generación de residuos dentro del ámbito minero, rige actualmente el R.D. 975 /2009 y su modificación posterior R.D. 777/2012.

Se hace hincapié en que, el R.D. 975/2009 no considera los rellenos del hueco minero como instalaciones de almacenamiento de residuos mineros (artículo 3).

Dentro del ámbito europeo el documento de referencia para la gestión de residuos mineros es el documento ref: “Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC”, desarrollado en 2009 y actualizado en 2018.

En su versión del 2009 (referido en capítulo 4.2.2.1.2 de la versión del 2018) considera el empleo de relleno con pasta cuando:

- Hay más de un 15 % de finos <20 µm (en base seca) en los residuos generados por el procesado del mineral; o
- El residuo extraído tiene un alto contenido en finos; o
- Se desea mantener el agua fuera del lugar de extracción; o
- El coste de bombeo del agua a la planta de tratamiento es elevado, (i.e debido a largas distancias)¹

Algunas de estas premisas se cumplen para el proyecto minero que LI tiene en tramitación de permisos y autorizaciones para poder operar.

2. Caracterización de la Pasta y comportamiento geoquímico esperable

Actualmente el proyecto minero “Las Navas”, está llevando a cabo los ensayos de caracterización para el del uso de pastas:

El programa de caracterización de la pasta que se ha propuesto es el siguiente:

- Caracterización del Material:
 - Distribución del tamaño de partícula
 - Densidad del material
 - pH y conductividad
 - Análisis mineralógico;
- Ensayos Reológicos para el comportamiento del material:
 - Ensayos de Asentamiento
 - viscosímetro rotacional

¹ Este texto esta traducido de versión original que se presenta a continuación:

“according to the MTWR BREF (EC-JRC 2009),when:

- there are more than 15 % fine particles < 20 µm (dry basis) in the extractive waste from mineral processing; or
- the extractive waste has a high fines content; or
- it is desirable to keep water out of the extraction site; or
- it is costly to pump back the water recovered from the extractive waste from mineral processing (i.e. over a large distance)”.

- Ensayos UCS para la estimación de las resistencias

El comportamiento Geoquímico de las Pasta, ha sido ampliamente estudiado para diferentes minas y distintos estériles procedentes de los procesos de beneficio propios de cada instalación. Los resultados de estos arrojan las siguientes conclusiones:

- Las características físicas de las pastas (contenido de humedad, conductividad hidráulica) a lo largo del tiempo permanecen en general inalteradas
- Por otro lado, las pastas presentan valores para el pH que se estabilizan en el entorno de valores básicos. Debido al empleo del cemento como elemento aglutinante.

De entre los muchos y variados artículos técnicos cabe destacar el trabajo de referencia **“Subaqueous and Subaerial Kinetic Testing of Paste Tailings”** written by *Rens Verburg, Steven Atkin, Bryony Hansen and David McWharter* para *INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACID ROCK DRAINAGE*. 2:877-890, en el año 2000

AGQ ha realizado la caracterización Geoquímica de los estériles esperables tras el beneficio del mineral. De esta caracterización, lo más reseñable fue que los resultados de los ensayos de lixiviación sobre los estériles de tratamiento presentaban un contenido en Metales y sulfatos por encima de los permitidos.

Esto no supone un problema para la generación de las pastas de relleno.

Teniendo esto en cuenta, y también de manera preventiva, se ha considerado que el material cementante para la formación de la pasta sea un cemento Portland sulfuro resistente (SR 42.5), con un doble objetivo:

- Conseguir que la mezcla alcance la resistencia portante estimada para el relleno de la cámara.
- Encapsular e inmovilizar las partículas de los materiales metálicos y sulfatos presentes para impedir su oxidación y evitar la degradación de las propiedades cementantes del cemento.

En referencia al comportamiento geoquímico de la pasta hay que señalar dos aspectos fundamentales:

- La mayor parte del agua existente en la matriz de la pasta es expulsada por rezume durante las primeras 24/48 hrs tras su deposición en la cámara durante el proceso de relleno.
- La calidad de las aguas esperable, según experiencias previas, como se ha comentado anteriormente, deberían mostrar en el corto plazo una mejoría, estabilizando los valores de pH hacia valores Neutro-Básicos.

Para analizar el comportamiento geoquímico de las probetas, AGQ se ha basado en el método EPA 1315, que consiste en el análisis de determinados elementos químicos sobre el lixiviado obtenido de la circulación de agua en un bloque monolítico sumergido durante ciclos de tiempo definidos. (ver figura 1).

Las probetas para el ensayo de Lixiviación fueron preparadas en el Laboratorio de P&C y enviadas a AGQ para la realización del ensayo. La formulación empleada para el conformado de la misma fue la siguiente:

- 74% de sólidos (residuos del proceso)
- 7% de cemento
- 19% de Agua

El tiempo de curado de la probeta antes de iniciar el ensayo fue de 28 días.



Figura 1: Detalle de Probeta de Ensayo. Fuente AGQ

AGQ ha emitido los resultados tras cuatro ciclos (anexo 1), que arrojan unos valores que permiten vislumbrar un comportamiento del relleno que sigue las pautas indicadas en el informe emitido el 23 de agosto de 2022 y relativo al comportamiento esperable de un relleno de pasta cementada.

Cabe destacar, tomando como referencia los valores medidos en el informe de caracterización realizado por AGQ ref: QSP-MI220200003 de fecha 14/03/2022, la reducción significativa de la presencia de sulfatos en disolución, así como de aquellos elementos que propiciaron la clasificación original del residuo como no inerte.

Tabla 7. Resultados del ensayo UNE-EN 12457-4

Parámetro	Ud.	RESIDUO SÓLIDO 1	RESIDUO SÓLIDO 2	RESIDUO SÓLIDO 3
		A-22/019085	A-22/019086	A-22/019087
Antimonio disuelto	µg/l	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Arsénico disuelto	µg/l	47,2	5,24	21,9
Bario disuelto	µg/l	153	167	111
Berilio disuelto	µg/l	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cadmio Disuelto	µg/l	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Carbono orgánico disuelto	mg/l	1,10	< 1,00	1,47
Cloruros	mg/l	< 10,0	< 10,0	< 10,0
Cobalto disuelto	µg/l	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cobre Disuelto	µg/l	< 2,50	< 2,50	3,79
Cromo disuelto	µg/l	206	214	114
Estaño disuelto	µg/l	< 10,0	< 10,0	< 10,0
Fenoles	mg/l	< 0,2	< 0,2	< 0,2
Fluoruros	mg/l	2,81	3,30	6,11
Manganeso	µg/l	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Mercurio Disuelto	µg/l	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Molibdeno Disuelto	µg/l	1,01	3,92	< 0,50
Níquel Disuelto	µg/l	< 5,00	< 5,00	< 5,00
Plomo Disuelto	µg/l	3,68	6,92	< 2,50
Selenio disuelto	µg/l	< 5,00	< 5,00	< 5,00
Sulfatos	mg/l	1771	1758	1928
Vanadio disuelto	µg/l	43,5	31,8	42,8
Zinc Disuelto	µg/l	< 50,0	< 50,0	< 50,0

Tabla 2: Valores de los ensayos de Caracterización. Fuente AGQ

Aniones -

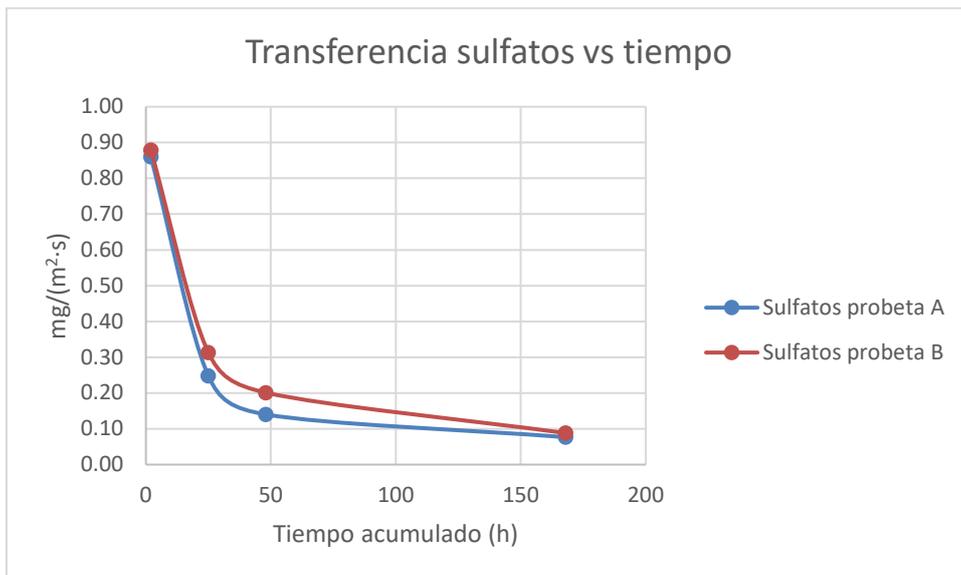
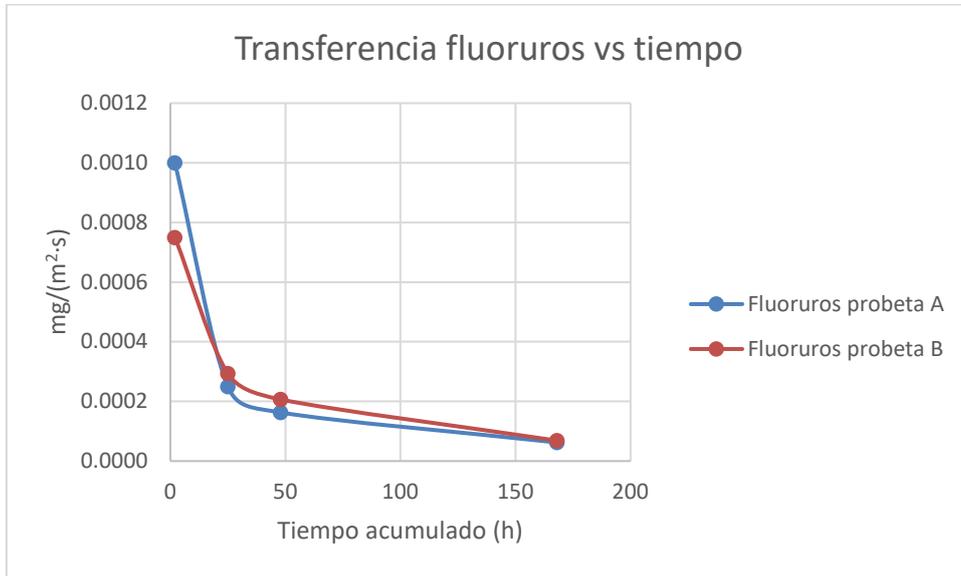
		mg/L CO3H-	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
* Bicarbonatos	-	mg/L CO3H-	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
* Bromuros	±20%	mg/L	< 0,10	< 0,10	< 0,20	< 0,50	< 0,20	< 0,20	< 0,50	< 0,50
* Carbonatos	±22%	mg/L CO3	48,2	79,6	354	455	194	251	587	699
Cloruros	±0,63	mg/L	1,66	1,54	4,64	4,33	2,08	2,12	3,32	3,13
Fluoruros	±30%	mg/L	0,08	0,06	0,23	0,27	0,15	0,19	0,30	0,33
Fosfatos	±30%	mg/L	< 0,50	< 0,50	< 1,00	< 2,50	< 1,00	< 1,00	< 2,50	< 2,50
Nitratos	±30%	mg/L	< 0,800	< 0,800	< 1,60	< 4,00	< 1,60	< 1,60	< 0,800	< 0,800
Nitritos	±30%	mg/L	< 0,0250	< 0,0250	< 0,0500	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250
Sulfatos	±30%	mg/L	68,8	70,3	228	288	129	185	368	423

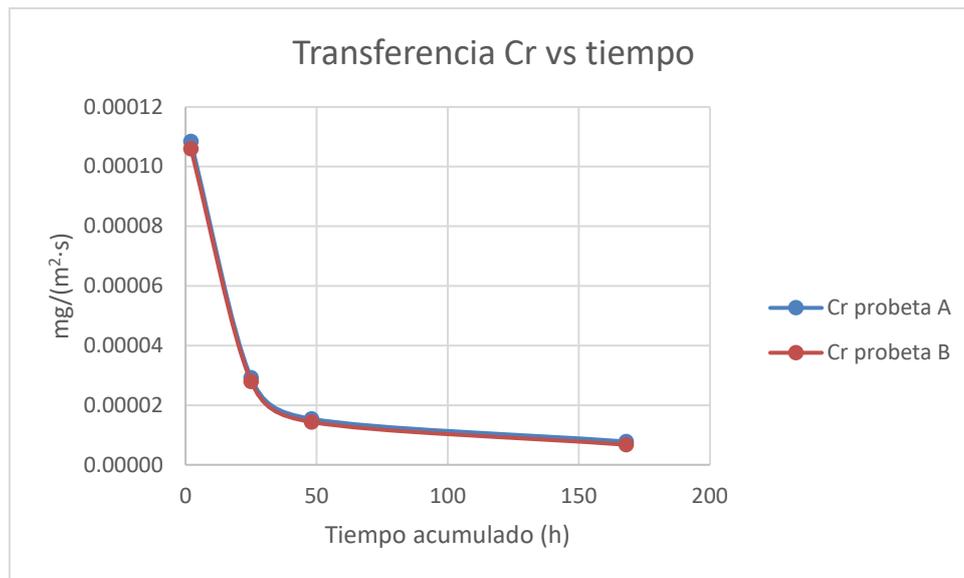
Metales Disueltos

Aluminio disuelto	±30%	µg/L	119	32,3	252	27,0	124	32,5	61,0	207
Antimonio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Arsénico Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Bario Disuelto	±30%	µg/L	10	15	66	86	52	74	81	100
Berilio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cadmio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cobalto Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cobre Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50							
Cromo Disuelto	±30%	µg/L	8,68	8,48	26,9	25,7	14,2	13,2	37,5	32,3
Estaño Disuelto	±30%	µg/L	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
Estroncio Disuelto	±30%	µg/L	160	392	1.412	2.065	990	933	3.341	4.004
Hierro Disuelto	±30%	µg/L	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0
Litio Disuelto	±30%	µg/L	3.183	3.278	10.627	10.641	5.039	5.416	7.681	7.569
Manganeso Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Mercurio Disuelto	±30%	µg/L	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Molibdeno Disuelto	±30%	µg/L	5,19	5,56	17,8	19,8	9,72	10,7	29,0	30,7
Níquel Disuelto	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00
Plata Disuelta	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00

Tabla 2: Resultados tras 4 ciclos del ensayo de Lixiviación dinámica. Fuente AGQ

Según el ensayo EPA 1315 la relación de agua/superficie de probeta expuesta es de 9ml/cm², teniendo en cuenta esta relación y la duración de los ciclos de lixiviación, se obtienen las siguientes gráficas.





Las gráficas indican una tendencia a la disminución de las concentraciones de los elementos de referencia (Sulfatos, Fluoruros y Cromo disuelto).

Asimismo, y como línea base del Proyecto se realizaron analíticas de las aguas superficiales y aguas subterráneas (Ref: AGQ QSP-MI220600002_aguas de fecha 05/10/2022) que presentaban los siguientes valores para los elementos traza:

TABLA 5. RESULTADOS ANALÍTICOS AGUAS SUBTERRÁNEAS						
PARÁMETROS	UNIDADES	A-22/082781	A-22/082782	A-22/082784	A-22/082785	A-22/082786
		MASB001	MASB002	MASB003	MASB004	MASB005
		MA-220602-110722/AS-01	MA-220602-110722/AS-02	MA-220602-110722/AS-03	MA-220602-110722/AS-04	MA-220602-110722/AS-01
ANIONES						
*Bicarbonatos	mg/l CO ₃ H	78,08	241	132,2	125,5	110,6
Bromuros	mg/l	0,112	< 0,2	< 0,1	0,122	< 0,1
*Carbonatos	mg/l CO ₃	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10
Cianuro total	mg/l	< 15	< 15	< 15	< 15	< 15
Cloruros	mg/l	25	16,6	18,5	35,7	7,8
Fluoruros	mg/l	0,33	2,25	0,33	0,48	0,27
Fosfatos	mg/l	< 0,5	< 1	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Nitratos	mg/l	< 0,2	25	2,95	< 0,2	1,2
Nitritos	mg/l	< 0,025	1,69	0,325	< 0,025	< 0,025
Sulfatos	mg/l	73,7	20,8	15	18,8	5,38
CATIONES						
Amonio	mg/l	< 5	7,11	6,41	< 5	< 5
Calcio disuelto	mg/l	22,9	20,2	19,1	16,4	27,4
Magnesio disuelto	mg/l	12,6	10,8	10,1	12,3	5,82
Potasio disuelto	mg/l	3,7	22,3	11,9	5,23	< 1
Sodio disuelto	mg/l	28,1	64,4	28,2	33,9	7,21
COMPUESTOS FENÓLICOS						
Fenoles	mg/l	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
METALES DISUELTOS						
Aluminio disuelto	µg/l	< 25	479	45,3	< 25	< 25
Antimonio Disuelto	µg/l	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Arsénico Disuelto	µg/l	7,61	6,55	8,98	3,37	10,8
Berilio Disuelto	µg/l	< 0,25	0,35	< 0,25	< 0,25	< 0,25
Cadmio Disuelto	µg/l	0,07	0,08	0,46	< 0,05	< 0,05
Cobalto Disuelto	µg/l	< 0,125	0,29	0,42	< 0,125	< 0,125
Cobre Disuelto	µg/l	5,91	5,46	14,6	< 1,25	< 1,25
Cromo Disuelto	µg/l	< 1,25	1,44	< 1,25	< 1,25	< 1,25
Estaño Disuelto	µg/l	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5	< 2,5
Hierro Disuelto	µg/l	< 25	549,61	1820,5	< 25	< 25
Litio Disuelto	µg/l	515	1979	543	514	3,29
Manganeso Disuelto	µg/l	3,63	84,2	412	259	< 2,5

Como se puede apreciar en el caso de los fluoruros, los valores del agua de lixiviación están por debajo de los medidos en la línea de base.

En cuanto a la conductividad Hidráulica de este tipo de materiales cabe indicar que, los factores que influye en la conductividad hidráulica de los residuos mineros son la cantidad de finos presentes (Distribución Granulométrica), peso específico de las partículas y el índice de huecos.

De manera generalizada, se puede decir, que los lodos mineros están en valores de permeabilidad entre 10^{-5} y 10^{-8} m/s.

De forma teórica se puede calcular la conductividad hidráulica según la fórmula de Hanze, que se expresa como K (conductividad hidráulica) = d_{10}^2 siendo d_{10} el diámetro en milímetros de las partículas finas de la Curva granulométrica que pasen el 10 %.

Se presenta a modo de ejemplo el siguiente caso:

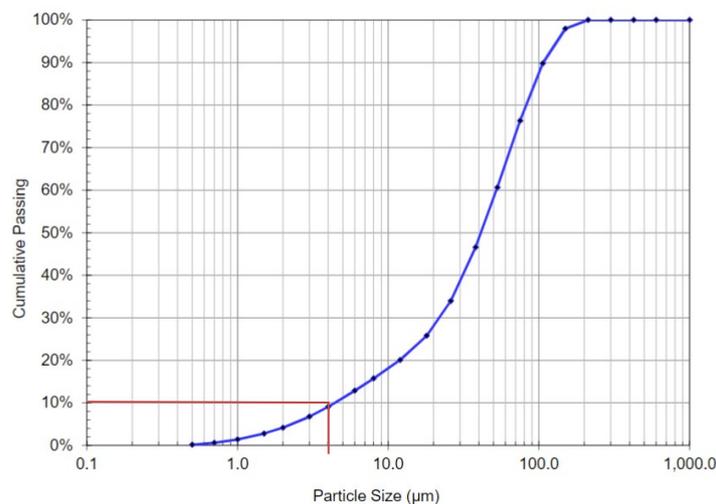


Figura 2: Gráfica de Distribución del tamaño de partícula. Fuente P&C

Mirando la gráfica el valor del d_{10} es de $4\mu\text{m}$ aplicando la fórmula de Hanze obtendríamos un valor de $1.6 \times 10^{-5} \text{m/s}$. Para esta muestra en concreto el ensayo de permeabilidad en laboratorio arrojó un valor de $4.0 \times 10^{-5} \text{m/s}$.

Por lo que se puede correlacionar bastante bien el uso de la formulación teórica con el ensayo de permeabilidad.

Con estos valores de permeabilidad teórica, la movilización del agua a través del bloque monolítico que constituye el relleno en forma de pasta se espera sea difícil de ocurrir. Teniendo en cuenta que la roca de caja del cuerpo minado presentará valores de conductividad hidráulica mayores a los del relleno debido a la fracturación provocada por las labores mineras; esto propiciará que el agua subterránea (en caso de la presencia de esta) se movilice por estas zonas sin que atraviese el relleno colocado.

3. Consideraciones Finales

Teniendo en cuenta lo anterior P&C considera lo siguiente:

- Los rellenos con pasta son considerados generalmente como una parte de la operación minera y como tal han de ser tratados dentro de la secuencia del desarrollo de los trabajos de interior.
- Los rellenos con pastas están considerados como Mejores prácticas disponibles dentro de la gestión del residuo minero.

Con los datos preliminares procedentes del ensayo de lixiviación se puede concluir:

- El pH del relleno está en la zona Básica.
- Reducción significativa de los elementos traza (Sulfatos, Fluoruros y Cromo).
- Inhibición e Inmovilización de los sulfatos y materiales metálicos debido al uso de cemento sulfuro resistente que encapsula estos elementos en la matriz de la mezcla.
- El residuo de planta, está considerado como No Inerte, el subproducto generado (relleno de Pasta) según los estudios realizados se propone clasificarlo como inerte, debido a la inmovilización de los elementos traza.
- Por las características de las Pastas (conductividades hidráulicas bajas), se considera que el relleno de la cámara difícilmente será atravesado por agua de infiltración.

considera, en referencia a la calidad de agua a largo plazo, la misma “a priori” no sería peor de la que actualmente está presente el macizo rocoso.

A modo de bibliografía de referencia se indican los siguientes artículos:

- Mine Fill conference 2007
Hydro-geotechnical and geochemical characterization of column consolidated cemented paste backfill
BELEM, T., EL AATAR, O., BENZAAZOUA, M., BUSSIÈRE, B., YILMAZ, E.
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada
- Mine Fill conference 2007
Leaching behaviour and metal fixation within cemented paste backfill materials
E. FRIED, M. BENZAAZOUA, B. BUSSIERE and T. BELEM.
University of Quebec in Abitibi-Temiscamingue, Rouyn-Noranda, Quebec, Canada

Santiago Castro

Ingeniero de Minas



**ANEXO A : RESULTADOS PRELIMINARES DEL ENSAYO DE LIXIVIACIÓN
DINAMICA AGQ DICIEMBRE 2022**

Tipo Muestra:	AGUA RESIDUAL	Registrada en:	AGQ Mining	Cliente (^):	LITHIUM IBERIA, S.L.
Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315	Centro Análisis:	AGQ Labs	Domicilio (^):	P.I. San José Obrero s/n CANAVERAL 10820
PNT Muestreo				Cod Cliente:	ES21-00000489
Cliente 3º(^):	---			Contrato:	QSP-MI221100001

A continuación se exponen el Informe de Ensayo y Anexo Técnico asociados a la muestra, en los cuales se pueden consultar toda la información relacionada con los ensayos realizados.

Los Resultados de este informe solo afectan a la muestra tal como es recibida en el laboratorio. Queda prohibida la reproducción parcial de este informe sin la aprobación por escrito del laboratorio. AGQ no se hace responsable de la información proporcionada por el cliente, asociada a la toma de muestras y a otros datos descriptivos, marcados con (^). Los Resultados emitidos en este informe, no han sido corregidos con factores de recuperación

Izaskun Martínez Pizarro

Francisco Arteaga Leon

LAB MICROBIOLOGICO

FECHA EMISIÓN: 01/12/2022

OBSERVACIONES (*):

Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315	Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL
---------	-----------------------	-----------------------------

RESULTADOS ANALITICOS

Nº de Referencia Descripción(*)	A-22/138614 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T01	A-22/138617 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T01	A-22/140059 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T02	A-22/140061 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T02	A-22/140062 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T03	A-22/140063 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T03	A-22/142365 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T04	A-22/142367 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T04		
Parámetro	Incert	Unidades								
Mediciones In Situ										
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	-	µS/cm a 25 °C	474	778	1.955	2.770	1.325	1.728	2.950	3.480
pH In Situ Medido MA	-		11,4	11,6	11,6	11,8	11,7	11,8	12,1	12,2
Parámetros Físico-Químicos										
* Potencial Redox	-	mV	505	827	25,6	37,6	32,0	22,6	35,6	11,1
Cationes +										
Calcio Disuelto	±23%	mg/L	14,8	39,0	100	216	85,3	147	305	329
Magnesio Disuelto	±21%	mg/L	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20	< 0,20
Potasio Disuelto	±18%	mg/L	33,2	31,0	80,9	81,5	30,8	33,3	42,2	42,8
Sodio Disuelto	±21%	mg/L	13,0	12,4	35,2	34,3	14,6	15,4	24,8	24,5
Aniones -										
* Bicarbonatos	-	mg/L CO3H-	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
* Bromuros	±20%	mg/L	< 0,10	< 0,10	< 0,20	< 0,50	< 0,20	< 0,20	< 0,50	< 0,50
* Carbonatos	±22%	mg/L CO3	48,2	79,6	354	455	194	251	587	699
Cloruros	±0,63	mg/L	1,66	1,54	4,64	4,33	2,08	2,12	3,32	3,13
Fluoruros	±30%	mg/L	0,08	0,06	0,23	0,27	0,15	0,19	0,30	0,33
Fosfatos	±30%	mg/L	< 0,50	< 0,50	< 1,00	< 2,50	< 1,00	< 1,00	< 2,50	< 2,50
Nitratos	±30%	mg/L	< 0,800	< 0,800	< 1,60	< 4,00	< 1,60	< 1,60	< 0,800	< 0,800
Nitritos	±30%	mg/L	< 0,0250	< 0,0250	< 0,0500	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250	< 0,1250
Sulfatos	±30%	mg/L	68,8	70,3	228	288	129	185	368	423
Metales Disueltos										
Aluminio disuelto	±30%	µg/L	119	32,3	252	27,0	124	32,5	61,0	207
Antimonio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Arsénico Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Bario Disuelto	±30%	µg/L	10	15	66	86	52	74	81	100
Berilio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cadmio Disuelto	±30%	µg/L	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cobalto Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cobre Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Cromo Disuelto	±30%	µg/L	8,68	8,48	26,9	25,7	14,2	13,2	37,5	32,3
Estaño Disuelto	±30%	µg/L	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0	< 10,0
Estroncio Disuelto	±30%	µg/L	160	392	1.412	2.065	990	933	3.341	4.004
Hierro Disuelto	±30%	µg/L	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0
Litio Disuelto	±30%	µg/L	3.183	3.278	10.627	10.641	5.039	5.416	7.681	7.569
Manganeso Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Mercurio Disuelto	±30%	µg/L	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Molibdeno Disuelto	±30%	µg/L	5,19	5,56	17,8	19,8	9,72	10,7	29,0	30,7
Níquel Disuelto	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00
Plata Disuelta	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00

Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315	Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL
---------	-----------------------	-----------------------------

RESULTADOS ANALITICOS

Nº de Referencia Descripción(*)	A-22/138614 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T01	A-22/138617 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T01	A-22/140059 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T02	A-22/140061 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T02	A-22/140062 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T03	A-22/140063 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T03	A-22/142365 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016 T04	A-22/142367 Eluato EPA 1315 LLE-52-0016_2 T04
------------------------------------	---	--	---	--	---	--	---	--

Parámetro	Incert	Unidades	A-22/138614	A-22/138617	A-22/140059	A-22/140061	A-22/140062	A-22/140063	A-22/142365	A-22/142367
Metales Disueltos										
Plomo Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	2,80	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Selenio Disuelto	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00
* Talio Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
Titanio Disuelto	±30%	µg/L	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00	< 5,00
* Torio Disuelto	-	µg/L	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
* Uranio Disuelto	-	µg/L	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00	< 1,00
Vanadio Disuelto	±30%	µg/L	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50	< 2,50
* Wolframio Disuelto	-	µg/L	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25	< 25
Zinc Disuelto	±30%	µg/L	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0	< 50,0

Microbiología										
* ²⁰ Inhibición Mov. Daphnia magna	±20%	Equitox/m3	< 1	< 1	3	4	3	4	4	9

Nota. A: Ensayo subcontratado y acreditado. N: Ensayo subcontratado y no acreditado. RE: Recuento en placa estimado. Las incertidumbres de los parámetros acreditados están calculadas y a disposición del cliente. La Incertidumbre aplicada al resultado no aplica para valores menores al Límite de Cuantificación (LC). La Incert Exp (U) ha sido reportada con un Factor de Cobertura k= 2, para un nivel de confianza aprox del 95%.

(20) Ensayos cubiertos por la Acreditación ENAC Nº 229 LE519, LE1296, LE1409

Estudio GEO-22/00180 EPA 1315

Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL

ANEXO TECNICO

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma.	Lim Cuantif/ Detec (#)
Mediciones In Situ				
Conductividad Eléctrica In Situ Medido MA	PI-203	Electrometría		70,0 µS/cm a 25 °C
pH In Situ Medido MA	PI-202	Electrometría		2,00
Parámetros Físico-Químicos				
* Potencial Redox	PE-916	Electrometría		0,00 mV
Cationes +				
Calcio Disuelto	PE-2107 Rev. 7	Espect ICP-OES		0,500 mg/L
Magnesio Disuelto	PE-2107 Rev. 7	Espect ICP-OES		0,20 mg/L
Potasio Disuelto	PE-2107 Rev. 7	Espect ICP-OES		1,00 mg/L
Sodio Disuelto	PE-2107 Rev. 7	Espect ICP-OES		0,500 mg/L
Aniones -				
* Bicarbonatos	PEC-011	Electrometría		10,0 mg/L CO ₃ H-
* Bromuros	PE-2090	Cromatog Iónica		0,50 mg/L
* Carbonatos	PEC-011	Electrometría		10,0 mg/L CO ₃
Cloruros	PE-2090	Cromatog Iónica		0,50 mg/L
Fluoruros	PE-2090	Cromatog Iónica		0,05 mg/L
Fosfatos	PE-2090	Cromatog Iónica		2,50 mg/L
Nitratos	PE-2090	Cromatog Iónica		0,800 mg/L
Nitritos	PE-2090	Cromatog Iónica		0,1250 mg/L
Sulfatos	PE-2090	Cromatog Iónica		0,50 mg/L
Metales Disueltos				
Aluminio disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		25,0 µg/L
Antimonio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		0,5 µg/L
Arsénico Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Bario Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		5 µg/L
Berilio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		0,50 µg/L
Cadmio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		0,50 µg/L
Cobalto Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Cobre Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Cromo Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		5,00 µg/L
Estaño Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		10,0 µg/L
Estroncio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		10 µg/L
Hierro Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		50,0 µg/L
Litio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Manganeso Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Mercurio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		1,00 µg/L
Molibdeno Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		0,50 µg/L
Níquel Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		5,00 µg/L
Plata Disuelta	PE-303	Espect ICP-MS		5,00 µg/L
Plomo Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
Selenio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		5,00 µg/L
* Talio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L

Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315		Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL	
---------	-----------------------	--	-----------------------------	--

Parámetro	PNT	Técnica	Ref. Norma.	Lim Cuantif/ Detec (#)
Titanio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		5,00 µg/L
* Torio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		1,00 µg/L
* Uranio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		1,00 µg/L
Vanadio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		2,50 µg/L
* Wolframio Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		25 µg/L
Zinc Disuelto	PE-303	Espect ICP-MS		50,0 µg/L

Microbiología

* ²⁰ Inhibición Mov. Daphnia magna	AM-301	Bioensayo		1 Equitox/m3
---	--------	-----------	--	--------------

Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315	Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL
---------	-----------------------	-----------------------------

MUESTRAS

	Punto de Muestreo	Fecha/Hora Muestreo	Lugar de Muestreo	Coordenadas x,y	Fecha Inicio	Fecha Recepción	Análisis	Muestreado por
A-22/138614		09/11/2022			09/11/2022	09/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/138617		09/11/2022			09/11/2022	09/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/140059		10/11/2022			11/11/2022	11/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/140061		10/11/2022			11/11/2022	11/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/140062		11/11/2022			11/11/2022	11/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/140063		11/11/2022			11/11/2022	11/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/142365		16/11/2022			16/11/2022	16/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ
A-22/142367		16/11/2022			16/11/2022	16/11/2022	ES21-00000489-31	Personal AGQ

Estudio	GEO-22/00180 EPA 1315	Tipo Muestra: AGUA RESIDUAL
---------	-----------------------	-----------------------------

Observaciones:

- A-22/140059 A-22/140059 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 100%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 25%

- A-22/140061 A-22/140061 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 100%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 3.125%

- A-22/140062 A-22/140062 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 100%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 12.5%

- A-22/140063 A-22/140063 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 100%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 6.25%

- A-22/142365 A-22/142365 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 100%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 6.25%

- A-22/142367 A-22/142367 : TOXICIDAD AGUDA D.magna:
Concentración mínima correspondiente al 100% de inmovilización en 24h: 25%
Concentración máxima correspondiente al 0% de inmovilización en 24h: 3.125%

- A-22/140059 Incertidumbre 0,2 ud pH

- A-22/140059 Origen D.magna: viales de efipias de Ecotest, S.L.
Edad D.magna: <24h.
Se ha considerado la CE50i
Los resultados de la CE50i corresponden a las 24h.
No se observan comportamientos anormales de Daphnia magna en el ensayo.
Método cálculo:Probit.

- A-22/140059 Se emplea procedimiento AM-301 para Determinación de inhibición de movilidad de D. magna Straus (Cladocera,Crustácea)
Conservación muestra: congelación
Descongelación muestra: temp. Ambiente
Prep. muestra: decantación

Observaciones (*):

- A-22/140062 A-22/140062 : PE-2090: El resultado puede verse afectado por el tiempo transcurrido entre la toma de muestra y el inicio del ensayo.

- A-22/140063 A-22/140063 : PE-2090: El resultado puede verse afectado por el tiempo transcurrido entre la toma de muestra y el inicio del ensayo.

RI 19599

INFORME DE INVESTIGACIONES/1996

**Impactos ambientales del relleno de
desechos mineros cementados**

DEPARTAMENTO DE INTERIOR DE LOS ESTADOS UNIDOS

OFICINA DE MINAS DE LOS ESTADOS UNIDOS

Declaración de misión del Departamento de Interior de EE. UU.

Como la principal agencia de conservación de la Nación, el Departamento de Interior tiene la responsabilidad de la mayoría de nuestras tierras públicas y recursos naturales de propiedad nacional. Lo que antecede incluye fomentar el uso racional de nuestros recursos de tierra y agua; proteger nuestros peces, vida silvestre y diversidad biológica; preservar los valores ambientales y culturales de nuestros parques nacionales y lugares históricos; y proveer para el disfrute de la vida a través de la recreación al aire libre. El Departamento evalúa nuestros recursos energéticos y minerales y trabaja para garantizar que su desarrollo sea en el mejor interés de toda nuestra población fomentando la administración y la participación ciudadana en su cuidado. El Departamento también tiene una gran responsabilidad con las comunidades de las reservas indígenas americanas y con las personas que viven en territorios insulares bajo la administración de los EE. UU.

Informe de Investigaciones 9599

Impactos ambientales del relleno de residuos mineros cementados

Por R. L. Levens, A. D. Marcy y C. M. K. Boldt

DEPARTAMENTO DE INTERIOR DE LOS ESTADOS UNIDOS
Bruce Babbit, Secretario

OFICINA DE MINAS
Rhea Lydia Graham, Directora

Número de serie estándar internacional
ISSN 1066-5552

INDICE DE CONTENIDOS

	<i>Página</i>
RESUMEN.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
ANTECEDENTES.....	9
FINALIDAD Y OBJETIVOS	9
HIDROQUÍMICA.....	9
PERMEABILIDAD AL AIRE Y SATURACIÓN DEL AGUA DEL RELLENO	10
INVESTIGACIÓN RELACIONADA	11
METODOLOGÍA.....	12
RECOPIACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO.....	12
RECOPIACIÓN DE DATOS DE CAMPO	13
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS.....	13
ENSAYO Y LIQUIDACIÓN DE LA MUESTRA CN	14
DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA.....	14
CAPACIDAD NEUTRALIZANTE DEL RELLENO CEMENTADO	14
LAVADO CON AGUA DESIONIZADA	15
LAVADO CON ÁCIDO SULFÚRICO	16
CALIDAD DEL AGUA DE CAMPO	19
EXPOSICIONES Y CONCLUSIONES.....	20

ILUSTRACIONES

Figura 1 - Sección transversal a través de la célula de presión Tempe.	22
Figura 2 - Diagrama esquemático de trabajos mineros y pruebas de rebaje.	23
Figura 3 - Distribución del tamaño de partículas de las muestras de relaves.	24
Figura 4 - pH de H ₂ SO ₄ , lavado de lixiviados, muestra CN	25
Figura 5 - pH de H ₂ SO ₄ , lavado de lixiviados, muestra SO.	26
Figura 6 - pH de H ₂ SO ₄ , lavado de lixiviados, muestra SN.	27

TABLAS

Tabla 1. Análisis mineralógicos de relaves utilizados en relleno ¹	12
Tabla 2. Ensayo químico de materiales de relleno, en partes por millón	14
Tabla 3. Datos ICP-AES del análisis de extracción con ácido fuerte de materiales de relleno, en miligramos por litro	14
Tabla 4. Capacidad neutralizadora de ácidos del cemento portland en muestras de relleno, en miliequivalentes.....	15
Tabla 5. Capacidad neutralizadora de ácidos de relaves en muestras de relleno, en miliequivalentes.....	15
Tabla 6. Capacidad neutralizadora de ácido de muestras de relleno cementado, en miliequivalentes	15
Tabla 7. Concentraciones de elementos en muestras que contienen cemento después de lavar con agua desionizada durante 7 días, en miligramos por litro.....	16
Tabla 8. Potencial neutralizante máximo de los materiales de relleno cementado.....	17
Tabla 9. Potencial neutralizante de los materiales de relleno cementado, excluyendo FeCO_3	18
Tabla 10. Concentraciones de elementos en muestras de relleno cementado después de lavado con H_2SO_4 durante 227 días, en miligramos por litro	19
Tabla 11. Media y margen (entre paréntesis) de concentraciones de elementos en muestras de agua de relleno cementado en mina de prueba	20
Tabla 12. Índices de saturación de muestras de agua	20

ABREVIATURAS DE UNIDADES DE MEDIDA UTILIZADAS EN ESTE INFORME

cm	centímetro	mm	milímetro
cm ³	centímetro cúbico	mmho/cm	miliohmios/centímetros
g	gramo	mol	mol
H	hora	Mpa	megapascal
kg	kilogramo	m/s	metro por segundo
L	litro	mV	milivoltios
m	metro	pct	por ciento
mequi.	miliequivalente	ppm	parte por millón
mg	miligramo	S	siemens
mg/g	miligramo por gramo	t	tonelada métrica
mg/L	miligramo por litro	°C	grado Celsius
mL	mililitro	µm	micrómetro

La referencia a productos específicos no implica aprobación por parte de la Oficina de Minas de los EE. UU.

Impactos ambientales del relleno de desechos mineros cementados

Por R. L. Levens,¹ A. D. Marcy² y C. M. K. Boldt³

RESUMEN

Los investigadores de la Oficina de Minas de los EE. UU. realizaron investigaciones para evaluar el potencial de contaminación del agua subterránea por los desechos mineros utilizados como relleno. Se recogieron muestras de relleno de desechos cementados y descarga de agua de pozos de perforación y filtraciones para su uso en análisis químicos y pruebas de laboratorio para determinar los factores físicos y químicos que controlan la liberación de metales pesados al agua subterránea.

La mayor retención de agua del relleno cementado (en comparación con el relleno de arena no cementado) reduce el área de superficie expuesta a la oxidación, lo que, a su vez, reduce la cantidad de ácido obtenido. El ácido es neutralizado por el cemento y los minerales contenidos en el relleno. La distribución del tamaño de grano de los relaves utilizados para el relleno afecta a la integridad estructural del relleno cementado bajo el ataque del agua ácida; la ruptura de la estructura de relleno libera materiales neutralizantes de manera más rápida. Los rebajes rellenos en roca con baja conductividad hidráulica constituirán rutas de flujo preferenciales después de la inundación de la mina; sin embargo, la tasa de flujo a través del relleno será mucho más lenta que cuando el rebaje está parcialmente saturado durante la explotación de la mina. Teniendo en cuenta todos los factores, la generación de ácido y la liberación de iones metálicos del relleno cementado deben ser menores que en el relleno de arena no cementado.

¹ Hidrólogo

² Químico investigador

³ Ingeniero civil

Centro de Investigación de Spokane, Oficina de Minas de los EE. UU., Spokane, WA

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES

La Ley de Agua Potable Segura fue promulgada en 1974 por el Congreso para desarrollar reglamentaciones para proteger las fuentes subterráneas de agua potable de la Nación. Uno de los resultados fue el programa de Control de Inyección Subterránea (UIC), promulgado en 1981 por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA). Según las disposiciones del UIC, un pozo Clase V incluye "Relleno de arena y otros pozos de relleno utilizados para inyectar una mezcla de agua y arena, relaves de molienda u otros sólidos en partes extraídas de minas subterráneas, ya sea que lo que se inyecte sea un desecho radiactivo o no lo sea" [40 CFR 146.5(e)(8)]. Un pozo se define en términos generales como un hoyo excavado o un pozo perforado, taladrado o excavado cuya profundidad es mayor que la dimensión de su superficie más grande.

Debido a que la colocación de relleno de desechos mineros en aberturas subterráneas se considera una inyección subterránea según las regulaciones de la UIC, el efecto en las prácticas de relleno de minas podría ser extenso. Actualmente, más de 20 minas de metal en los Estados Unidos utilizan materiales de relleno que varían desde roca de cantera hasta relaves de molienda cementados. El objetivo principal del relleno es dar soporte al suelo durante la explotación minera; sin embargo, el relleno se considera cada vez más como un medio para minimizar la disposición superficial de los desechos mineros.

El agua afectada por el relleno durante la minería activa suele bombearse a la superficie, en donde su eliminación se regula como descarga superficial. Las zonas rellenadas pueden inundarse después del cierre de una mina, lo que posiblemente cause la contaminación de las aguas subterráneas. Por lo tanto, a diferencia de las normas que abordan la disposición superficial, las normas relativas a la contaminación de las aguas subterráneas, después del cierre de la mina, serán un enfoque principal del programa UIC.

Devolver los desechos de la mina a la excavación original es una opción atractiva porque los minerales originales son estables en ese entorno. Sin embargo, la oxidación del relleno después de colocarlo bajo tierra y antes de la inundación, después del cierre de la mina, puede liberar metales y producir precipitados minerales secundarios que son más solubles que los minerales originales. Debido a que muchas minas permanecen abiertas durante décadas, la disolución de minerales secundarios almacenados en un relleno parcialmente saturado puede ser una fuente importante de contaminación por metales del agua subterránea después del cierre de la mina.

La adición de cemento al relleno cambia tanto las

características químicas como físicas del relleno. La adición de cemento amortiguará las reacciones de oxidación que producen el ácido, lo que resultará en una menor movilización de metales. Y lo que es más importante, los cambios en la estructura física del relleno resultantes de la adición de cemento pueden aumentar la capacidad del relleno para retener agua antes del cierre de la mina. Una mayor retención de agua reducirá la permeabilidad del relleno al aire y disminuirá el área superficial total de sulfuros disponibles para la oxidación directa. Además, la adición de cemento reduce, en gran medida, la conductividad hidráulica del relleno, lo que actúa para reducir el transporte de metales al reducir el caudal de agua subterránea a través del relleno una vez que se inunda.

Los mecanismos que controlan la disolución de minerales en el relleno cementado y la movilidad de los metales pesados cambian cuando una mina se inunda después del cierre de la misma. Cantidades reducidas de oxígeno limitarán la oxidación de sulfuros, así como la precipitación de hidróxidos metálicos. Se debe considerar la naturaleza de los cambios que probablemente ocurrirán después de la inundación de la mina para poder estimar los impactos del relleno de desechos de la mina sobre el agua subterránea.

FINALIDAD Y OBJETIVOS

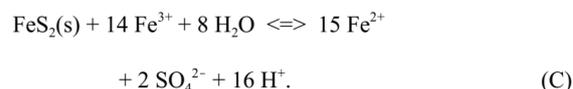
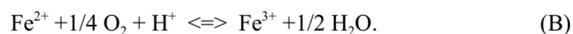
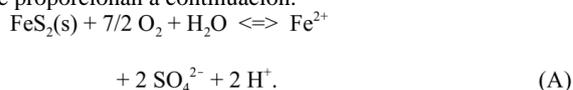
La finalidad de esta investigación realizada por la Oficina de Minas de los EE. UU. (USBM) fue estudiar los posibles impactos del relleno de desechos mineros cementados sobre la calidad del agua subterránea en la roca que rodea un rebaje. Se realizaron estudios de campo y de laboratorio sobre la movilización y el transporte de metales desde el relleno cementado. Los objetivos del trabajo de campo fueron (1) documentar los impactos del relleno cementado en el agua que se descarga desde un rebaje seleccionado, (2) investigar cómo la movilidad de los metales retenidos en el relleno cementado difiere de su movilidad en el relleno de arena de desechos mineros no cementados, y (3) discutir los impactos, a largo plazo, del relleno cementado después del cierre de la mina y la posterior inundación de la mina. Se realizaron estudios de laboratorio para (1) medir los cambios en la capacidad de neutralización de ácidos que resultan de agregar cemento al relleno, (2) medir la velocidad de los procesos de neutralización, (3) evaluar el impacto de las diferencias en la distribución del tamaño de grano sobre la resistencia del relleno cementado y la tasa de ataque químico, y (4) investigar el efecto de agregar cemento al relleno sobre la conductividad hidráulica y la saturación de agua.

HIDROQUÍMICA

La oxidación de sulfuros productores de ácido, tal como la piritita (FeS_2), y la disolución asociada de otros minerales, controlan la composición química del agua que drena de las minas de sulfuro.

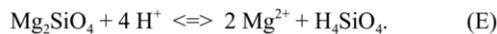
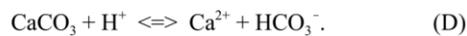
Inicialmente, la piritita es oxidada por oxígeno molecular (O_2) en presencia de agua, produciendo iones de sulfato (SO_4^{2-}), iones ferrosos (Fe^{2+}) e iones de hidrógeno (H^+). A continuación, el ion Fe^{2+} es oxidado por O_2 a ion férrico (Fe^{3+}). Esta segunda etapa es catalizada por la bacteria *Thiobacillus ferrooxidans*. La piritita es oxidada por el ion Fe^{3+} , produciendo Fe^{2+} , SO_4^{2-} y H^+ adicionales en la etapa final

(Lowson, 1982). Las tres etapas de la oxidación de la piritita se proporcionan a continuación.



Fe^{2+} , SO_4^{2-} y H^+ se liberan en la solución mediante la oxidación de la pirita. El Fe^{3+} puede precipitarse como ferrihidrita $[\text{Fe}(\text{OH})_3]$, goetita $[\text{FeO}(\text{OH})]$, orjarosita $[\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6]$, que se conocen de manera colectiva como "yellow boy". La solubilidad del Fe^{3+} aumenta a valores de pH bajos ($<4,5$) y se reduce durante la oxidación de la pirita adicional. El ion Fe^{3+} se convierte en el agente oxidante dominante por debajo del pH 3,0. La presencia de *T. ferrooxidans* aumenta de manera considerable la velocidad a la que se oxida el Fe^{2+} , perpetuando así la oxidación de la pirita por el Fe^{3+} .

El H^+ producido durante la oxidación de la pirita puede consumirse en reacciones que impliquen minerales de carbonato y silicato, liberando iones importantes, incluyendo calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), bicarbonato (HCO_3^-) y ácido silícico (H_4SiO_4). Las reacciones típicas que implican calcita (CaCO_3) y olivino (Mg_2SiO_4) se proporcionan a continuación.



Metales distintos del Fe también se pueden lixiviar del mineral, del relleno o de la roca madre mediante el agua ácida creada por la oxidación. Las concentraciones resultantes de metales pesados están controladas por la capacidad amortiguadora del sistema geoquímico, de las reacciones de oxidación-precipitación, de las reacciones de disolución-precipitación o de las reacciones de desorción-adsorción. La capacidad amortiguadora del sistema está determinada, en gran medida, por la geoquímica de los iones principales. Por lo tanto, el conocimiento de las reacciones de disolución y de precipitación, que implican a los iones principales, es una clave para comprender la movilidad de los metales.

La oxidación de los minerales de sulfuro contenidos en el relleno, que se han saturado parcialmente antes del cierre de la mina y de la inundación, produce minerales secundarios que se retienen en el relleno. La solubilidad de estos minerales aumentará después de que el relleno se sature, lo que da lugar a la posible liberación de metales. La disolución de minerales secundarios que contienen Fe^{3+} puede liberar este agente oxidante, lo que resulta en una continuación temporal de la oxidación del sulfuro después de que se haya inundado el relleno.

PERMEABILIDAD AL AIRE Y SATURACIÓN DEL AGUA DEL RELLENO

La permeabilidad de los materiales porosos tal como el relleno al aire (conocido como permeabilidad de la fase no humectante) es una función de la geometría de los poros y de la cantidad de agua contenida en los poros. Las propiedades geométricas de los poros incluyen la porosidad, la forma y las dimensiones de los espacios porosos y la tortuosidad de las vías de flujo a través de los espacios porosos interconectados; estas propiedades se suelen combinar en un coeficiente único, el índice de distribución del tamaño de poro (λ).

La saturación del agua se suele expresar como saturación efectiva (S_e) cuando se considera el flujo de aire o de agua; S_e se define como la fracción de los vacíos a través de los cuales fluye realmente el agua ($0 \leq S_e \leq 1,0$). La saturación efectiva es una función de la presión capilar (P_c), definida como la diferencia entre las presiones del aire y del agua en los espacios porosos, que a su vez es una función de la geometría de los poros. La presión de desplazamiento (P_d) es la P_c en donde S_e cae por debajo de 1,0 durante el drenaje del agua intersticial. La fracción del volumen total de poros que no contribuye al flujo ($S_e = 0$) se define como la saturación residual (S_r). La saturación residual varía desde 0,05 a 0,40 y se alcanza cuando el agua se retiene en poros que son más pequeños que la mayoría de los poros. Los valores mayores de S_r y los valores menores de λ se suelen asociar con materiales más finos.

Las ecuaciones de Corey (1986) para S_e y k_{nw} , así como la ecuación generalizada de flujo de aire de Kozeny-Karmen (q_{nw}), se presentan a continuación.

$$S_e(P_c) = (P_d/P_c)^\lambda, \quad (1)$$

$$k_{nw}(S_e) = k (1-S_e)^2 (1-S_e^2), \quad (2)$$

$$y \quad q_{nw} = k_{nw}/\mu_{nw} (-\partial p_{nw}/\partial x + \rho_{nw}g), \quad (3)$$

$$\text{en donde} \quad \gamma = (2+\lambda)/\lambda,$$

$$\mu_{nw} = \text{viscosidad dinámica del aire,}$$

$$P_{nw} = \text{presión del aire,}$$

$$\rho_{nw} = \text{densidad de masa del aire,}$$

$$\text{y } g = \text{aceleración de la } \leq.$$

Cuando el relleno es objeto de drenado después de la colocación, la saturación será aproximadamente igual a S_r . La saturación efectiva aumentará y k_{nw} disminuirá si el agua continúa fluyendo hacia el relleno desde la roca madre. La permeabilidad al aire disminuye de manera rápida a medida que aumenta S_e , disminuye para los materiales comunes por un factor de 10 para $S_e = 0,6$ y alcanza el valor de 0 cuando $S_e = 1,0$. La oxidación de sulfuros se cierra de manera efectiva porque la cantidad de O_2 disuelto en el agua entrante es muy baja.

Muchos materiales porosos tienen tamaños de poro distintivamente diferentes que presentan diferentes características de saturación, permeabilidad y flujo. La roca fracturada en la que el agua fluye a través de poros primarios y/o fracturas secundarias es un ejemplo. En condiciones de saturación, el agua fluye preferentemente a través de la red de fracturas; sin embargo, cuando S_e cae por debajo de 1,0, las fracturas mayores son los primeros poros en ser objeto de drenaje. En algún valor intermedio de S_e , el flujo a través de los poros primarios se hace dominante, y cuando S_e se aproxima a 0, el agua se mantendrá en los espacios de los poros primarios mientras que las fracturas estarán secas.

El flujo de agua a través del relleno cementado que tiene grietas por contracción o espacios en las interfases entre la roca y el relleno se comportará de manera similar a la roca porosa fracturada. El relleno intacto y las grietas y aberturas secundarias tendrán relaciones $S_e(P_c)$ y $k_{nw}(S_e)$ separadas, y la importancia de cada una dependerá de la tasa de entrada de agua desde la roca madre. En condiciones secas, el agua se retendrá en el relleno intacto y las aberturas secundarias estarán secas, mientras que, en condiciones más húmedas,

aumentará el flujo a través de las aberturas más grandes. Cuando el relleno se inunda después del cierre de la mina, el flujo será principalmente a través de las aberturas secundarias.

Las relaciones S_r , así como $S_e(P_c)$ y $k_{nw}(S_e)$, para un relleno determinado, afectará a la oxidación de los minerales de sulfuro durante la extracción activa mientras el relleno está parcialmente saturado. Cuanto mayor sea el S_r , más poros

permanecerán saturados, lo que resultará en una menor superficie mineral disponible para ser oxidada. El área superficial disponible para la oxidación será menor en condiciones más húmedas ($S_e > 0$). La formación de grietas y espacios por contracción aumentará la oxidación cuando sean objeto de drenaje en condiciones secas.

INVESTIGACIÓN RELACIONADA

Diversos estudios han abordado los efectos de los materiales de relleno de carbón y de uranio en las aguas subterráneas. Henderson y Norton (1984), Geidel y Caruccio (1982), McCurry y Rauch (1986) y Senyur (1989) han estudiado el potencial de contaminación del relleno de residuos de carbón en minas a cielo abierto y subterráneas. Las consideraciones importantes en estos estudios fueron el potencial para la producción de ácido y la cantidad de flujo de agua a través de los desechos. Snow⁴ concluyó que es difícil inundar los trabajos de la mina para controlar el drenaje ácido de la misma cuando los trabajos están ubicados por encima del nivel de la mina en donde se produce el drenaje. Se propuso sellar las minas con cenizas volantes para facilitar la inundación por encima del nivel de drenaje en estas circunstancias. Senyur (1989) observó disminuciones en la permeabilidad del relleno y en la tasa de flujo de agua a través del relleno en el transcurso del tiempo.

Sin embargo, la aplicabilidad de los estudios de casos de minas de carbón en una investigación de los impactos ambientales del relleno en minas de metal es limitada. La principal diferencia entre los dos tipos de minas es que los metales pesados se liberan en las minas de metal como resultado de la oxidación de los sulfuros, mientras que, en las minas de carbón, los desechos contienen cantidades relativamente menores de metales pesados, lo que resulta en una menor liberación de metales.

Los estudios de los impactos del relleno de relaves de molienda de uranio han sido extensos (Longmire y otros, 1981; Brookins y otros, 1982; Thomson y Heggen, 1982; Thomson y otros, 1986). Se utilizaron muestras de campo de relaves y de relleno, y estudios de descarga de agua del relleno para interpretar las transformaciones geoquímicas en el relleno. Se consideró el destino de los metales pesados contenidos en los relaves de uranio, así como el destino de los constituyentes radiactivos. Los autores concluyeron que los impactos ambientales a corto y a largo plazo del relleno asociado con la minería activa y las actividades posteriores al cierre, fueron insignificantes.

Se han investigado los factores que controlan la liberación de metales de los embalses de relaves superficiales mediante el uso de columnas de lixiviación y de agua de lluvia simulada para analizar los relaves (Doepker y O'Conner, 1990a, 1990b; Doepker, 1991a, 1991b). Los factores investigados incluyeron el grado de saturación; la disponibilidad de O_2 ; los ciclos húmedo-seco; el tiempo de permanencia del lixiviado; la capacidad amortiguadora de los relaves; la evaporación de aguas intersticiales; la composición de la roca huésped; la composición, cantidad y tasa de formación de minerales secundarios; y la lixiviación pH, la fuerza iónica y tipos de iones presentes.

Se descubrió que la causa principal de la disolución de metales era la oxidación de minerales de sulfuro por el O_2 atmosférico en condiciones parcialmente saturadas. Se

observó una mayor disolución del metal después de alternar períodos húmedos y secos o después de períodos prolongados de sequedad; el grado de disolución mejorada del metal se vio afectado por el porcentaje de agua eliminada durante un período seco (Doepker y O'Conner, 1990a). Además, se determinó que la presión parcial reducida de O_2 era la única forma de minimizar la liberación de metales de los relaves sulfurosos. Las concentraciones en lixiviados de relaves bien oxidados diferían de las concentraciones de relaves recientes porque los minerales secundarios eran más o menos solubles que los minerales primarios. Los minerales secundarios formados en el relleno en condiciones parcialmente saturadas antes de la inundación de la mina pueden disolverse después de la inundación, lo que puede causar un aumento temporal en la movilidad del metal. Se espera que la oxidación del relleno cementado y la posterior liberación de metales y la formación de minerales secundarios sea menor que lo que ocurriría en el relleno de arena no cementado debido a la mayor saturación de agua residual y la disminución del área superficial resultante de la adición de cemento.

Se investigaron diversos factores que afectan a la disolución del metal de los relaves sumergidos mediante pruebas por lotes (Doepker y Drake, 1990, 1991). La oxidación de minerales de sulfuro en relaves sumergidos fue mucho más lenta que la oxidación en relaves no sumergidos porque el O_2 se difunde lentamente en el agua. Sin embargo, los metales se liberaron de los relaves oxidados sumergidos incluso cuando se neutralizaron debido a la disolución de los minerales secundarios. Por lo tanto, puede ocurrir una liberación a corto plazo de metales de minerales secundarios a medida que se sumerge un rebaje rellenado. Sin embargo, se espera que la liberación de metales disminuya a medida que se agoten los minerales secundarios de los relaves.

En un estudio paralelo al que se presenta aquí (Levens y Boldt, 1992), se investigaron los impactos del relleno de arena con desechos mineros en la calidad del agua subterránea que rodea un rebaje. Las concentraciones de metales en el agua recogida, cuando salía de un rebaje lleno de arena, estaban por debajo o ligeramente por encima de los niveles máximos de concentración (MCL) permitidos por la Ley de Agua Potable Segura. La falta de liberación de metales del relleno de arena se atribuyó a la amortiguación del ácido por disolución de los minerales de carbonato.

Los principales problemas identificados en las investigaciones anteriores fueron una reducción en las reacciones de oxidación y el O_2 resultante de la inundación del relleno colocado, los efectos perjudiciales de permitir que los relaves se sequen o que se deshidrate por medios mecánicos el relleno antes de su retirada, las capacidades de amortiguación del relleno y el grado de oxidación del relleno antes de la inundación (Brookins y otros, 1982; Thomson y otros, 1986; Doepker y Drake, 1990; Levens y Boldt, 1994).

⁴ R. E. Snow, "Estimación y control de la entrada de agua subterránea y descarga desde minas subterráneas". Documento presentado en la reunión anual de la Society for Mining Engineers, Salt Lake City, UT, con fecha desde el 26 de febrero al 1 de marzo de 1990, 9 págs.

METODOLOGÍA

Esta investigación es parte de un esfuerzo mayor en el que se investigan los impactos del relleno de desechos mineros en la calidad del agua en cuatro minas subterráneas de sulfuro (Levens y Boldt, 1992). Los materiales de relleno utilizados en las cuatro minas incluyeron relaves cementados de gradación total; arena clasificada sin cementar; y gotas no cementadas de bajo grado. Las consecuencias importantes de agregar cemento al relleno incluyen (1) una menor disolución de minerales como resultado de una mayor capacidad amortiguadora, (2) una reducción de la oxidación de los minerales de sulfuro como resultado de una mayor retención de agua, (3) una menor migración de metales del relleno al agua subterránea debido a una menor conductividad hidráulica y (4) mayor resistencia y menor ataque químico atribuible a las diferencias en las distribuciones de tamaño del grano del relleno.

Se analizaron muestras de relleno para identificar la mineralogía y determinar las cantidades máximas de metales que podrían lixiviarse. Se realizaron pruebas de lixiviación con agua desionizada y ácido sulfúrico para caracterizar las capacidades y las tasas de neutralización. Las distribuciones de tamaño del grano se trazaron a partir de análisis de tamiz y de las relaciones de saturación de presión capilar se determinaron utilizando células de presión de Tempe.

RECOPILACIÓN DE DATOS DE LABORATORIO

Se obtuvo una muestra de relaves recién molidos y deshidratados utilizados en el relleno de la mina de prueba (muestra CN), así como muestras de relleno de arena de una mina de comparación (muestras SO y SN) (Levens y Boldt, 1994) para análisis químicos y pruebas de laboratorio. Se recogieron dos muestras separadas en la mina de comparación, una de relleno oxidado de un rebaje de 10 años (muestra SO) y la otra de relaves nuevos del ciclón secundario (muestra SN). Estas muestras eran similares en la distribución del tamaño de las partículas y en la mineralogía, y solamente diferían en su antigüedad.

Las tres muestras se enviaron al Centro de Investigación de Reno de USBM para análisis químico e identificación de minerales por difracción de rayos X. El método de ensayo químico utilizado fue la fusión de borato de litio seguida de digestión de ácidos utilizando ácido clorhídrico (HCl) y análisis de plasma acoplado inductivamente (ICP). También se realizó un ensayo de lixiviación máxima de 1 g de cada muestra de relleno utilizando una mezcla de HCl (2 cm³), ácido nítrico (HNO₃) (4 cm³) y agua (20 cm³) en el Centro de Investigación de Spokane (SRC) de USBM. Las muestras se colocaron en un agitador durante la noche y el líquido sobrenadante se filtró y analizó mediante espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado inductivamente (ICP-AES). Se puede suponer que el procedimiento de extracción de lixiviación máxima disuelve el 100 % de las sales solubles en agua (cloruros, sulfatos y nitratos), así como las sales insolubles en agua (sulfuros y carbonatos). Los óxidos metálicos también se solubilizarán. Los datos de lixiviación máxima, en combinación con los datos de difracción de rayos X (tabla 1), proporcionan la información necesaria para determinar la fuente de metales que pueden liberarse en un entorno ácido.

Tabla 1. Análisis mineralógicos de relaves utilizados en relleno¹

Mineral	Muestra NC	Muestra SO	Muestra SN
Cuarzo	Importante	Importante	Importante
Moscovita.....	Trazas	Trazas	Trazas
Pirita.....	Ninguna	Trazas	Trazas
Calcita.....	Ninguna	Ninguna	Ninguna
Siderita.....	Trazas	Trazas	Trazas
Galena.....	Trazas	Posibles trazas	Ninguna
No identificado.....	Trazas	Trazas	Trazas

¹ Mayor = 30 a 100 por ciento. Menor = 10 a 30 por ciento. Traza = 1 a 10 por ciento. La precisión fue de aproximadamente ± 25 por ciento de la cantidad presente.

Las investigaciones de lixiviación se realizaron en una cámara ambiental controlada para determinar las capacidades de neutralización de las tres muestras de relleno y para medir la tasa de neutralización. Cada muestra se mezcló con 4 % en peso de cemento portland Tipo I, II a una densidad de lechada del 70 % (peso de sólidos / peso de la lechada). Las mezclas se vertieron en tres réplicas de moldes cúbicos de 5 cm y se dejaron curar durante 28 días en una cámara de niebla mantenida a una humedad del 100 por ciento. Dos de los tres cubos de cada muestra de relleno cementado se colocaron en frascos de vidrio y se depositaron en la cámara ambiental. El tercer cubo de cada muestra se mantuvo en la cámara de niebla para ser utilizado como muestra de control en las pruebas de resistencia.

Cada uno de los frascos de la cámara ambiental se rellenó con 2500 mL de agua destilada. Se hizo circular agua destilada sobre las muestras durante los primeros 7 días utilizando bombas pequeñas. A diario se midieron la conductividad eléctrica (EC), el pH y la temperatura del agua destilada lixiviada; después de 7 días, se recogieron muestras de agua para el análisis de aniones y cationes.

Al final de los 7 días, se añadió 1,4 mL de H₂SO₄ concentrado al lixiviado que circulaba a través de la muestra. Diariamente, se midieron los valores de pH, EC y la temperatura del lixiviado. A medida que ocurría la evaporación en las cámaras, se agregaba agua destilada para mantener el volumen total del lixiviado en aproximadamente 2500 mL. Cuando el pH del lixiviado, en cualquiera de las muestras, aumentó en aproximadamente 6, se añadieron 1,4 ml de H₂SO₄ concentrado para bajar el pH. Las muestras se recogieron a intervalos de 2 a 4 semanas para el análisis de cationes y de aniones.

Las relaciones entre la presión capilar y la saturación del relleno se determinaron para relaves no cementados y para relaves mezclados con un 6 % de cemento por peso utilizando células de presión Tempe equipadas con placas porosas de cerámica de 0,1 MPa (figura 1). Se colocaron cuatro réplicas de muestras cementadas en los cilindros de prueba utilizados en las células de Tempe y se curaron durante 4 semanas en la sala de niebla. Las muestras se sumergieron en una solución de agua y de cal para mantener la saturación y evitar la disolución del cemento durante el curado. El puerto inferior de la célula de Tempe se conectó a una bureta ajustable para mantener la carga de agua de salida al nivel de la placa de cerámica. La presión capilar se aumentó al incrementar la presión de nitrógeno (N₂) en el puerto superior. Los cambios de saturación se determinaron a partir del volumen de agua desplazado en la bureta y de la porosidad de la muestra.

RECOPILACIÓN DE DATOS DE CAMPO

Se recogieron muestras de relaves (muestra CN) y agua de un rebaje de prueba en una mina subterránea de sulfuro para su análisis. Los tipos de rocas en el rebaje de prueba consistieron en metasedimentos precámbricos, que incluían argilita, cuarcita sericítica y cuarcita vítrea. Tetraedrita masiva ($\text{Cu}_{12}\text{Sb}_4\text{S}_{13}$), galena (PbS) y esfalerita (ZnS) con ganga de cuarzo (SiO_2) y de siderita (FeCO_3) componen la mineralogía del mineral. El rebaje se extiende aproximadamente 120 m a lo largo del rumbo de la veta y se extrae mediante corte y relleno de tajo largo por debajo con relleno. El relleno consiste en relaves cementados en los que se han retenido la mayoría de los finos. El método de corte y de relleno de tajo largo por debajo se diferencia del método de corte y de relleno por arriba en que avanza hacia abajo en cortes sucesivos en lugar de por encima. La extracción procede después de que el corte anterior se haya rellenado con relaves cementados y se permita que fragüe; en consecuencia, la parte posterior o techo del rebaje consiste en un relleno cementado reforzado.

La recarga de agua subterránea a los metasedimentos precámbricos cerca de la mina de prueba es principalmente el resultado de la infiltración de las cuencas de drenaje superficiales suprayacentes. La cuenca de drenaje sobre la mina está sustentada por un lecho rocoso fracturado de forma variable, excepto en donde se encuentran franjas estrechas de aluvión a lo largo de los canales de los arroyos.

La roca no fracturada que rodea la mina tiene una conductividad hidráulica muy baja; en consecuencia, el agua se filtra a lo largo de fracturas y fallas. De manera similar, el agua del lecho rocoso penetra en la mina en donde las fracturas y fallas se intersectan con trabajos de mina abierta o de relleno o mediante perforaciones. La conductividad hidráulica de metasedimentos fracturados de manera similar fue estimada en 1×10^{-7} m/s por Lachmar (1988). El agua que penetra en la mina se drena a los sumideros de recogida y se bombea a la superficie para su descarga. A modo de

comparación, se calculó que la conductividad hidráulica del relleno intacto con el 6 % de cemento agregado era inferior a 1×10^{-9} m/s en un permeámetro de laboratorio. El relleno colocado probablemente tendrá grietas por contracción que pueden aumentar la conductividad hidráulica bruta del relleno en dos o más órdenes de magnitud.

El muestreo de agua se inició en noviembre de 1990 y continuó mensualmente hasta abril de 1993; el rebaje avanzó 32 m y se extrajeron 53.500 t de mineral durante este período. Se recogieron muestras tanto antes como después de que el agua estuviera en contacto con el relleno cementado para determinar los impactos del relleno de desechos mineros colocados sobre la calidad del agua. Se recogió agua de pozos exploratorios que intersectaron galerías accesibles en tres niveles, y se tomaron muestras adicionales de filtraciones en el rebaje de avance y de un sumidero que recibió drenaje combinado en el nivel de muestreo 2 (figura 2). Los datos de los pozos representan la calidad del agua dentro de la roca madre, mientras que el agua mezclada y las filtraciones que entran en contacto con el relleno, representan la calidad del agua afectada por el mismo. El rebaje de corte y relleno que avanzaba por debajo cortado a través de un pozo de muestreo en el nivel 2; probablemente como consecuencia, el pozo se secó después de la séptima visita de muestreo.

El pH, CE, potencial redox (Eh), temperatura y alcalinidad de las muestras se midieron en el campo. Las muestras se filtraron al vacío a través de filtros de $0,45\mu\text{m}$ y se colocaron en botellas flexibles de polietileno de 50 ml. Se rellenaron botellas separadas para el análisis de cationes utilizando el Perkin-Elmer Plasma II ICP y para el análisis de aniones utilizando un cromatógrafo de iones de gradiente (IC) Dionex Serie 4000i. Las muestras para el análisis de cationes se conservaron con HNO_3 de acuerdo con los procedimientos de la EPA (1983) para estabilizar iones en solución. A continuación, las muestras se transportaron al laboratorio de química en SRC y se almacenaron en un refrigerador hasta que fueron analizadas.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Los ensayos minerales del relleno antes de agregar cemento, las descripciones mineralógicas publicadas y la información de los registros de la mina, en combinación con los datos de difracción de rayos X, proporcionan la información necesaria para determinar las fuentes de metales que se puedan esperar que se liberen en un ambiente ácido. Las diferencias entre los resultados del ensayo de minerales y los datos de las pruebas de lixiviación máxima utilizando relaves de la mina de prueba se comparan con datos similares de una mina de prueba llena de arena analizada por Levens y Boldt (1994). Esta comparación proporciona una línea base para determinar el papel del cemento en el control de la lixiviación de metales del relleno.

Las mediciones del tamaño de las partículas y de la saturación de agua a presión capilar proporcionan información sobre la susceptibilidad de un relleno a la oxidación antes de la inundación. El análisis del tamaño de las partículas también puede explicar las variaciones en las resistencias del relleno cementado que, a su vez, dan lugar a variaciones en el grado de ataque químico por las soluciones ácidas. Las mediciones de conductividad hidráulica indican si el agua fluirá de manera preferente a través del relleno cementado después de la inundación.

Los experimentos de lixiviación realizados en una cámara ambiental arrojan luz sobre la susceptibilidad del

relleno cementado a la lixiviación por fuentes externas de agua ácida. Las capacidades de neutralización calculadas con base en la cantidad de cemento agregado y los datos del ensayo mineral se calculan en primer lugar. El pH y las concentraciones de iones de los lixiviados del lavado con agua desionizada y el lavado con H_2SO_4 demuestran los efectos de los diferentes factores químicos y físicos sobre la disolución de minerales en el relleno por agua ácida.

El uso final de los datos de laboratorio es determinar los factores que explican la composición química del agua recogida en una mina de prueba. Se compararon los niveles de cationes y de aniones en muestras de agua para determinar si se podían detectar diferencias significativas y atribuir las al material de relleno, en este caso, relaves cementados. Se utilizó un modelo informático geoquímico basado en la termodinámica, WATEQ4F (Ball y otros, 1987), para investigar la especiación de elementos y la saturación de minerales en muestras de agua. Los índices de saturación calculados por WATEQ4F proporcionan una base para evaluar el potencial de reacciones de disolución y de precipitación entre los minerales en el relleno y en el agua infiltrada.

El conocimiento de los márgenes de cinética de reacción y estabilidad mineral es necesario para interpretar la validez del método termodinámico utilizado por WATEQ4F.

Además, las reacciones químicas pueden ralentizarse debido a que las partículas de relaves se recubren con cemento y debido a una mayor saturación de agua; el primer factor limita la difusión de agua a los minerales reactivos, mientras que el segundo factor limita la difusión de O₂ en los poros pequeños.

ENSAYO Y LIQUIDACIÓN DE LA MUESTRA CN

El análisis por difracción de rayos X indicó que la muestra CN consistía en cuarzo con trazas de moscovita [KAl₂(AlSi₃O₁₀) (OH)₂], siderita y galena. Los ensayos químicos mostraron que, antes de la adición de cemento, aproximadamente un tercio del relleno utilizado en el rebaje de prueba consistía en silicio (Si) (tabla 2). También se detectaron cantidades significativas de aluminio (Al), calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), plomo (Pb) y zinc (Zn).

Tabla 2. Ensayo químico de materiales de relleno, en partes por millón

Analito	Muestra CN	Muestra SO	Muestra SN
Al	19,000	15,000	14,000
As	<300	500	1,500
Ba	200	80	44
Ca	2,300	3,300	3,700
Cd	16	8	13
Co	10	20	30
Cr	90	80	100
Cu	210	250	620
Fe	53,000	57,000	54,000
K	5,500	5,800	5,100
Mg	1,900	2,400	1,400
Mn	5,600	5,000	1,600
Mo	<50	<50	<50
Na	400	600	500
Ni	200	330	240
P	<1,000	<1,000	<1,000
Pb	1,800	1,500	1,500
Si	334,000	348,000	358,000
Zn	4,300	2,500	5,800

El ensayo de lixiviación máxima con una mezcla de HCl y HNO₃ proporcionó concentraciones significativas de Ca y Mg, así como de los metales Fe, manganeso (Mn), Pb y Zn (tabla 3). Suponiendo que el Ca extraído por el ácido existe como CaCO₃, la muestra de CN contiene 0,58 % de CaCO₃. También se lixiviaron cantidades menores de plata (Ag), arsénio (As), cadmio (Cd), Cr, Cu y Ni. La concentración de Ca en el lixiviado ácido indica una baja capacidad de neutralización de ácido en los relaves, mientras que las bajas concentraciones de Si y Al indican que los relaves tienen muy pocos minerales de aluminosilicato reactivos que podrían contener metales en trazas.

Tabla 3. Datos ICP-AES del análisis de extracción con ácido fuerte de materiales de relleno, en miligramos por litro

Analito	Muestra CN	Muestra SO	Muestra SN
Ag	0,04	0,02	0,03
Al	2,1	2,0	1,9
As	1,2	6,0	10,4
Ba	0,3	0,03	0,02
Ca	23,0	35,4	38,8
Cd	0,17	0,21	0,34
Cu	0,69	0,56	0,69
Fe	306	312	186
K	0,9	0,9	0,8
Mg	11,2	12,4	6,4
Mn	32,4	29,4	9,5
Na	0,52	0,12	0,41
Pb	32,0	21,6	27,8
S	7,8	37	86
Si	2,2	2,2	1,7
Zn	21,9	14,9	35,4

El Pb y el Zn contenidos en el lixiviado de la muestra

de CN fueron 32,0 y 21,9 ppm, respectivamente. Ambos elementos deberían existir como sulfuros porque la muestra se recogió de relaves recientes; sin embargo, existe aproximadamente la mitad del azufre (S) necesario para dar cuenta de la disolución de la galena y de la esfalerita. El Fe probablemente se presenta principalmente como siderita porque la muestra era reciente y, por lo tanto, contenía poco óxido de hierro por oxidación.

La masa de la muestra de CN disuelta durante el ensayo de lixiviación máxima se estimó convirtiendo las concentraciones en óxidos de Si, Na, K y Al; carbonatos de Ca, Mg y Fe; y sulfuros de Pb, As y Zn para todas las concentraciones de elementos por encima de 1 mg/L. Cuando estos valores se convirtieron a miligramos por gramo, la cantidad de muestra disuelta fue de 111 mg/g, o a aproximadamente el 11 por ciento. Menos de esta cantidad de relaves reaccionará, dejando al menos el 89 por ciento de la muestra para unir con cemento.

DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULA

Las distribuciones de tamaño de partículas se relacionan con la integridad estructural de la matriz de relaves-cemento y, por lo tanto, con la susceptibilidad del relleno cementado al ataque químico. Las distribuciones de tamaño de partículas de las muestras CN, SO y SN se muestran en la figura 3. Una comparación de las curvas indica que las muestras SN y SO tienen márgenes estrechos similares de tamaños de partículas, mientras que la muestra CN tiene un margen más amplio con partículas significativamente más finas. La muestra CN tenía un coeficiente de uniformidad (una medida del margen de gradación de la curva de tamaño de partícula) de 14 y un coeficiente de curvatura (una medida de la forma de la curva de tamaño de partícula) de 1,28; sobre la base de estos valores, la muestra CN se clasifica como arena bien graduada. Los coeficientes de uniformidad para las muestras SN y SO fueron 3 y 6, respectivamente, y los coeficientes de curvatura fueron 0,69 y 0,85, respectivamente. Las muestras SN y SO se clasifican como arenas uniformes deficientemente graduadas.

Se espera que las diferencias en la distribución del tamaño de las partículas afecten a la resistencia y a la integridad estructural del relleno cementado y, como consecuencia, al grado de degradación cuando el material es atacado por soluciones ácidas. Por lo tanto, los resultados de los análisis de tamaño de partículas se consideran en la siguiente exposición de los experimentos de lixiviación en laboratorio.

CAPACIDAD NEUTRALIZANTE DEL RELLENO CEMENTADO

Las características de retención de agua del relleno cementado afectan el acceso del aire a los minerales de sulfuro y, por lo tanto, las tasas de oxidación. Los análisis de lixiviados de los experimentos con agua desionizada y lavado con ácido indican la aportación del cemento a la neutralización del ácido en relación con la contribución de los minerales contenidos en los relaves.

La resistencia de las muestras de relleno cementado al ataque del agua ácida depende de la capacidad de neutralización del relleno y de la velocidad a la que el agua ácida se difunde en las muestras. La capacidad de neutralización se calcula a partir de la relación entre el peso del cemento y el peso del relleno y la composición de cada uno según se determina a partir de los valores publicados y

los análisis químicos.

La composición media de los compuestos en el cemento portland Tipo I, II que contribuirá a la capacidad de neutralización de los ácidos es 65,9 % de óxido de calcio (CaO), 2,3 % de óxido de magnesio (MgO) y 0,72 % de óxido de potasio (K₂O). Con base en la cantidad de cemento

utilizada para hacer las muestras, se calcularon los miliequivalentes (mequi.) de capacidad neutralizante de cada componente y luego se sumaron para obtener la capacidad neutralizante total del cemento en cada muestra (tabla 4).

Por ejemplo, la contribución de CaO en la muestra de CN sería

$$\text{CaO} = \frac{0.066 \text{ kg CaO}}{0.1 \text{ kg cement}} \times \frac{0.072 \text{ kg cement}}{2.694 \text{ cement}} \times \frac{0.744 \text{ kg}}{3 \text{ cubes}} \times \frac{2,000 \text{ mequi.}}{0.056 \text{ kg CaO}} \times 2 \text{ cubes} = 314.0 \text{ mequi.}$$

cement = cemento; mequi. = miliequivalentes; cubes = cubos.

Las capacidades de neutralización de las muestras de relaves no cementados se calcularon sobre la base de los datos de lixiviación máxima y la mineralogía estimada (tabla

5). Ca, Mg y Mn se asignaron a minerales de carbonato mientras que Na

$$\text{CaCO}_3 = \frac{23.0 \text{ mg Ca}}{1 \text{ L}} \times \frac{0.1 \text{ L}}{1 \text{ g tailings}} \times \frac{1.814 \text{ kg tailings}}{2,694 \text{ kg sample}} \times \frac{0.744 \text{ kg}}{3 \text{ cubes}} \times \frac{2 \text{ mequi.}}{40.04 \text{ mg}} \times 2 \text{ cubes} = 38.4 \text{ mequi.}$$

tailings = relaves; mequi. = miliequivalentes; cubes = cubos; sample = muestra.

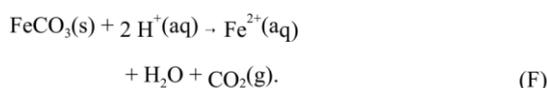
Tabla 4. Capacidad neutralizadora de ácidos del cemento portland en muestras de relleno, en miliequivalentes

Muestra	CaO	MgO	K ₂ O	Total
CN	314,0	25,2	2,0	341,2
SN	264,4	21,2	1,6	287,2
SO	344,6	27,6	2,2	374,4

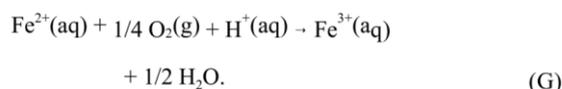
Tabla 5. Capacidad neutralizadora de ácidos de relaves en muestras de relleno, en miliequivalentes

Muestra	Suma de Ca, Mg, Mn, K y Na	Fe	Total
CN	109,7	366,6	476,3
SN	80,2	124,4	204,6
SO	142,2	403,2	545,4

Si Pb y Zn estuvieran presentes como sulfuros y sulfatos, entonces la pequeña cantidad restante de S se asignaba a Fe en una proporción molar de pirita; el resto del Fe se asignaría a siderita. La reacción entre la siderita y el H₂SO₄ es:



La oxidación de Fe²⁺ es —



La hidrólisis de Fe³⁺ es —



Las reacciones F y G consumen 3 moles de H⁺ por cada mol de siderita. Sin embargo, dependiendo del grado de hidrólisis de Fe³⁺ (ecuación H), se pueden producir 3 moles de H⁺. Por lo tanto, la disolución de la siderita puede resultar en un consumo neto de ácido que oscila entre 0 y 3 moles de H⁺ por mol de siderita.

La muestra CN tenía todo el S medido requerido para los compuestos de Pb y Zn. Por tanto, de acuerdo con los

análisis mineralógicos, todo el Fe de la muestra se asignó a siderita en los cálculos de capacidad de neutralización. Las muestras SO y SN tenían pequeñas cantidades de Fe asignadas a pirita y el resto se consideraba siderita. El valor de siderita en la muestra SO es probablemente demasiado alto porque algo de Fe probablemente se haya oxidado a goethita; sin embargo, se puede realizar una aproximación utilizando cantidades menores de Fe y tomando este primer cálculo como un valor extremo.

La capacidad de neutralización total del relleno cementado calculada como la suma de las capacidades del cemento y del relleno se muestra en la tabla 6. La capacidad de neutralización de los relaves cementados en comparación con los relaves solos, y sin incluir las aportaciones de siderita, fue de aproximadamente 3,6 veces mayor en la muestra SO, 4,1 veces mayor en la muestra CN y 4,6 veces mayor en la muestra SN. La cantidad de siderita disuelta es importante desde la perspectiva de la resistencia física de la muestra incluso si no se consume ácido. Debido a que la siderita es parte de las partículas unidas por el cemento, su destrucción debilitará la muestra.

Tabla 6. Capacidad neutralizadora de ácido de muestras de relleno cementado, en miliequivalentes

Muestra	Suma de Ca, Mg, Mn, K y Na	Fe	Total
CN	450.9	366.6	817.5
SN	367.4	124.4	491.8
SO	516.6	403.2	919.8

LAVADO CON AGUA DESIONIZADA

Se detectaron altas concentraciones de Na, K y Ca en el agua desionizada utilizada para enjuagar las superficies de los cubos de relleno cementado antes del lavado con H₂SO₄ (tabla 7). Los hidróxidos y sulfatos de estos elementos derivados del cemento probablemente fueron eliminados de las superficies de las muestras. Además, las cantidades de Al y Si detectadas fueron bajas, lo que era de esperar porque los minerales que contienen estos elementos tienen bajas solubilidades. No se disolvieron cantidades medibles de metales en trazas.

Tabla 7. Concentraciones de elementos en muestras que contienen cemento después de lavar con agua desionizada durante 7 días, en miligramos por litro

Analito	Muestra CN	Muestra SO	Muestra SN
Al	0,2	2,2	0,2
Ba	0,17	0,08	0,06
Ca	54,2	96,1	183
Cu	0,04	0,09	ND
Fe	0,2	0,2	0,1
K	7,3	15,5	26,6
Mn	ND	0,1	ND
Na	7,9	14,7	14,0
Pb	0,06	ND	0,02
Si	6,6	6,7	8,5
Zn	0,06	ND	0,05
pH.....	8,6	8,6	8,0
SO4	86,1	130	366

ND = Sin datos.

LAVADO CON ÁCIDO SULFÚRICO

Las tablas 8 y 9 muestran la cantidad de H₂SO₄ añadida y las capacidades restantes de neutralización de ácido de las tres muestras de relleno cementado durante la prueba de lavado con H₂SO₄. Los valores en la tabla 8 incluyen la aportación potencial de siderita, mientras que los valores presentados en la tabla 9 incluyen solamente las aportaciones de carbonatos de Ca, Mg y Mn y óxidos de K y Na. Los valores de la tabla 9 se basan en el supuesto de que el consumo de ácido (ecuaciones F y G) se equilibra con la producción de ácido por hidrólisis (ecuación H). Grandes cantidades de oxihidróxidos precipitados en la superficie de las tres muestras es evidencia de que la siderita estaba reaccionando y que la reacción de hidrólisis ocurrió en un grado limitado. Por lo tanto, los valores de las tablas 8 y 9 son límites razonables para las capacidades de neutralización restantes reales.

Las Figuras 4, 5 y 6 muestran el pH del fluido que lava las muestras en función del tiempo después de agregar H₂SO₄. El pH de la solución de lavado se redujo desde aproximadamente 8 a menos de 3 para todas las muestras después de que comenzó el lavado con H₂SO₄. El pH del lavado de las muestras SO y SN aumentó al margen básico después de 72 horas, lo que indica un ataque agresivo de las muestras por parte del ácido, lo que resultó en la neutralización del H₂SO₄. La muestra CN tuvo una velocidad de reacción más lenta tal como lo indica un aumento en el pH en el lavado a solamente 4,93. Las muestras SO y SN tenían distribuciones de tamaño de partículas similares, mientras que la muestra CN tenía un mayor porcentaje de partículas grandes y finas. La distribución más amplia del tamaño de partícula de la muestra de CN puede haber promovido la formación de una matriz de colas de cemento más resistente, lo que limitaría la penetración del ácido. La degradación de la integridad estructural de las muestras de SO y SN aparentemente permitió la penetración del ácido, lo que causó las reacciones rápidas observadas.

El pH de la solución de lavado de la muestra CN mostró un aumento lento después de cada adición de H₂SO₄, y se volvió significativamente más lento a medida que avanzaba la prueba. Al principio de la prueba, la neutralización del ácido tuvo lugar más rápidamente a medida que ocurrían reacciones en la superficie de los cubos, pero con el tiempo, la superficie de la muestra acumuló productos de reacción (tales como yeso y oxihidróxidos de hierro) que ralentizaron la penetración de ácido adicional en el cubo. Además, el ácido tenía que difundirse en la muestra a mayores profundidades cada vez que se añadía el ácido, lo que ralentizaba la tasa de neutralización. Tal como se muestra en la figura 4, la muestra todavía neutralizaba el ácido al final del experimento.

La muestra SO neutralizó rápidamente cada adición de ácido y el pH se recuperó más lentamente a medida que avanzaba la prueba. Después de 70 días, el pH se mantuvo casi constante, ganando solo 0,2 unidades de pH durante el resto del experimento. Parece ser que la mayor parte del material disponible para la neutralización de ácidos se había consumido en ese momento.

La muestra SN respondió de manera diferente al lavado con ácido que cualquiera de las otras dos muestras. Durante los primeros días se produjeron picos de aumento del pH similares a los mostrados por la muestra de SO. El ácido pareció penetrar rápidamente en la muestra, de modo que todo el material básico de fácil acceso se consumió en aproximadamente 10 días. A continuación, el pH disminuyó durante el resto del experimento mientras no se añadía más ácido. La continua disminución del pH se puede atribuir a la presencia de compuestos de sulfuro de hierro reducidos, tales como la pirita, en la muestra, que se oxidarían durante el transcurso del experimento y producirían ácido, lo que reduciría el pH. La pirita en la muestra se calculó como 0,112 moles, lo que produciría 450 miliequivalentes de acidez si se oxida y precipita como ferrihidrita; esta cantidad fue mayor que la cantidad de material básico en la muestra. La oxidación de sulfuros a un ritmo más rápido que la neutralización ácida también explicaría la continua disminución del pH, aunque los cálculos mostraron que quedaban cantidades significativas de material básico en la muestra de SN.

Los resultados de los análisis químicos de las soluciones de lavado con ácido se proporcionan en la tabla 10. Todos los lavados mostraron concentraciones incrementadas de metales al final del experimento en comparación con el inicio. Se utilizó WATEQ4F para evaluar los controles de solubilidad de los iones Pb y Zn en el lavado de muestras de SN porque las concentraciones de estos elementos eran altas en los relaves. Las concentraciones de Zn continuaron aumentando durante todo el experimento, pero las concentraciones probablemente se vieron limitadas por la difusión del ácido en los relaves para oxidar y disolver la esferita presente. Las concentraciones de Pb no aumentaron por encima de 4 mg/L.

Tabla 8. Potencial neutralizante máximo de los materiales de relleno cementado

Tiempo transcurrido, en días	CN			SN			SO		
	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH
	0.0	818	8.01	0.0	492	8.05	0.0	920	8.65
0	1.4	768		1.4	442		1.4	870	
3	1.4	718	¹ 4.93	1.4	392	¹ 7.43	1.4	920	¹ 8.18
5		718	2.59	1.4	342	¹ 7.44	1.4	770	¹ 7.92
6		718	2.90		342	5.27	1.4	720	¹ 6.73
7		718	2.85	1.4	292	¹ 6.28	1.4	670	¹ 7.54
8		718			292			670	
9		718			292			670	
10		718	3.20	1.4	242	¹ 6.69	1.4	620	¹ 6.94
11		718	3.57		242	3.85		620	3.35
12		718			242			620	
13		718	4.19		242	4.92		620	5.46
14		718	4.31		242	4.96	1.4	570	¹ 7.01
15		718			242			570	
16		718			242			570	
17		718	4.73		242	4.48		570	5.09
18		718	4.91		242	4.65		570	5.79
19		718	5.44		242	5.04	1.4	520	¹ 6.59
20		718	5.12		242	4.81		520	3.04
21		718			242			520	
22		718			242			520	
28		718	4.76		242	5.92		520	5.70
31	1.4	668	¹ 6.18		242	4.82		520	5.36
32		668	2.27		242	4.67	1.4	470	¹ 6.24
33		668	2.42		242	4.66		470	2.47
42		668	3.07		242	4.40		470	3.93
60		668	5.16		242	4.12		470	4.73
		668			242			470	
81	1.4	618	¹ 6.10		242	3.64		470	5.06
82		618	2.24		242	3.63		470	5.04
		618			242			470	
109		618	4.06		242	3.52		470	5.06
		618			242			470	
136		618	5.28		242	3.31		470	4.97
		618			242			470	
158	1.4	568	¹ 6.49		242	3.02		470	4.82
159		568	2.31		242	3.09		470	4.85
		568						470	
223		568	4.72		242	2.28		470	4.83
		568		Un cubo de SN se desintegró.				470	
		568						470	
238		568	5.19			2.17		470	4.84
mL totales de ácido añadido:..	7.0			7.0			12.6		
Mequi. total de ácido añadido:..	250			250			450		

¹ pH antes de la adición de ácido.

NOTA - Las celdas en blanco indican que no existen datos al respecto.

Tabla 9. Potencial neutralizante de los materiales de relleno cementado, excluyendo FcCO₃

Tiempo transcurrido, en días	CN			SN			SO		
	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH	mL de ácido añadido	mequi. restante	pH
	0.0	451	8.01	0.0	367	8.05	0.0	517	8.65
0	1.4	401	² 1.87	1.4	317	² 2.57	1.4	467	² 2.17
3	1.4	351	¹ 4.93	1.4	267	¹ 7.43	1.4	417	¹ 8.18
5		351	2.59	1.4	217	¹ 7.44	1.4	367	¹ 7.92
6		351	2.90		217	5.27	1.4	317	¹ 6.73
7		351	2.85	1.4	167	¹ 6.28	1.4	267	¹ 7.54
8		351			167			267	
9		351			167			267	
10		351	3.20	1.4	117	16.69	1.4	217	¹ 6.94
11		351	3.57		117	3.85		217	3.35
12		351			117			217	
13		351	4.19		117	4.92		217	5.46
14		351	4.31		117	4.96	1.4	167	¹ 7.01
15		351			117			167	
16		351			117			167	
17		351	4.73		117	4.48		167	5.09
18		351	4.91		117	4.65		167	5.79
19		351	5.44		117	5.04	1.4	117	16.59
20		351	5.12		117	4.81		117	3.04
21		351			117			117	
22		351			117			117	
28		351	4.76		117	5.92		117	5.70
31	1.4	301	¹ 6.18		117	4.82		117	5.36
32		301	2.27		117	4.67	1.4	67	¹ 6.24
33		301	2.42		117	4.66		67	2.47
42		301	3.07		117	4.40		67	3.93
60		301	5.16		117	4.12		67	4.73
		301			117			67	
81	1.4	251	¹ 6.10		117	3.64		67	5.06
82		251	2.24		117	3.63		67	5.04
		251			117			67	
109		251	4.06		117	3.52		67	5.06
		251			117			67	
136		251	5.28		117	3.31		67	4.97
		251			117			67	
158	1.4	201	¹ 6.49		117	3.02		67	4.82
159		201	2.31		117	3.09		67	4.85
		201			117			67	
223		201	4.72		117	2.28		67	4.83
		201		Un cubo de SN se desintegró.				67	
		201						67	
238		201	5.19			2.17		67	4.84
mL totales de ácido añadido:	7.0			7.0			12.6		
Mequi. total de ácido añadido:	250			250			450		

¹ pH antes de la adición de ácido.

² pH después de la adición de ácido.

NOTA - Las celdas en blanco indican que no existen datos al respecto.

Tabla 10. Concentraciones de elementos en muestras de relleno cementado después de lavado con H₂SO₄ durante 227 días, en miligramos por litro

Analito	Muestra CN	Muestra SO
Muestra SN		
Al		54.00.4480.1
Ba		0.010.003ND
Ca		640716623
Cd		0.010.321.8
Cu		0.100.070.68
Fe		6.66.897.6
K		3.91.4 3.0
Mg		95.2125110
Mn		52.865.364.8
Na		8.08.79.4
Pb		0.901.63.9
Si		14.634.7157
Zn		0.9733.7336
pH		4.94.72.2
SO ₄		1,8072,0503,622

ND = Sin datos

Al inicio de los experimentos, las concentraciones de Ca alcanzaron una meseta, aparentemente limitadas por la solubilidad del yeso (Ca₂SO₄ • 2H₂O). Era obvio a partir de los análisis de las muestras que los oxihidróxidos de hierro precipitaban durante la disolución del relleno cementado y limitaban la solubilidad del Fe.

En el lavado de la muestra de CN, todas las concentraciones de iones metálicos (excepto Mn) permanecieron por debajo de 10 mg/L. Este resultado se puede atribuir a la estabilidad de la muestra y a su capacidad de neutralización de ácidos. El pH al final del experimento era de aproximadamente 5,5.

Las concentraciones de varios metales fueron mayores en la muestra SO que en la muestra CN. El pH era aproximadamente el mismo, por lo que la solubilidad probablemente no era limitante; se sospecha que una mayor parte de la muestra de SO había sido atacada y se liberaron más iones metálicos.

CALIDAD DEL AGUA DE CAMPO

Las concentraciones de As, bario (Ba) y Pb excedieron los MCL primarios especificados bajo la Ley de Agua Potable Segura en muestras seleccionadas (tabla 11). Además, las concentraciones de Fe, Mn y SO₄ excedieron los MCL secundarios. Sin embargo, durante la mayoría de las visitas, todos los niveles de concentración estaban por debajo o cerca de los MCL.

La EC fue más alta en la muestra del sumidero y más baja en la muestra DH1 del nivel 1. Una EC más alta se correlacionó más estrechamente con concentraciones más

altas de Ca, K, Mg y SO₄. No se detectaron diferencias significativas en el pH, Eh o en la mayoría de los metales pesados; una excepción fue que las concentraciones de Pb y Zn fueron más altas en muestras específicas del sumidero en el nivel 2.

Las concentraciones de Ca, Mg, K y SO₄ fueron más altas en las muestras del sumidero y del rebaje que en las muestras de las perforaciones. Las concentraciones más altas de Ca, Mg y SO₄, junto con valores de pH casi neutros, sugieren que la producción de ácido por oxidación de minerales de sulfuro está siendo amortiguada por la disolución de minerales de carbonato, o más significativamente, el cemento agregado al relleno. En algunas muestras se detectaron altas concentraciones de Na equilibradas por altas concentraciones de HCO₃; esta circunstancia parece no estar relacionada con las reacciones químicas dentro del relleno.

Los índices de saturación (SI) calculados utilizando WATEQ4F (Ball y otros, 1987) indican condiciones de equilibrio o ligeramente subsaturadas para la mayoría de los minerales (-1 ≤ SI ≤ 1) (tabla 12). La ferrihidrita es uno de los pocos minerales que estaba sobresaturado (SI ≥ 1), lo que indica un potencial de precipitación. Otros minerales, como el yeso, que comúnmente precipitan del agua que se descarga de los desechos sulfurosos, estaban subsaturados (SI ≤ -1) y, por lo tanto, no se esperaba que precipitaran. Mezclar agua con alto contenido de HCO₃, es una condición observada en varios sitios, con agua en equilibrio con calcita que puede resultar en la precipitación de calcita.

Tabla 11. Media y margen (entre paréntesis) de concentraciones de elementos en muestras de agua de relleno cementado en mina de prueba

Analito	DH1 (22)	DH2 (14)	DH3 (7)	DH4 (8)	Sumidero (10)	Rebaje (9)
Elemento, mg/l:						
Al	0.20 (0.01-0.66)	<0.01 (<0.01-0.64)	0.45 (0.08-0.66)	0.03 (0.01-0.10)	0.29 (0.01-1.19)	0.10 (0.01-0.65)
As	<0.10 (<0.10-0.40)	<0.10 (<0.10-0.22)	<0.10	<0.10	<0.10 (<0.10-0.20)	<0.10 (<0.10-0.60)
Ba	1.12 (0.59-1.79)	0.88 (0.74-1.02)	0.22 (0.17-0.27)	0.39 (0.26-0.44)	0.06 (0.02-0.09)	0.08 (0.06-0.12)
Ca	25.81 (12.20-35.60)	27.38 (24.00-29.01)	27.72 (23.00-36.50)	28.38 (21.80-32.63)	230.50 (10.62-434.30)	66.42 (29.16-99.70)
Cu	0.04 (0.01-0.09)	<0.01 (<0.01-0.06)	0.04 (0.02-0.06)	<0.01	0.04 (<0.01-0.20)	<0.01 (<0.01-0.04)
Fe	0.57 (0.05-2.46)	0.39 (0.06-0.47)	0.61 (0.27-0.94)	0.22 (0.10-0.31)	1.56 (<0.01-8.70)	0.23 (0.02-0.56)
K.....	20.27 (12.90-58.10)	21.96 (17.40-24.70)	11.55 (7.70-15.10)	11.38 (9.50-17.16)	44.79 (9.40-124.80)	51.35 (41.10-75.29)
Mg	2.46 (1.39-3.07)	3.45 (2.97-3.83)	2.51 (1.86-3.21)	2.00 (1.83-2.33)	38.48 (1.85-66.76)	7.17 (3.05-11.45)
Mn	0.17 (0.05-0.44)	0.08 (0.07-0.11)	0.06 (0.03-0.08)	0.05 (0.03-0.08)	0.86 (0.02-1.69)	0.41 (0.18-0.89)
Na	57.97 (34.69-84.41)	184.44 (157.17-245.06)	179.58 (136.39-244.92)	221.31 (54.12-302.73)	72.18 (13.70-170.64)	211.21 (183.67-262.93)
P.....	0.18 (0.03-1.04)	0.08 (0.03-0.27)	0.10 (0.03-0.27)	0.10 (0.03-0.41)	0.22 (<0.05-1.47)	0.33 (0.03-1.20)
Pb	<0.05 (<0.05-0.13)	0.06 (<0.05-0.10)	0.06 (<0.05-0.08)	<0.05 (<0.05-0.08)	1.01 (0.06-6.84)	0.17 (<0.05-0.46)
Si	9.45 (3.85-12.80)	7.96 (3.11-8.91)	13.33 (10.20-17.29)	10.70 (5.99-12.73)	9.60 (5.22-12.36)	13.68 (8.45-19.45)
Zn	0.05 (<0.01-0.34)	0.02 (<0.01-0.05)	0.04 (0.01-0.07)	<0.01 (<0.01-0.03)	0.42 (0.25-0.79)	0.04 (<0.01-0.16)
HCO ₃ , mg/l .	261.53 (235.00-290.00)	617.58 (549.00-866.00)	484.33 (450.00-518.00)	672.43 (638.00-762.00)	134.75 (79.00-366.00)	304.10 (234.00-518.00)
SO ₄ , mg/l	3.18 (0.15-8.4)	9.84 (2.10-16.20)	39.78 (33.85-46.13)	17.45 (7.12-20.67)	663.10 (140.27-1595.45)	384.94 (271.81-503.58)
EC, S.....	0.46 (0.25-0.52)	1.08 (1.00-1.13)	.98 (0.85-1.09)	1.41 (1.32-1.45)	1.83 (0.54-3.02)	1.60 (1.26-2.01)
Eh, mV.....	180.77 (88.00-265.00)	160.36 (-68.00-238.00)	170.67 (80.00-282.00)	144.86 (0.00-194.00)	208.90 (177.00-256.00)	150.67 (3.00-207.00)
pH	7.21 (6.29-7.98)	7.36 (7.02-7.58)	7.15 (6.69-7.42)	7.13 (7.06-7.26)	7.46 (6.50-9.35)	7.63 (6.98-8.17)
Temp, °C	29.59 (26.60-31.90)	34.58 (33.20-37.50)	33.33 (31.40-36.00)	40.63 (39.00-42.30)	27.38 (25.30-31.40)	35.68 (31.40-40.60)

Tabla 12. Índices de saturación de muestras de agua

Mineral	DH1	DH2	DH3	DH4	Sumidero	Rebaje
Albita	-0,518	NC	0,040	0,523	-1,284	-0,158
Calcita	, 0,325	0,200	0,860	0,119	0,086	0,282
Dolomita	, 1,801	0,559	0,597	1,362	0,978	0,396
Yeso	-3,414	3,027	1,274	2,401	2,779	0,587
Ilita	3,910	NC	2,808	4,638	0,677	4,667
Caolinita	, 5,621	NC	3,353	6,291	2,979	12,905
Ca-montmorillonita	, 4,584	NC	2,451	5,527	1,503	4,868
Siterita	, 0,305	NC	NC	NC	NC	NC
Gel de sílice	, 0,505	0,631	0,416	0,394	0,563	0,473

NC = No calculado.

EXPOSICIONES Y CONCLUSIONES

Investigaciones anteriores sobre los impactos ambientales del relleno de arena de desechos mineros demostraron que la mineralogía del relleno de arena, así como la exposición al O₂ y al agua antes de la inundación de la mina, controlarán la liberación de metales a las aguas subterráneas. Los minerales secundarios que se forman cuando el relleno de arena se expone al O₂ durante las operaciones de la mina se disolverán, y puede ocurrir la oxidación de sulfuros por Fe³⁺ después de inundar el relleno de arena. Se espera que la adición de cemento reduzca el área de superficie de los sulfuros expuestos a la oxidación, reduzca la difusión de aire en el relleno antes de la inundación al aumentar la saturación de agua residual y aumente la capacidad amortiguadora proporcionada por la mineralogía natural. Estos factores deberían resultar en la liberación de menos metales de los que ocurrirían solamente con el relleno

de arena.

La adición de cemento afectó la química del relleno bajo la influencia de una fuente externa de agua ácida. Se agregó suficiente H₂SO₄ a la solución que estaba en contacto con el relleno cementado para bajar el pH a aproximadamente 2.0. En tres muestras de relaves diferentes, aumentó el pH de la solución en contacto con el relleno. La capacidad de neutralización de ácido, así como la tasa de neutralización de ácido, de las tres muestras, fue diferente.

La distribución del tamaño de las partículas de los relaves utilizados para hacer un relleno cementado pareció ser muy importante para controlar la tasa de ataque químico. El material con una distribución más amplia de tamaños de partículas creó hormigón con una velocidad de reacción química más lenta con ácido que el material con tamaños de partículas uniformes. Es posible que la velocidad de reacción

más lenta resulte de una difusión más lenta del ácido en la muestra, lo que a su vez puede deberse a tamaños de poro más pequeños.

Las muestras SN y SO tenían distribuciones de tamaños de partículas muy similares y márgenes de tamaños más pequeños que la muestra CN. Estas muestras presentaron una neutralización muy rápida del lavado ácido que fluía sobre la superficie de los relaves cementados, lo que sugiere una tasa de penetración rápida. Lo que antecede, a su vez, podría interpretarse en relación con el tamaño de poro del hormigón.

La presencia de minerales de sulfuro en los relaves es importante para determinar la capacidad de neutralización de ácidos de los relaves. La principal diferencia entre las muestras SO y SN fue el contenido de pirita estimado; la cantidad de carbonatos de Ca y Mg, estimada a partir de la disolución en ácido fuerte, que fue aproximadamente la misma. Por lo tanto, la muestra SN tenía un mayor potencial para generar agua ácida que la muestra SO. Después de un período aproximadamente equivalente de neutralización del ácido por parte de las dos muestras, el lavado que se puso en contacto con la muestra SN, permaneció ácido. Parece ser que el ácido adicional expuso suficientes minerales de sulfuro reducidos para permitir la oxidación y la producción de ácido. La capacidad de producción de ácido de los relaves será una consideración importante antes de su uso como relleno cementado.

Los rebajes rellenados en roca con bajas conductividades hidráulicas probablemente constituirán vías

de flujo preferenciales después de la inundación de la mina; sin embargo, la tasa de flujo a través del relleno será mucho menor antes de la inundación. Además, la adición de cemento disminuye la conductividad hidráulica del relleno, lo que resultará en un menor flujo de agua a través del relleno que si se utiliza relleno de arena sin cementar. Se puede desarrollar un flujo preferencial en donde ocurre una contracción cerca de los límites de los rebajes o en donde el relleno se ha deteriorado debido a la oxidación del sulfuro. Sin embargo, el efecto del aumento del flujo se verá compensado por la disminución de la superficie de contacto y por el blindaje de las rutas de flujo preferenciales por precipitados insolubles.

Teniendo en cuenta todos los factores, el impacto general del relleno cementado debe ser menor que el efecto del relleno de arena no cementado. Los factores relevantes para el potencial de contaminación del relleno cementado que justifican un mayor estudio incluyen (1) la relación entre la saturación residual del relleno y la adición de cemento, (2) la reducción en la oxidación de sulfuro y la amortiguación resultante del blindaje de las vías de flujo preferenciales, (3) cambios en la resistencia del relleno cementado a largo plazo causados por la oxidación de sulfuros, y (4) la calidad del agua intersticial residual después del relleno.

Figura 1

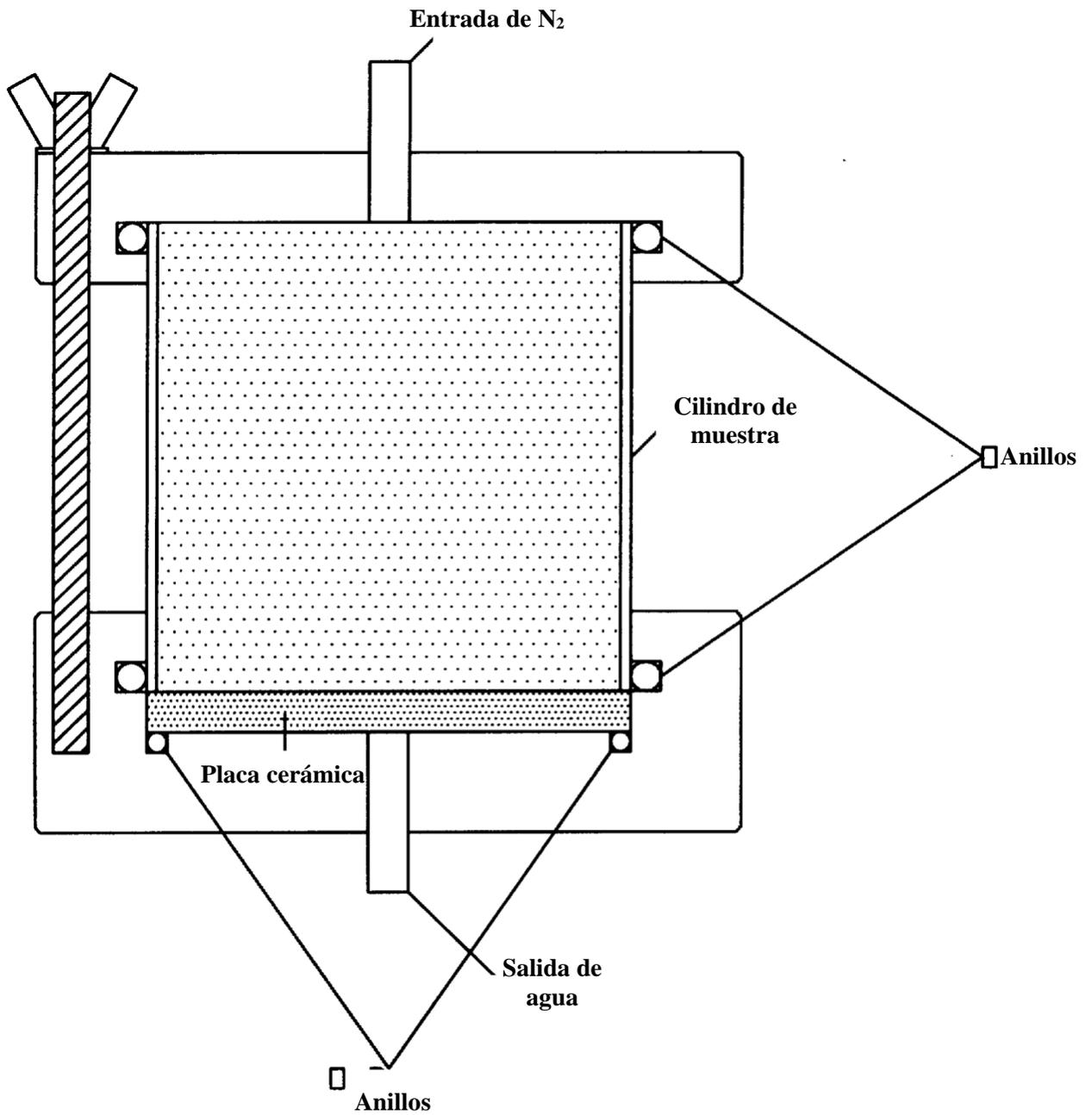


Figura 1 - Sección transversal a través de la célula de presión Tempe.

Figura 2

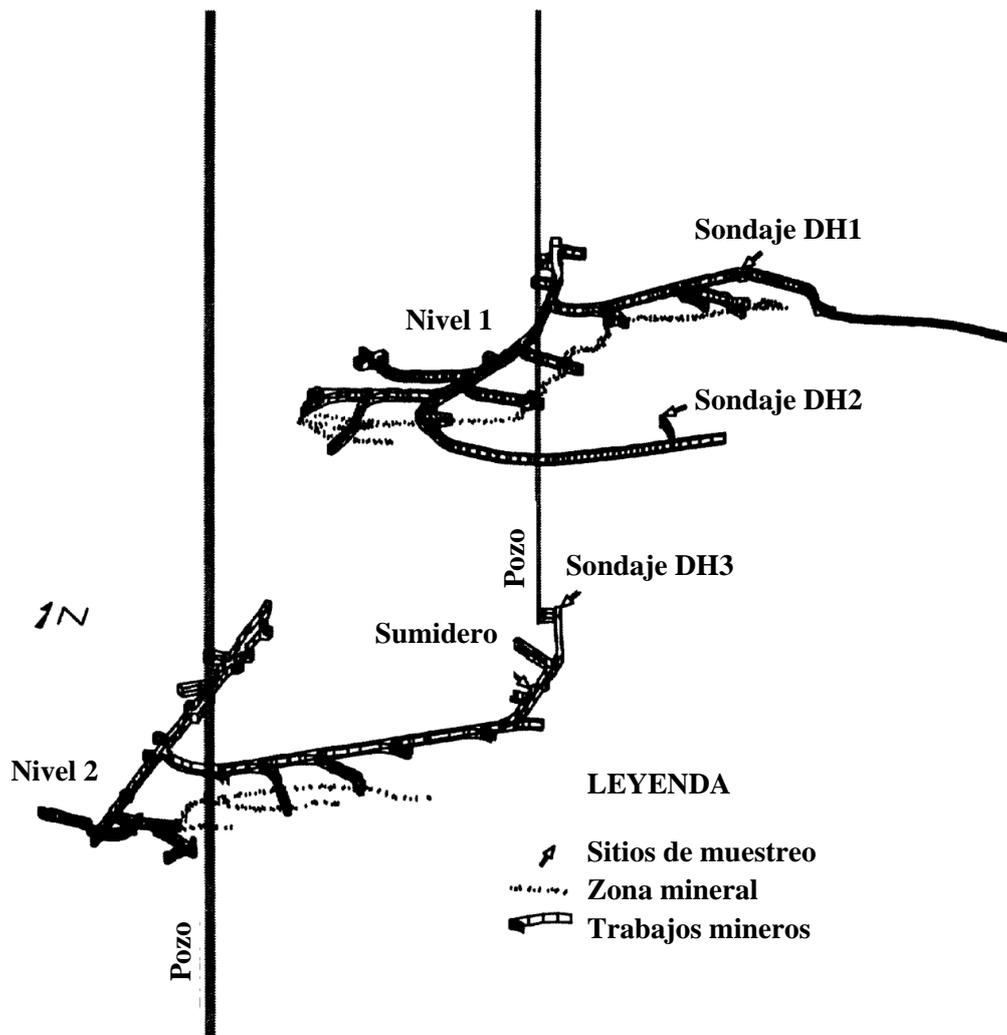


Figura 2 - Diagrama esquemático de trabajos mineros y pruebas de rebaje.

Figura 3

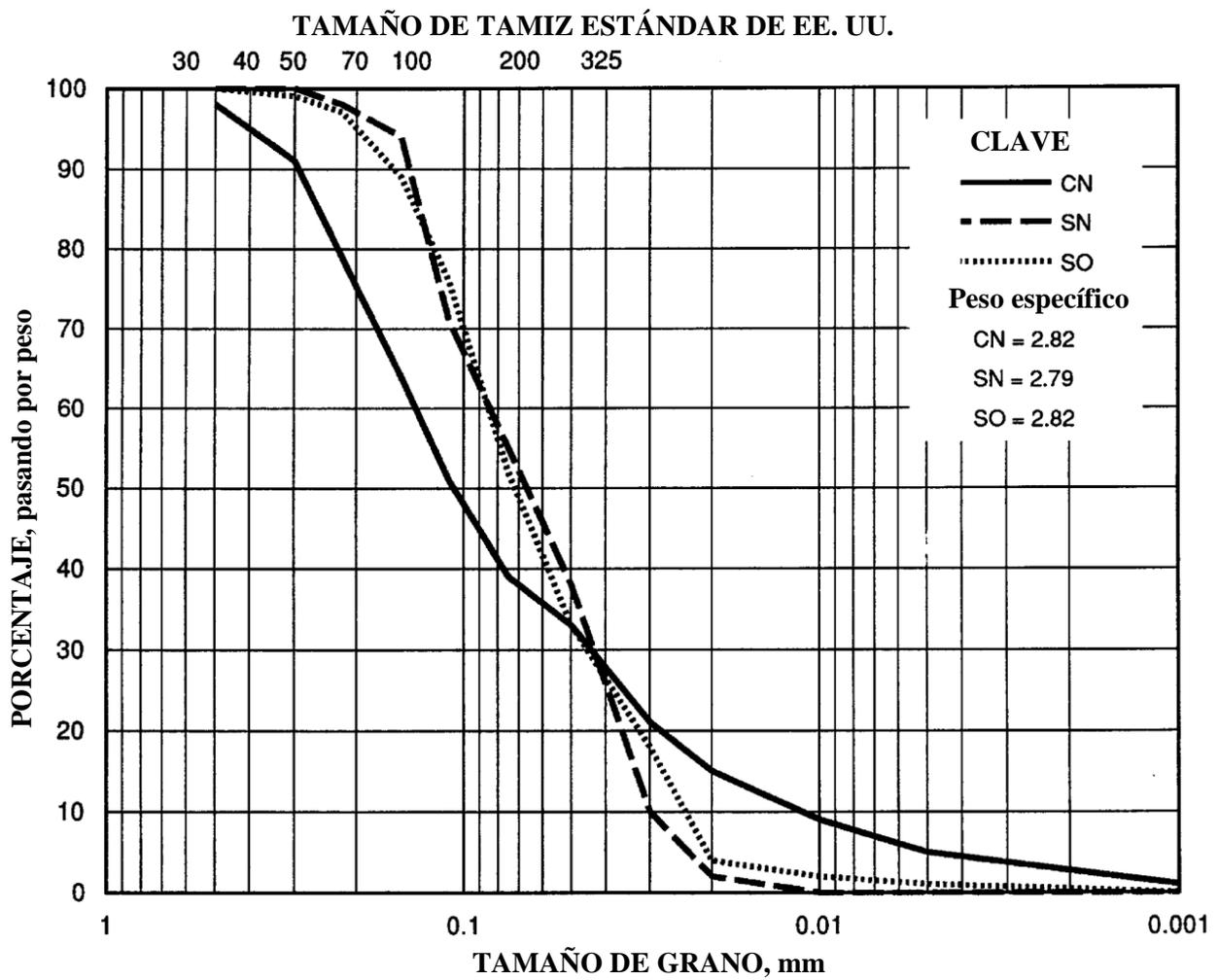


Figura 3 - Distribución del tamaño de partículas de las muestras de relaves.

Figura 4

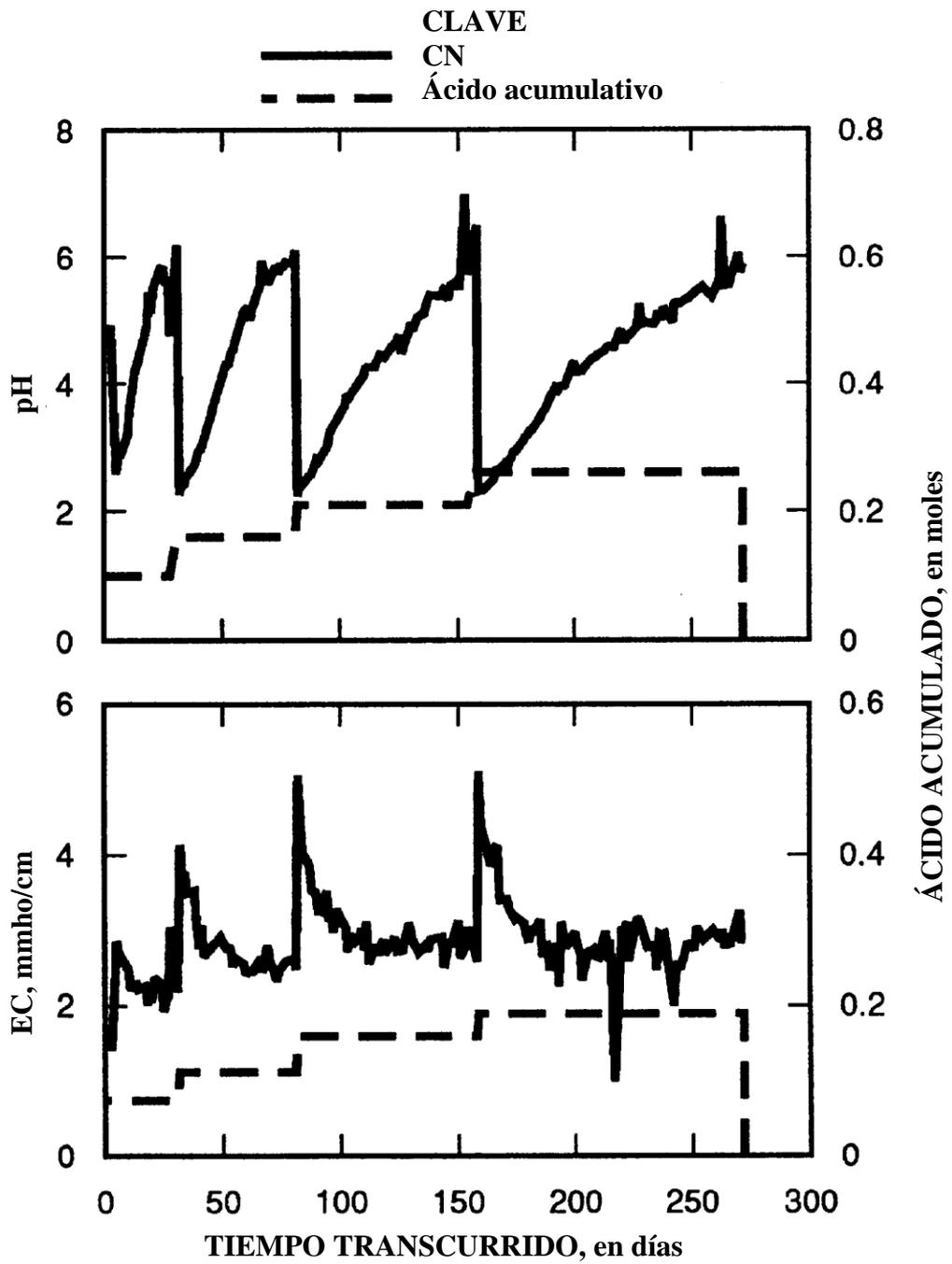


Figura 4 - pH de H₂SO₄, lavado de lixiviados, muestra CN

Figura 5

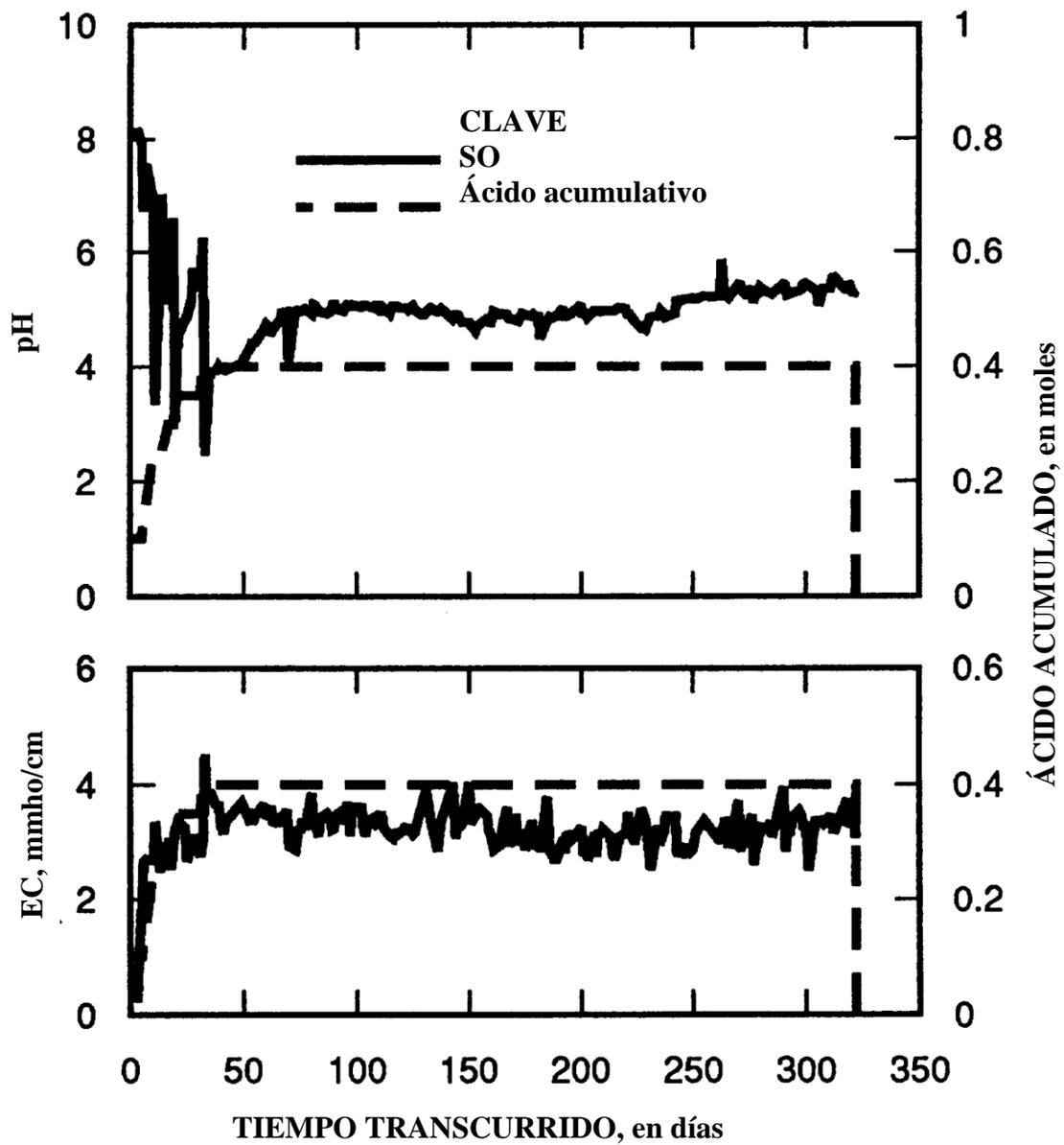


Figura 5 - pH de H_2SO_4 , lavado de lixiviados, muestra SO.

Figura 6

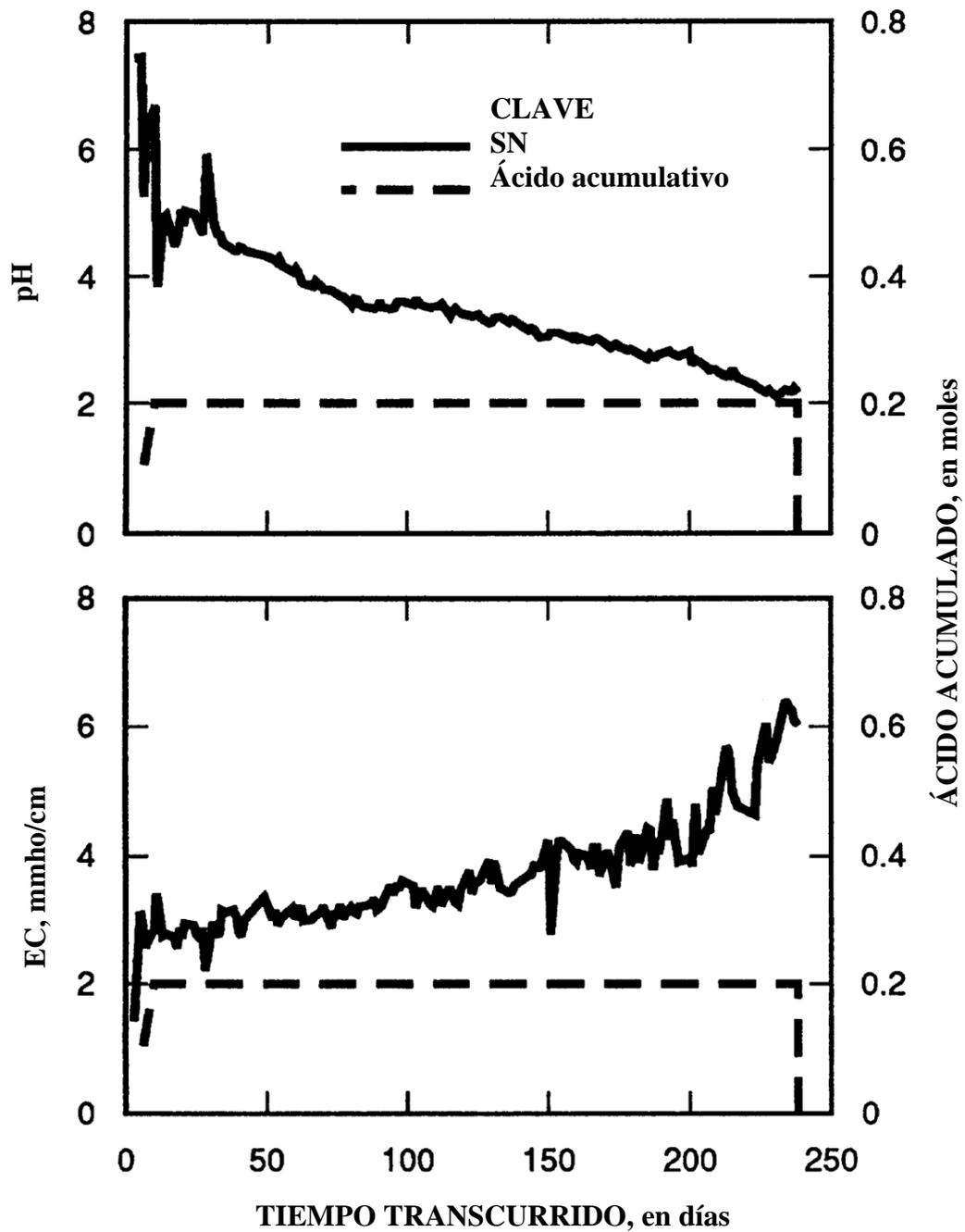


Figura 6 - pH de H₂SO₄, lavado de lixiviados, muestra SN.