

Fernando Zevallos Sulca

<sup>1</sup> Fernando Zevallos MAusIMM,  
Fernando.zevallos.s@gmail.com

---

---

---

## RESUMEN

La mayoría de las personas que se han involucrado en minería evidencian el gran nivel de sofisticación y la multidisciplinariedad en los procesos mineros. Actualmente, la tecnología está alcanzando a la ciencia ficción y nos presenta equipos de transporte autónomos o robots que realizan levantamientos topográficos. Sin embargo, existen nuevos retos que esta nueva tecnología debe afrontar como la disminución de impacto ambiental. En particular este trabajo técnico tratara los esfuerzos y dificultades que enfrentan la minería subterránea en descarbonización y gestión de residuos desde un enfoque de estudios de factibilidad o prefactibilidad y algunos ejemplos en operaciones.

El objetivo principal es de dar a conocer como las minas han cambiado su diseño, gestionado los costos asociados a la electrificación y la gestión de residuos mineros. En particular el trabajo técnico abordará las soluciones de infraestructura y del diseño de mina para poder operar con solo equipos eléctricos. Adicionalmente, se expondrá el sobre costo operativo y los beneficios de una mina totalmente eléctrica. Las baterías adicionales, estaciones para cargar las baterías y costo de capacitación o mano de obra especializada son algunos de los costos adicionales. En cuanto a los beneficios, el trabajo técnico abordara la mejora en la calidad de aire, la mayor agilidad en la obtención de licencias y bonos de mineral premium. Por otro lado, este reporte técnico expondrá dos casos de estudios sobre la optimización de residuos mineros tratando de lograr una economía circular, minimizando la generación de residuos y generando by-products en todos los procesos de beneficio y minado.

Los resultados de los casos de estudios demuestran que la tecnología disponible permite planificar una minería verde. Actualmente, existen muchos

acercamientos de las minas en operación hacia la electrificación o la economía circular, sin embargo, incluir esta ingeniería desde los estudios preliminares permite acercarnos más a esos objetivos. Actualmente, las minas en Europa encuentran la electrificación y la reducción de residuos como un requerimiento para la aprobación de las licencias tanto sociales como gubernamentales; además, hay una presión mayor por parte de los inversionistas por una minería verde. Por esta razón es importante que Perú incorpore estas prácticas para estar preparado para la nueva era de la minería subterránea.

## 1. Introducción

Las principales consultoras de mercado especializadas en minería coinciden en que la descarbonización es un riesgo estratégico para el negocio minero. Además, las principales mineras del mundo como BHP, Rio Tinto, Glencore y Newmont se han comprometido a alcanzar el objetivo de cero emisiones netas en el 2050 (Yameogo 2022). Para lograr este objetivo el mismo autor plantea que las empresas mineras deben implementar energías renovables; y electrificación de flota y vehículos de cero emisiones, entre otros puntos que no discutiremos en el presente trabajo de investigación.

Por otro lado, la economía circular ha sido ampliamente promovida en los últimos años como un método responsable con el medio ambiente para producir bienes (ICMM 2016). La reutilización, el reciclaje y la transformación son los pilares de la economía circular. En el caso minero, es altamente recomendable reutilizar el material estéril o desmonte, relaves y cualquier otro material que actualmente es depositado en el medio ambiente. Reduciendo la cantidad de desechos a cero se podría alcanzar la economía circular.

A pesar de que se ha escrito mucho sobre estos riesgos no existen muchas experiencias de las que se puedan tener lecciones aprendidas, el presente trabajo de investigación intenta acercar el conocimiento adquirido de algunos estudios y minas en operación que están intentado lograr el objetivo de cero emisión y economía circular en minas subterráneas.

## 2. Vehículos de cero emisión

### 2.1. Energías renovables

El cambio a las energías renovables es de las alternativas de transición energética más eficiente y rápida (Yameogo 2022). Sin embargo, la disponibilidad de esta dependerá de la ubicación geográfica de las operaciones mineras, en algunos países este tipo de energía es mas disponible que en otros. Según IRENA 2016, solo el 25% de la energía suministrada es América del Sur es de energías renovables. Por esta razón, Los acuerdos de compraventa de energía virtuales (Virtual Power Purchase Agreement, vPPA) son una alternativa para las compañías mineras. Un vPPA es un instrumento puramente financiero que no implica la entrega física de energía del proveedor al cliente, sino que produce certificados de energía renovable. El comprador posee esos certificados, que retira para reducir sus emisiones directas.

La metodología del “Greenhouse Gas Protocol” (WBCSD 2004) propone una medición en niveles o scope de los gases de efecto invernadero (en este caso carbón). Los niveles de emisión se dividen en tres:

- Scope 1: Combustión directa en el sitio
- Scope 2: Combustión realizada por los proveedores. (downstream)
- Scope 3: Combustión realizada en toda la cadena de valor. (upstream and downstream)

Después de la definición, es evidente que el Scope 3 es el más difícil de controlar; sin embargo, cada scope tendrá sus dificultades dependiendo de las características propias de cada operación minera. Por esta razón, tener un plan de acción como el presentado por Angloamerican en la figura 1 es vital para la descarbonización. (Angloamerican 2021)

### 2.2. Vehículos eléctricos para fines

de este paper, dividiremos los vehículos eléctricos en dos según su fuente de energía, vehículos eléctricos a batería (BEV's por sus siglas en inglés) y vehículos eléctricos con conexión continua. Global Mining Guidelines (MGM 2022) sostiene que el sistema de transporte de mineral/desmante es el que se ve más afectado cuando se migra de equipos diesel a eléctricos. Por este motivo, se deben analizar ambas alternativas o utilizar una combinación de las mismas para obtener los resultados buscados. Esto quiere decir que un sistema de transporte con conexión eléctrica continua como las fajas transportadoras o líneas trolley; y BEV's. A continuación, revisaremos las consideraciones que se deben tener en cuenta en el diseño de minas y algunas lecciones aprendidas de experiencias operacionales.

#### 2.2.1. Diseño de minas subterráneas para equipos eléctricos a batería (BEV's)

La disposición de la infraestructura, *layout*, a lo largo de la vida de la mina es de vital importancia para diseñar una mina subterránea con BEV's. El *layout* propuesto deberá satisfacer los requerimientos de los BEV's. Clasificaremos estos requerimientos según el tipo de carga de la batería: carga montada y carga desmontada. La primera quiere decir que la carga se realizará cuando la batería está cargado en el equipo. Por otro lado, el otro tipo de BEV's necesitará desmontar la batería para poder realizar la carga.

Ambos equipos necesitaran en común la siguiente infraestructura:

- Estaciones de recarga eléctrica
- Numero de baterías
- Chimeneas de traspase de mineral

Es importante determinar la distancia óptima entre las estaciones de recarga que permita una óptima utilización de la carga de las baterías y reduzca la

cantidad de baterías en carga/recarga. Esta distancia entre estaciones de recarga

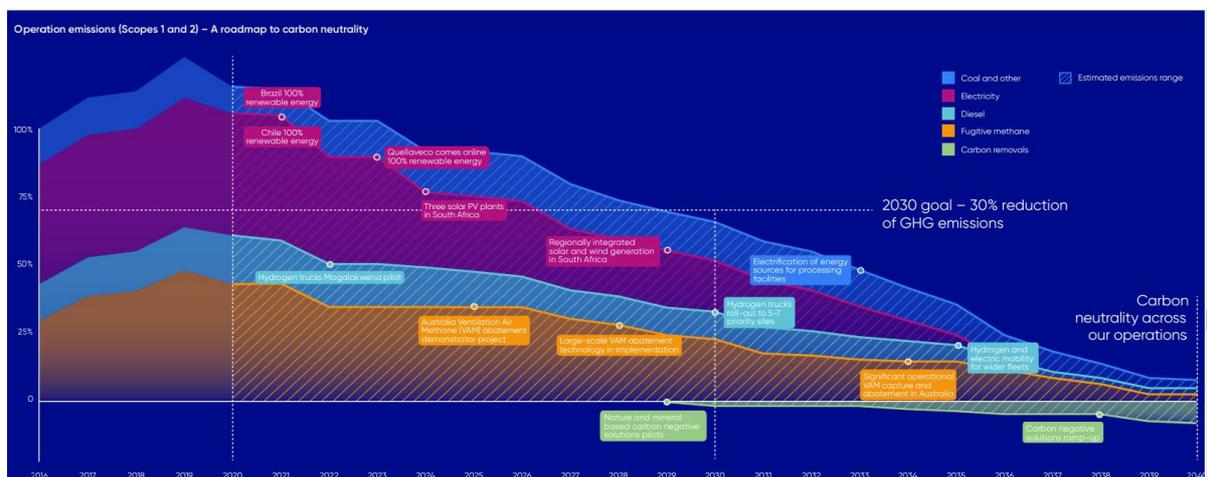


Figura 01: Plan de trabajo de Angloamerican para la descarbonización

dependerá de tres factores determinantes: eficiencia de la batería, pendiente de la ruta de transporte y longitud. En esta tarea es mejor realizar un modelo matemático que modele todas las actividades involucradas en el traslado de material. Tiempos de espera relacionados al tráfico de camiones, tiempos de espera operativos relacionado al carguío de los camiones, recarga de baterías de los equipos de carguío y transporte. Kautzman (2022) presenta una simulación de la duración de la batería realizada en el software arena, en la cual se puede modelar el comportamiento y necesidad de las baterías dependiendo de la ubicación de las estaciones de recarga (los puntos de carga y descarga se mantienen fijos en las distintas simulaciones). La figura 2 muestra una imagen congelada de la simulación en la que se muestra el nivel de carga de las baterías a través del tiempo.

Además de lo expuesto en el párrafo anterior se tienen que tener en cuenta que no es conveniente para los BEV's realizar pendientes positivas cargados de material. Esos tramos requieren una mayor necesidad de batería y por ende más cantidad de estaciones de carguío y número de baterías. Es por esto que a continuación se discutirá las opciones de equipos de conexión eléctrica continua.

### minas subterráneas para equipos eléctricos de conexión continua

La infraestructura de una mina eléctrica debe considerar el uso de las siguientes tecnologías con el objetivo de ser más eficientes:

- Líneas trolley para equipos sin rieles en las rampas principales.
- Sistemas de transporte de fajas para aprovechar el transporte gravitacional mediante *sistemas de "ore pass"*
- Implementación de trenes para el transporte masivo de materiales

Existen muchas más alternativas de transporte de materiales y cada operación debe ser evaluada caso a caso para determinar una opción óptima. Sin embargo, en este trabajo de investigación nos enfocaremos en el caso de Nussir.

En el caso de Nussir, se ha diseñado una faja de transporte en el nivel inferior para que una faja transportadora pueda recibir todo el material de los niveles inferiores y a través de una cámara de transferencia, transportar el material a través de la rampa principal hasta la superficie. Esto reduce el costo operativo de la mina y también el capital en camiones eléctricos y baterías ya que la mina es 100% eléctrica.

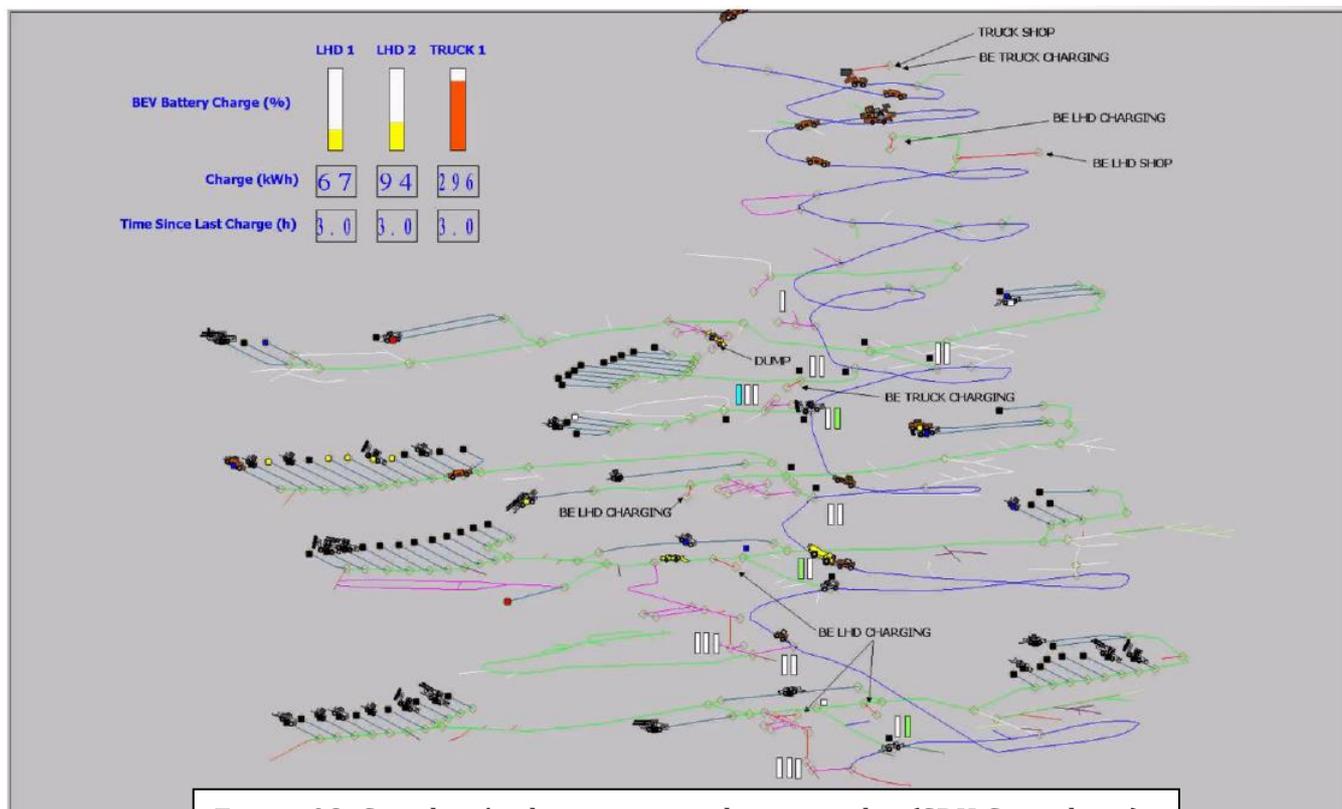


Figura 02: Simulación de transporte de materiales (SRK Consulting)

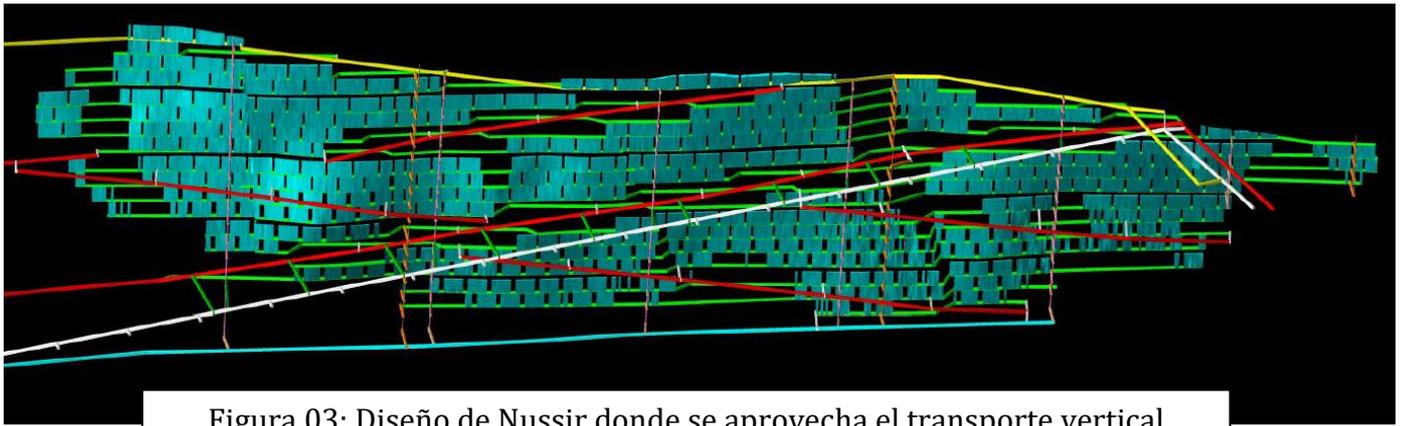


Figura 03: Diseño de Nussir donde se aprovecha el transporte vertical

### 3. Reutilización de desechos mineros

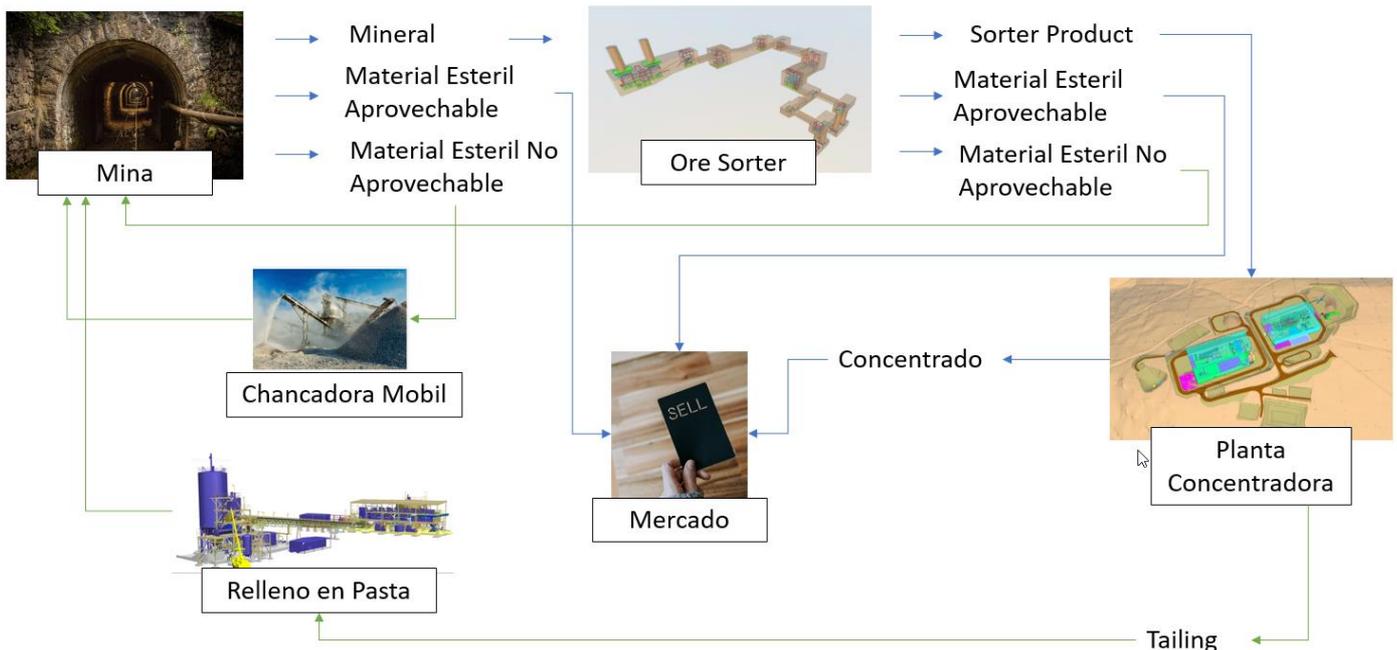
La minería tiene una deuda pendiente con el medio ambiente, puesto que todo el material dispuesto en la superficie, lo cual es dañino para el medio ambiente y costoso porque debe ser remediado. Por esta razón el concepto de economía circular está siendo ampliamente difundido para que las empresas mineras lo puedan utilizar. Según el ICMM en su reporte del 2016 existe una gran oportunidad de reaprovechamiento de materiales en los proyectos mineros. A continuación, esta investigación expondrá un escenario ficticio en la cual todo el material es transformado para poder reducir el deshecho y devolver todo el deshecho generado a cavernas dentro de la mina subterránea. El diagrama 01 ejemplifica el flujo de materiales para lograr una economía circular.

La tecnología de ore sorter, la cual puede realizar una pre-concentración es importante puesto que reduce la

cantidad de material que ingresa a la planta concentradora y en consecuencia reduce la cantidad de relave o *tailings* que se puedan generar en la planta concentradora. Es importante clasificar el material estéril entre aprovechable en la industria de la construcción como agregado u otro y el no aprovechable que debe ser utilizado como material de relleno en los tajos en conjunto con la planta de pastefill que reaprovechara los relaves creando así un círculo que permita la cero disposición de materiales en superficie.

Para la siguiente ejemplificación se ha considerado que un 60% del desmonte es separado por el Ore Sorter, la planta produce un 57% de relaves en peso, la planta de relleno necesita 6% de cemento en peso y que el 35% del material dentro de la mina es no aprovechable.

Diagrama 01: Flujo de Materiales en una mina con economía circular



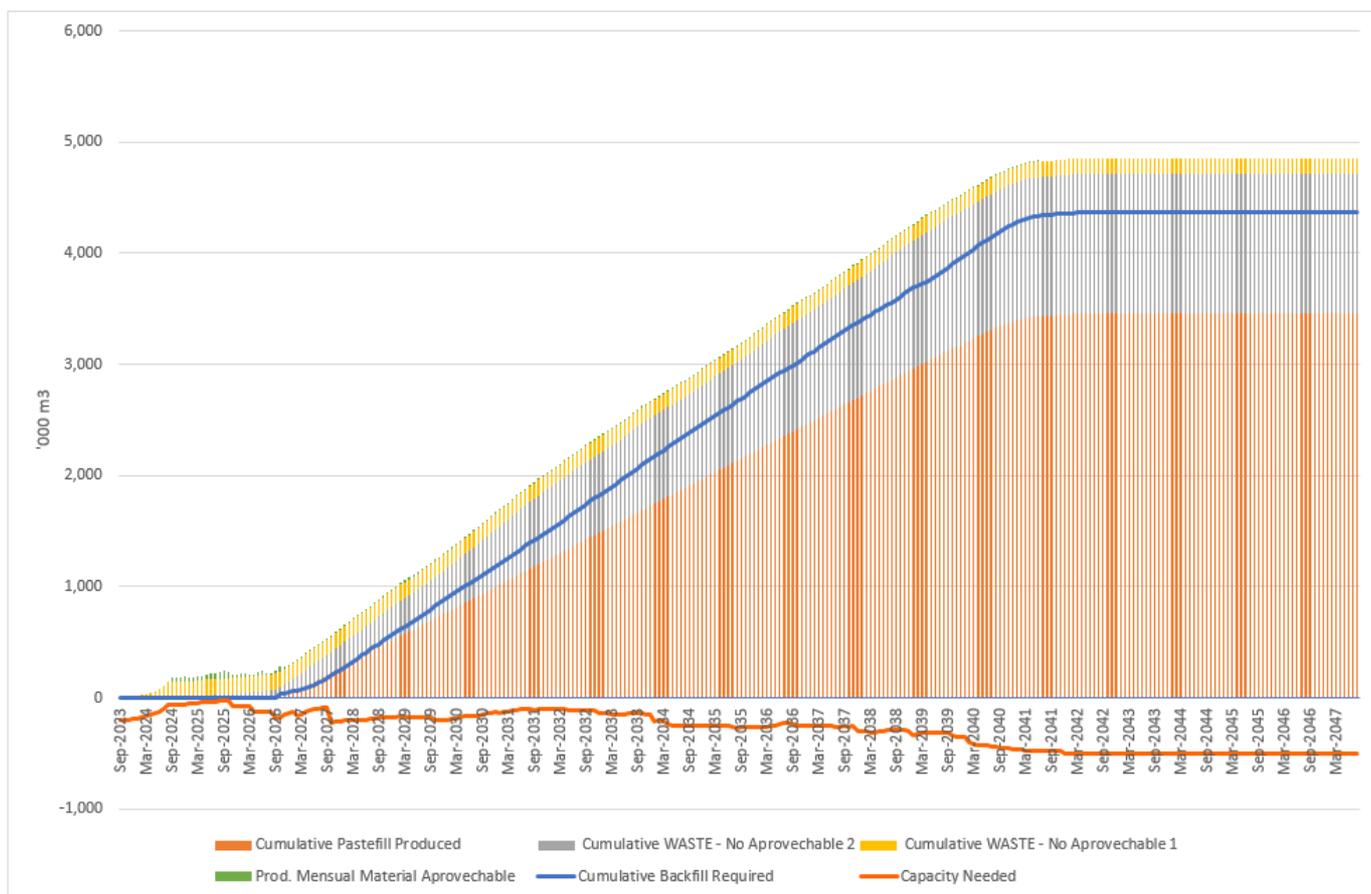


Debido a la presencia de material antes de la producción de tajos, se necesita un espacio de 150,000 m<sup>3</sup> que permita almacenar temporalmente (aproximadamente 4 años) todo el material no aprovechable del desarrollo de la infraestructura. Además se han generado 300,000 m<sup>3</sup> de vacío en material aprovechable para poder guardar material no aprovechable, estos tajos en desmonte reemplazarían a un depósito de material estéril o desmontera con una inversión menor y ambientalmente amigable. En base a todos estos supuestos, el grafico 01 registra el balance de materiales a través de la vida de la mina, como se muestra luego de que empieza la producción de los tajos, todo el material generado puede ser almacenado dentro de la mina. En conclusión, se ha demostrado que los materiales pueden ser parte de una economía circular.

#### 4. Conclusiones

La descarbonización no es un proceso del futuro y la tecnología eléctrica ya está disponible para su implementación, sin embargo, este cambio debe tener algunas consideraciones puesto que los BEV's tienen sus propias características y restricciones. Además, el transporte de materiales debe ser analizado desde una perspectiva holística y se deben analizar distintas alternativas para encontrar un óptimo. Por último, es recomendable generar una economía circular en las empresas mineras para reducir el impacto en el medio ambiente y generar metales más limpios que nos ayuden a lograr el objetivo de la descarbonización y una minería más verde.

Diagrama 01: Flujo de Materiales en una mina con economía circular



## Referencias

- Yameogo, Theo. 2022. "Desafíos ESG que enfrentan las empresas de minería y metales". EY Report .
- ICMM. 2016. "Mining and metals and the circular economy"
- Pearce, David. 2022. "Decarbonisation Developing practical road maps to support corporate initiatives". SRK Consulting Russia.
- IRENA. 2016. "Renewable Energy Market Analysis Latin America".
- WBCSD.2004."A Corporate Accounting and Reporting Standard". The Greenhouse Gas Protocol
- Angloamerican. 2021. "climate-change-report-2021"
- MGM. 2022 Version 3. "Recommended Practices for Battery Electric Vehicles in Underground Mining"
- Kautzman, Sean and Poxleitner, Gary.2022. "Planning and Operating Strategies for BEVs: It's Not Simply 'Plug 'n' Play'". SRK Consulting Canada.
- Nussir. 2022. "Nussir ASA: The path to zero-emission mining". Presentation at Mine electric Conference

### Perfil profesional

Fernando es ingeniero de minas y cuenta con más de 8 años de experiencia entre operaciones mineras y consultoría internacional en minería. Actualmente desempeña como consultor senior para SRK reino unido. Su experiencia incluye minas polimetálicas y de metales preciosos en minería subterránea en America Latina y Europa. Ha realizado consultoría en procesos de planificación, cálculo de reservas, due dilligence y análisis de mercado. Es bachiller en ingeniería de minas por la pontificia universidad católica del Peru, con estudios en Colorado School of Mines y candidato a la maestría en economía por la Pontificia Universidad de católica del Peru

Nombre del autor: Fernando Zevallos Sulca MAusIMM

Cargo: Senior Consultant

Empresa: SRK Consulting (UK) Limited

Correo electrónico: Fernando.zevallos.s@gmail.com

Teléfono / Celular: +44 (0) 2920-348 150/+44  
7454353521

Dirección 128 Kings Road, CF11 9DG, Cardiff, Reino  
Unido