



Universidad de Concepción  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Metalúrgica



## **ADR**

### **IPDMT: Alternativa sustentable para el Cierre de faenas**

#### **Integrantes:**

Deyanira Carrillo Suazo

Rocío Tardones Cartes

#### **Profesor:**

Christian Hernández

Concepción, Chile 23 de junio 2025



## Resumen

Este informe presenta una revisión técnica y crítica del enfoque de relaves espesados y en forma de pasta (P&TT) como alternativa sostenible para la disposición de residuos mineros. Basado en el artículo científico publicado en *Sustainability* (2023), se analizan los fundamentos operacionales, el equipamiento requerido, las ventajas comparativas y su contribución a la sostenibilidad ambiental, social y económica.

A diferencia de los métodos convencionales, los sistemas P&TT permiten aumentar la concentración de sólidos en la pulpa de relaves, reduciendo el contenido de agua libre y mejorando su estabilidad geotécnica. Esto se traduce en una mayor seguridad operacional, recuperación eficiente de agua y una disposición más compacta, lo que reduce significativamente los riesgos ambientales y los costos de cierre de faena.

El informe también revisa casos reales en Canadá, Australia, Chile y Tanzania, donde esta tecnología ha sido implementada exitosamente. A través de estos ejemplos, se demuestra que el uso de P&TT es una opción viable no solo desde el punto de vista técnico, sino también desde una perspectiva de desempeño sustentable a largo plazo.

Se concluye que la adopción de tecnologías P&TT representa una herramienta estratégica para enfrentar los desafíos actuales de la minería, y se recomienda su incorporación desde etapas tempranas del diseño o en la mejora de operaciones existentes.

## Objetivo

Evaluar el enfoque de relaves espesados y en forma de pasta (P&TT) como alternativa tecnológica sostenible para la disposición de residuos mineros, destacando sus fundamentos técnicos, beneficios operacionales, implicancias ambientales y casos de aplicación internacional.



## Índice de contenido

1. Introducción.....	5
2. Disposición en el pit de relaves mineros (IPDMT) .....	6
2.1. Diseño para asegurar la estabilidad física de las instalaciones de almacenamiento de relaves en el rajo .....	7
2.2. Diseño para Asegurar la Estabilidad Hidrológica de las Instalaciones de Almacenamiento de Relaves en el Rajo .....	8
2.2.1. Sistemas de gestión de agua.....	9
2.2.2. Monitoreo del nivel freático y control del estanque sobrenadante .....	10
2.2.3. Estudios hidrogeológicos, control de filtraciones y modelación.....	10
2.3. Diseño para Asegurar la Estabilidad Geoquímica de las Instalaciones de Almacenamiento de Relaves en el Rajo .....	11
3. Análisis de costos .....	12
3.1. Costos estimados de cierre de mina.....	13
3.2. Comparando escenarios de cierre.....	13
4. Estado de la práctica .....	14
5. Discusiones .....	18
5.1. Ventajas y desafíos técnicos del IPDMT .....	18
5.2. Desafíos importantes .....	18
5.3. Consideraciones socioambientales y percepción pública .....	19
5.4. Comparación con la disposición de relaves submarina.....	19
5.5. Gestión del agua, rehabilitación y tendencias futuras .....	19
6. Conclusiones .....	21
Bibliografía .....	22



## Índice de figuras

<b>Figura 1. Niveles freáticos típicos en una mina a cielo abierto.....</b>	<b>9</b>
<b>Figura 2. Disposición final de relaves mineros en fosas: modelo de gestión y monitoreo del agua.....</b>	<b>10</b>
<b>Figura 3. Disposición final de relaves mineros en el pozo de Rabbit Lake: descripción general de la playa de relaves.....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 4. Mina a cielo abierto de Rabbit Lake con progreso de llenado de relaves .....</b>	<b>15</b>
<b>Figura 5. Proyecto minero Antapaccay: (a) esquema del proyecto. (b) Mapa antiguo del proyecto minero Tintaya.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 6. a) Espesadores de relaves de alta densidad (HDT) IPDMT de Antapaccay. (b) Antigua mina a cielo abierto de Tintaya.....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 7. Mina Ekati: (a) descripción general de tres minas a cielo abierto. (b) Mina a cielo abierto Beartooth sin relaves mineros. (c) Mina a cielo abierto Beartooth con relaves mineros.....</b>	<b>17</b>
<b>Figura 8. Vista general de la mina a cielo abierto de Tapian y sección transversal de la mina de Tapian con el portal del túnel colapsado.....</b>	<b>17</b>

## Índice de tablas

<b>Tabla 1. Costos operacionales (OPEX) comparados.....</b>	<b>13</b>
---	-----------



## 1. Introducción

En el contexto de una industria minera cada vez más exigida por criterios ambientales, sociales y económicos, la gestión de relaves se ha transformado en uno de los mayores desafíos para la sostenibilidad de los proyectos extractivos. Tradicionalmente, los relaves han sido dispuestos en grandes tranques que contienen altos volúmenes de agua, lo que implica riesgos geotécnicos significativos, alto consumo hídrico y una fuerte ocupación del territorio.

Frente a esta problemática, han surgido tecnologías orientadas a una gestión más sustentable de los residuos mineros, entre las cuales destacan los **relaves espesados y en forma de pasta (P&TT, por sus siglas en inglés)**. Estas técnicas consisten en reducir el contenido de agua de la pulpa de relaves antes de su disposición final, mejorando su comportamiento reológico y reduciendo su fluidez, lo que permite prescindir en gran parte del uso de diques de contención y facilita la recuperación del agua de proceso.

El presente informe se basa en el artículo científico *"A Sustainability-Oriented Approach to Tailings Management in Mining: Reviewing the Concept of Paste and Thickened Tailings"* (Sustainability, 2023), el cual realiza una revisión crítica del concepto P&TT como una herramienta moderna para la gestión de relaves en minería. En él se analizan los fundamentos técnicos de estas tecnologías, su implementación operacional, las ventajas comparativas frente a la disposición convencional y su aporte a la sostenibilidad a través de ejemplos concretos aplicados en países como Chile, Canadá, Australia y Tanzania.

Este análisis busca servir como base para la evaluación y eventual incorporación de tecnologías P&TT en nuevas operaciones mineras o en la mejora de proyectos existentes, en particular en zonas donde el uso eficiente del agua, la estabilidad geotécnica y la aceptación social del proyecto son factores clave.



## 2. Disposición en el pit de relaves mineros (IPDMT)

La Disposición en el Pit de Relaves Mineros (IPDMT, por sus siglas en inglés *In-Pit Disposal of Mine Tailings*) es una técnica de gestión de residuos que consiste en depositar relaves mineros en un pit agotado de mina a cielo abierto, en condiciones controladas. Esta alternativa busca reducir la huella ambiental de los proyectos mineros, al reutilizar un espacio previamente intervenido, evitar la construcción de nuevas instalaciones superficiales, y facilitar un cierre progresivo, seguro y sustentable de la faena minera.

Desde una perspectiva regulatoria, la implementación del IPDMT requiere cumplir con diversas consideraciones clave:

- Verificación de la ausencia de mineralización remanente en el fondo del pit, que pudiera comprometer la futura explotación.
- Identificación y protección de recursos hídricos subterráneos, con sistemas de monitoreo y control de infiltraciones.
- Evaluación de la estabilidad de los taludes del pit y de la masa de relaves a depositar.
- Caracterización de los relaves a disponer (contenido sólido, permeabilidad, potencial generador de ácido).
- Condiciones de acceso operativo para instalación de cañerías, monitoreo y mantenimiento.
- Control de la cota final del depósito, considerando que el nivel de relaves debe situarse típicamente  $\pm 5$  metros respecto al nivel natural de agua del sector.

El proceso operativo consiste en transportar los relaves desde la planta de procesamiento en forma de pulpa, mediante tuberías hidráulicas, hasta el interior del pit. Allí, se distribuyen a través de spigots ubicados en el perímetro, formando una playa de relaves que se expande hacia el centro. El agua sobrenadante



decantada es acumulada en una poza central, desde donde puede ser recuperada mediante bombas flotantes para su reutilización en la planta.

Finalmente, es indispensable contar con un plan de llenado del pit, que incluya el diseño del volumen útil, el control de la altura libre (freeboard) sobre el nivel de agua, y la capacidad de respuesta ante eventos meteorológicos (lluvias, nieve). Este plan asegura que no se produzcan sobrellenados ni rebalses, y permite gestionar adecuadamente el balance hídrico durante toda la operación.

## **2.1. Diseño para asegurar la estabilidad física de las instalaciones de almacenamiento de relaves en el rajo**

La estabilidad física de las instalaciones de almacenamiento de relaves en un pit agotado es un aspecto crítico para la seguridad operativa y ambiental del proyecto. En este contexto, la estabilidad de los taludes del rajo adquiere especial relevancia, ya que estos actúan como muros naturales de confinamiento para los relaves. Su diseño debe basarse en estudios geológicos, geotécnicos e hidrogeológicos rigurosos, aplicando criterios conservadores de seguridad y utilizando tecnologías modernas de monitoreo.

Durante la operación del depósito, es fundamental implementar sistemas de vigilancia en tiempo real, tales como drones, imágenes satelitales y radares geotécnicos, que permitan detectar desplazamientos o deformaciones en los taludes y tomar acciones preventivas.

En cuanto al proceso de disposición, los relaves se transportan en forma de pulpa mediante sistemas hidráulicos de cañerías. Una vez en el interior del pit, son distribuidos desde spigots perimetrales, lo que permite la formación de una playa de relaves con pendiente controlada. La decantación natural separa el agua sobrenadante, que es acumulada en una poza central y puede ser extraída mediante bombas flotantes para su recirculación.



Para facilitar estas operaciones, es necesario asegurar la existencia y mantenimiento de caminos y rampas de acceso hacia los diferentes niveles del pit. Estos accesos permiten instalar y retirar tuberías, inspeccionar la poza, operar bombas, y realizar tareas de mantenimiento y cierre progresivo.

El proceso de llenado implica una elevación progresiva del nivel de relaves, lo cual genera una consolidación diferencial del material debido a la presión de carga y la expulsión del agua intersticial. Las capas más profundas, al estar sometidas a mayores presiones, tienden a consolidarse más rápidamente que las capas superiores, lo que puede provocar asentamientos diferenciales. Un problema potencial asociado a esta etapa es la presencia de aguas subterráneas. Si el pit no está correctamente drenado o si existe recarga desde acuíferos adyacentes, puede producirse un ingreso de agua que reduce la densificación de los relaves, dificultando el tránsito, la instalación de coberturas y otras labores asociadas al cierre. Por ello, es fundamental integrar sistemas de drenaje, bombeo y monitoreo hidrogeológico durante toda la vida útil del depósito.

## **2.2. Diseño para Asegurar la Estabilidad Hidrológica de las Instalaciones de Almacenamiento de Relaves en el Rajo**

La estabilidad hidrológica en sistemas de disposición de relaves en el pit (IPDMT) es fundamental para prevenir filtraciones, controlar el nivel de aguas subterráneas y evitar impactos ambientales sobre cuencas hidrográficas cercanas. El diseño debe incorporar una serie de sistemas que aseguren el manejo adecuado de aguas lluvias, aguas freáticas y aguas sobrenadantes, tanto en la etapa operativa como en el cierre de la instalación.



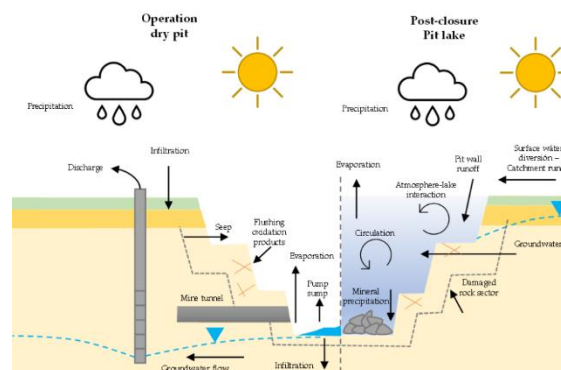


### 2.2.1. Sistemas de gestión de agua

Para un funcionamiento seguro y eficiente del depósito, se deben implementar múltiples sistemas de gestión hídrica. Entre los principales destacan:

- Canales perimetrales de desvío, diseñados para interceptar y desviar aguas lluvias, evitando su ingreso al pit y reduciendo el volumen de agua en contacto con los relaves.
- Sistemas de drenaje en fondo y paredes, como drenes tipo chimenea, carpetas drenantes o diseños en espina de pescado (herringbone), que captan filtraciones internas o aguas provenientes de acuíferos.
- Bombas de extracción de agua sobrenadante, ubicadas sobre plataformas flotantes, que permiten controlar el volumen de la poza central generada por decantación, evitando sobrellenado y facilitando la recirculación del agua hacia la planta.
- Red de pozos de monitoreo y extracción, instalados en el perímetro del rajo, que permiten vigilar la calidad y comportamiento del agua subterránea, y, si es necesario, extraer flujos contaminados para su tratamiento.

Estos sistemas deben estar diseñados para operar de forma continua durante toda la vida útil del depósito y adaptarse a condiciones climáticas variables.



**Figura 1. Niveles freáticos típicos en una mina a cielo abierto.**



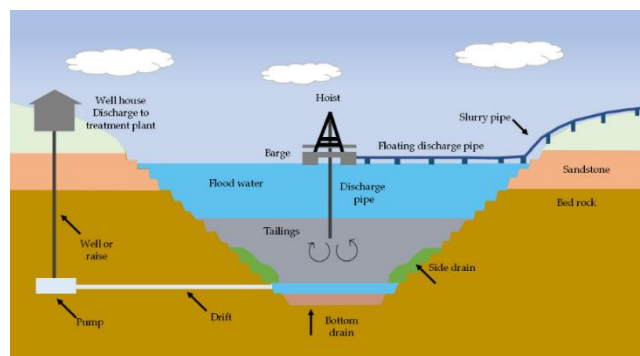
### 2.2.2. Monitoreo del nivel freático y control del estanque sobrenadante

Es esencial implementar un programa de monitoreo continuo del nivel freático, especialmente en pits que se encuentran en contacto con cuerpos de agua subterráneos. El ascenso del nivel freático puede generar presiones que afecten la consolidación de los relaves y la estabilidad global del sistema. Asimismo, es necesario mantener bajo control el estanque de agua sobrenadante, formado por decantación, utilizando bombas flotantes que regulen su volumen y aseguren un freeboard adecuado para enfrentar eventos de lluvia intensa o deshielo.

### 2.2.3. Estudios hidrogeológicos, control de filtraciones y modelación

Para diseñar una estrategia de gestión hidrológica eficaz, se deben realizar estudios hidrogeológicos detallados, que incluyan la caracterización del acuífero, sus niveles piezométricos, gradientes hidráulicos y conductividades. Con esta información, se desarrollan modelos computacionales de flujo subterráneo y transporte de solutos, los cuales permiten simular el comportamiento del sistema bajo diferentes escenarios operativos y climáticos.

Estos modelos son herramientas clave para dimensionar adecuadamente los sistemas de drenaje, prever posibles rutas de migración de contaminantes, y asegurar el cumplimiento normativo durante el cierre y postcierre del depósito.



*Figura 2. Disposición final de relaves mineros en fosas: modelo de gestión y monitoreo del agua.*



### **2.3. Diseño para Asegurar la Estabilidad Geoquímica de las Instalaciones de Almacenamiento de Relaves en el Rajo**

La estabilidad geoquímica del sistema de disposición de relaves en el pit es fundamental para evitar la generación de contaminantes que puedan afectar la calidad del agua, la salud humana o el ecosistema. Uno de los principales riesgos es la formación de drenaje ácido de mina (AMD), el cual debe ser anticipado, prevenido, mitigado y monitoreado adecuadamente.

El drenaje ácido de mina (AMD) se produce cuando minerales sulfurados, especialmente la pirita ( $\text{FeS}_2$ ), reaccionan con el oxígeno y el agua, generando ácido sulfúrico. Este proceso acidifica el entorno y disuelve metales pesados presentes en los relaves, como hierro, cobre, plomo, arsénico y cadmio, generando efluentes altamente tóxicos que pueden permanecer activos por décadas si no se controlan. La generación de AMD representa una amenaza grave para cuerpos de agua subterráneos y superficiales, y es responsable de importantes pasivos ambientales.

Para prevenir la formación de AMD, se pueden aplicar diversas estrategias. En primer lugar, se recomienda la remoción parcial o total de pirita mediante técnicas de flotación selectiva. Además, es esencial realizar una caracterización geoquímica de los relaves, separando los materiales potencialmente generadores de ácido (PAG) de los no generadores (NPAG). Durante la disposición, los relaves PAG pueden ser encapsulados en el centro del depósito, rodeados por capas protectoras. Por otro lado, la baja permeabilidad natural de los relaves finos y húmedos contribuye a reducir la difusión de oxígeno, lo cual puede ser complementado con coberturas que impidan el ingreso de aire.



En los casos donde la prevención no es suficiente, se deben implementar medidas de mitigación y monitoreo. Esto incluye la instalación de drenes de captación de lixiviados, sistemas de neutralización química o tratamiento pasivo, y una red de pozos de monitoreo geoquímico que permita verificar la calidad del agua y detectar variaciones a tiempo. Asimismo, el desarrollo de modelos de predicción geoquímica permite simular la evolución del sistema bajo distintos escenarios operativos y climáticos.

Durante el cierre del depósito, se deben aplicar técnicas de rehabilitación que garanticen el aislamiento del material. Estas incluyen coberturas secas con suelos arcillosos compactados, coberturas húmedas mediante láminas de agua, y la implementación de geomembranas multicapa que impiden la infiltración y el contacto con el oxígeno. Finalmente, la revegetación controlada permite estabilizar el terreno, disminuir la erosión y favorecer la integración paisajística del sitio intervenido.

Estas medidas permiten asegurar una gestión geoquímica responsable de los relaves a largo plazo y cumplir con las exigencias normativas asociadas al cierre de minas.

### **3. Análisis de costos**

Uno de los aspectos más relevantes para evaluar la viabilidad de la disposición de relaves en el rajo (IPDMT) es su comportamiento económico comparado con otras alternativas de gestión de relaves. En particular, es importante analizar tanto los costos operacionales (OPEX) como los costos estimados de cierre de mina, considerando criterios de eficiencia, sustentabilidad y cumplimiento regulatorio.



Costos operacionales (OPEX) comparados Según los datos reportados en el artículo de Cacciuttolo y Atencio (2023), los costos operacionales varían considerablemente dependiendo del tipo de tecnología utilizada para transportar y depositar los relaves. Representación general en la tabla 1.

*Tabla 1. Costos operacionales (OPEX) comparados.*

Tecnología de disposición	Costo operacional estimado (USD/t)
Disposición convencional (TSF)	~1,0 USD/t
Disposición en el rajo (IPDMT)	~2,5 USD/t
Filtrado y disposición en seco (Dry Stack)	~4,0 USD/t

Aunque el IPDMT presenta un costo operacional mayor que el de las instalaciones convencionales (TSF), sigue siendo considerablemente más económico que las tecnologías de disposición en seco, las cuales requieren filtrado, transporte mecánico y estabilización superficial del depósito.

### 3.1. Costos estimados de cierre de mina

Uno de los mayores beneficios económicos del IPDMT se manifiesta en la etapa de cierre de faena, donde se pueden evitar inversiones significativas en infraestructura de sellado, monitoreo a perpetuidad y tratamientos de aguas contaminadas.

### 3.2. Comparando escenarios de cierre

**TSF tradicional:** el cierre completo puede superar los 125 millones USD por cada 1000 Mt de relaves, considerando coberturas, estabilidad, drenajes, monitoreo ambiental y postcierre extendido.



**IPDMT:** presenta un costo de cierre estimado de 55 millones USD por cada 1000 Mt, al evitar obras de gran envergadura y facilitar un cierre progresivo, utilizando los taludes del pit como confinamiento natural.

En resumen, el IPDMT implica una inversión operativa intermedia, pero ofrece ventajas sustanciales en el costo total de cierre, reduciendo la necesidad de intervenciones futuras y mejorando la sustentabilidad financiera del proyecto a largo plazo.

#### **4. Estado de la práctica**

La aplicación del método IPDMT (In-Pit Disposal of Mine Tailings) ha sido evaluada e implementada en diversas operaciones mineras alrededor del mundo, demostrando su viabilidad técnica y económica bajo ciertas condiciones geotécnicas e hidrogeológicas. A continuación, se presentan algunos estudios de caso relevantes que ilustran distintas realidades operacionales.

##### **Rabbit Lake (Canadá)**

Ubicada en Saskatchewan, esta mina de uranio utilizó un pit agotado para la disposición de relaves desde 1986. El proyecto es considerado un caso exitoso de implementación de IPDMT, ya que permitió reducir la exposición a la superficie y evitar la construcción de un nuevo tranque.

- Volumen de relaves: 2 millones de toneladas.
- Contenido sólido: 55–60%.
- Estado del rajo: agotado, sin presencia de túneles ni mineralización remanente.
- Sistema de monitoreo: pozos perimetrales y control químico del agua.



*Figura 3. Disposición final de relaves mineros en el pozo de Rabbit Lake: descripción general de la playa de relaves.*



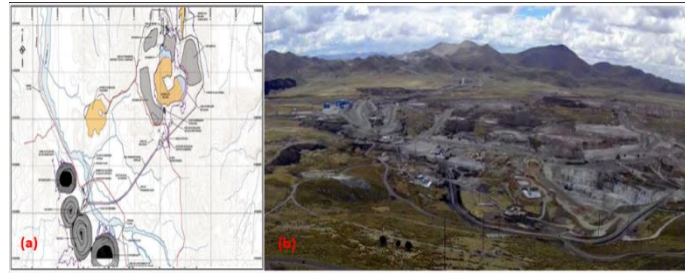
*Figura 4. Mina a cielo abierto de Rabbit Lake con progreso de llenado de relaves.*

### **Antapaccay (Perú)**

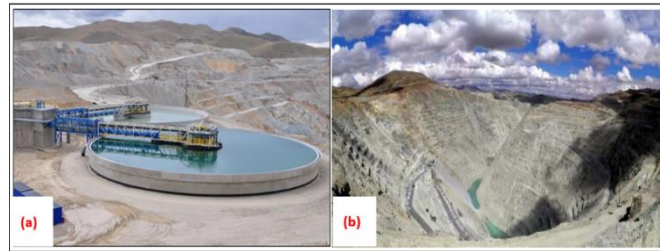
En esta operación de cobre a gran escala, se desarrolló un plan de disposición de relaves en el pit con volúmenes significativamente mayores. Este proyecto se considera una de las propuestas más ambiciosas de IPDMT en Latinoamérica.

- Volumen proyectado: hasta 300 millones de toneladas.
- Tasa de disposición: 70.000 tpd.
- Contenido sólido: 52–55%.
- Estado del rajo: pit agotado con condiciones geotécnicas favorables.





**Figura 5. Proyecto minero Antapaccay: (a) esquema del proyecto. (b) Mapa antiguo del proyecto minero Tintaya.**



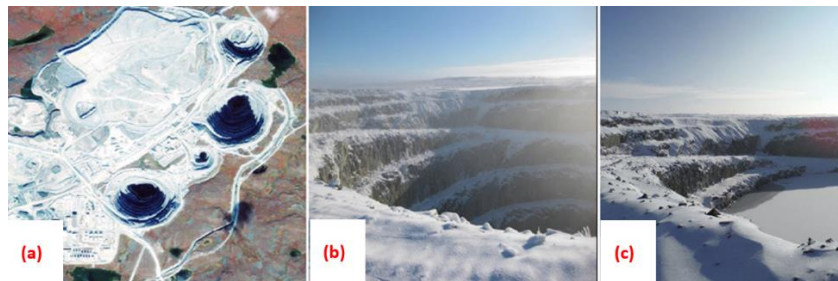
**Figura 6. a) Espesadores de relaves de alta densidad (HDT) IPDMT de Antapaccay. (b) Antigua mina a cielo abierto de Tintaya.**

## **Ekati (Canadá)**

La mina Ekati, productora de diamantes, ha dispuesto relaves finos en pits agotados a partir de 2004. El diseño incluye sistemas de monitoreo de estabilidad y control de agua a perpetuidad.

- Tipo de relaves: finos, parcialmente filtrados.
- Método de disposición: hidráulico, con spigots y control del beach slope.
- Volumen acumulado: no especificado, pero en múltiples pits.
- Condición del rajo: apto para confinamiento sin interferencias geológicas.



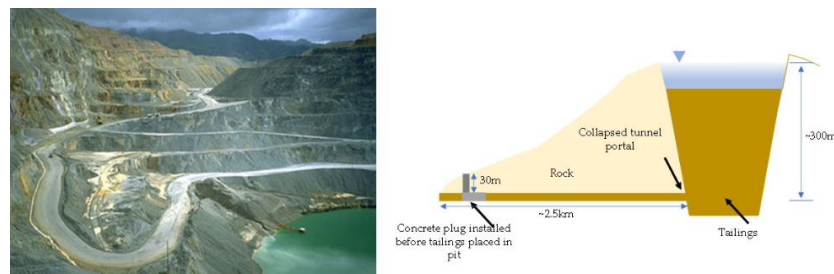


**Figura 7. Mina Ekati: (a) descripción general de tres minas a cielo abierto. (b) Mina a cielo abierto Beartooth sin relaves mineros. (c) Mina a cielo abierto Beartooth con relaves mineros.**

### Marcopper (Filipinas)

Este caso es citado como un ejemplo fallido, donde la disposición en el pit resultó en un desastre ambiental por falta de planificación adecuada y presencia de túneles mal sellados que causaron filtraciones masivas.

- Volumen depositado: ~84 millones de toneladas.
- Problemas: colapso estructural, drenaje ácido, fuga de relaves al río Boac.
- Lecciones: importancia crítica del sellado de galerías subterráneas y modelado hidrogeológico.



**Figura 8. Vista general de la mina a cielo abierto de Tapan y sección transversal de la mina de Tapan con el portal del túnel colapsado.**

Estos casos demuestran que el éxito del IPDMT depende de factores como el diseño geotécnico, la caracterización del relave, el monitoreo del agua y la ausencia de estructuras subterráneas activas. Cuando estos aspectos se controlan adecuadamente, el IPDMT puede representar una solución eficaz, segura y sustentable para la disposición de relaves.



## **5. Discusiones**

La técnica de disposición de relaves en el rajo (IPDMT) representa una alternativa emergente frente a las formas tradicionales de almacenamiento, especialmente en un contexto donde la industria minera enfrenta crecientes exigencias ambientales, sociales y regulatorias. Esta sección analiza sus ventajas y desafíos, junto con una comparación con otras tecnologías, como la disposición submarina, y plantea una mirada hacia el futuro de la gestión de relaves.

### **5.1. Ventajas y desafíos técnicos del IPDMT**

Entre los principales beneficios técnicos del IPDMT se destacan:

- Reducción significativa de la huella territorial, al reutilizar pits agotados y evitar la construcción de nuevos tranques de relaves.
- Mejor estabilidad física e hidrológica, gracias al confinamiento natural del pit.
- Reducción de costos de cierre y monitoreo postcierre, al minimizar estructuras críticas como presas.
- Facilidad para implementar un cierre progresivo y controlado, mejorando la trazabilidad ambiental.

### **5.2. Desafíos importantes**

- Realizar estudios geotécnicos e hidrogeológicos detallados.
- Garantizar la ausencia de estructuras subterráneas o mineralización remanente.
- Diseñar planes de llenado y drenaje efectivos.
- Monitorear el comportamiento geoquímico del sistema, especialmente frente a generación de AMD.



### **5.3. Consideraciones socioambientales y percepción pública**

Los eventos recientes de colapso de tranques de relaves en distintas partes del mundo (Ej. Brumadinho y Samarco en Brasil) han generado una crisis de confianza pública hacia las tecnologías tradicionales de almacenamiento superficial. En este contexto, el IPDMT surge como una alternativa que reduce los riesgos visibles, al eliminar estructuras de gran altura cercanas a comunidades, y demuestra una mayor responsabilidad ambiental.

Además, su implementación adecuada puede fortalecer la licencia social para operar, al mostrar una estrategia de cierre basada en principios de economía circular y rehabilitación sostenible.

### **5.4. Comparación con la disposición de relaves submarina**

En algunos contextos geográficos, se ha utilizado la disposición de relaves en el fondo marino (Deep Sea Tailings Disposal, DSTD). Aunque esta técnica permite aislar los relaves de la superficie terrestre, presenta numerosos cuestionamientos:

- Riesgo de dispersión de metales pesados en ecosistemas bentónicos.
- Falta de control geoquímico una vez depositados los relaves.
- Mayor oposición social y ambiental, especialmente en zonas costeras.

Frente a ello, el IPDMT ofrece mejores condiciones de monitoreo, control y cierre progresivo, lo que le otorga una ventaja significativa en términos de sostenibilidad y trazabilidad ambiental.

### **5.5. Gestión del agua, rehabilitación y tendencias futuras**

El éxito de la implementación del IPDMT depende en gran medida de una gestión eficiente del agua, que incluya sistemas de drenaje, recirculación, monitoreo de pozos y control del nivel freático. Asimismo, el uso de técnicas de rehabilitación como coberturas, revegetación y geomembranas es clave para sellar el depósito, minimizar emisiones de polvo y estabilizar químicamente el material.

Concepción, Chile 23 de junio 2025



Hacia el futuro, las tendencias en la gestión de relaves apuntan a:

- Incrementar la valorización de relaves mediante reprocesamiento de metales críticos.
- Aplicar tecnologías de filtrado y disposición en seco en zonas con alta sismicidad o riesgo hídrico.
- Integrar modelos computacionales predictivos para diseño y postcierre.
- Avanzar hacia modelos integrados de economía circular y minería regenerativa.

En este contexto, el IPDMT se posiciona como una solución intermedia y flexible, que combina viabilidad técnica, eficiencia económica y menor impacto social y ambiental, siendo una opción estratégica para operaciones responsables en el siglo XXI.



## 6. Conclusiones

La disposición de relaves en el rajo minero (IPDMT) representa una estrategia segura y sustentable para el cierre de faenas, alineada con los actuales desafíos ambientales, sociales y regulatorios de la industria minera. Este enfoque permite el reprocesamiento de antiguos depósitos para recuperar metales de interés como cobre, cobalto o tierras raras, y su posterior confinamiento en pits agotados bajo condiciones controladas. Esto no solo contribuye a la reducción de pasivos ambientales, sino que también mejora la estabilidad geotécnica del sitio.

Comparado con tecnologías tradicionales como los tranques superficiales o la disposición submarina, el IPDMT ofrece ventajas significativas: mayor estabilidad física e hidrológica gracias a la geometría del rajo, control geoquímico por limitación del oxígeno y drenaje, menor exposición a riesgos públicos y menores costos de cierre, al requerir menos obras de sellado y monitoreo.

Desde el punto de vista ambiental y social, esta solución permite proteger recursos hídricos, evitar la ocupación de nuevas superficies y reducir el impacto visual, mejorando así la percepción pública. Sin embargo, su implementación exige una planificación técnica rigurosa, estudios hidrogeológicos y geotécnicos precisos, así como una gestión activa durante la operación y el post cierre.

En definitiva, el IPDMT, combinado con prácticas modernas de rehabilitación y monitoreo, puede ser una herramienta clave para avanzar hacia una minería más circular, segura y responsable en el largo plazo.



## Bibliografía

Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). *Disposición de relaves en el rajo para un cierre sostenible de minas: Una alternativa responsable para desarrollar soluciones de minería verde a largo plazo*. *Sustainability*, 15(8), 6481. <https://doi.org/10.3390/su15086481>