

# Sistemas de alta productividad para transporte de materiales en minería a cielo abierto en Chile y desarrollo sustentable<sup>1</sup>

*Roberto Carlos Pastén Jeraldo*<sup>2</sup>  
*Ligia Nathalie García Lobo*<sup>3</sup>

Recibido: 14/07/2017

Aceptado: 25/10/2017

## RESUMEN

El objetivo de este trabajo fue diseñar un Sistema de Alta Productividad para el transporte de materiales en minas de explotación a rajo abierto operadas por Codelco-Chile, determinando la factibilidad de incorporar tecnologías disponibles y en desarrollo. Se analizaron tres alternativas (camiones fuera de carretera; sistema *In Pit Crushing and Conveying-IPCC* y *High Angle Conveying-HAC*). Con este fin se construyó un *roadmap* tecnológico, simulando la producción de estas tres alternativas frente a un Caso base (ingeniería básica 100+100) y considerando el rol que puede desempeñar la minería del cobre—a través de la innovación tecnológica— en el desarrollo sustentable de Chile. Los resultados

---

<sup>1</sup> El autor agradece el apoyo institucional por parte de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) para llevar a cabo el estudio base que dio origen al presente artículo. No obstante, es menester aclarar que todos los productos derivados del mismo (incluido este artículo y la ingeniería básica del Proyecto Radomiro Tomic-Fase II basada en dicho estudio y el diseño del sistema HAC), son propiedad intelectual (Copyright) de Codelco.

<sup>2</sup> Ingeniero Civil en Minas (Universidad de Atacama, Chile); Diplomado en Planificación Minera Largo Plazo-Ingeniería de Minas y Minerales (Universidad de Chile); Master of Business Administration (Universidad Adolfo Ibáñez, Chile); M.Sc. en Ingeniería de Minas y Materiales (Universidad de Chile); Doctorando del Programa de Doctorado en Proyectos con Especialidad en Investigación de la Universidad Internacional Iberoamericana-UNINI (sede México). Gerente de Minas (Rajo y Subterránea) de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco-Chile). Teléfono: +56 9 9741 6518; e-mail: jeraldo.pasten@gmail.com.

<sup>3</sup> Economista (Universidad de Los Andes-ULA, Venezuela); M.Sc. en Desarrollo Agrario (ULA, Venezuela); Doctorada en Ciencias Humanas (Universidad del Zulia-LUZ, Venezuela). Profesora titular e investigadora de la Facultad de Ciencias Económicas y Sociales de la Universidad de Los Andes (FACES-ULA), adscrita al Centro de Investigaciones Agroalimentarias «Edgar Abreu Olivo» (CIAAL-EAO, FACES-ULA, Venezuela). Teléfono: +58 274 2401031. Fax: +58 274 2403855; e-

revelaron que los costos de operación de los sistemas IPCC y HAC resultaron menores a las restantes alternativas.

**Palabras clave:** cobre, Codelco-Chile, costos operativos, desarrollo sustentable, rentabilidad, rajo abierto, Radomiro Tomic, sistema de transporte de materiales en alta pendiente.

## **Designing high productivity systems for transporting materials in open pit mining: a sustainable development alternative**

### **ABSTRACT**

This article aimed to design a High Productivity System for material hauling in open-pit mines operated by Codelco-Chile, by determining the feasibility of incorporating both available and developing technologies. To this end, three of them were analyzed: off-road extraction trucks, In-Pit Crushing and Conveying System (IPCC) and High Angle Conveying (HAC), through the construction of a technology roadmap and simulating the production of such alternatives against a base case (basic engineering 100 + 100). Finally, the role that copper mining sector could play (through technological innovation) in the sustainable development of Chile was also examined. Mains results revealed that operating costs of IPCC and HAC systems were lower than the rest of alternatives.

**Key words:** Copper, Codelco-Chile, High Angle Conveying systems, open pit, operating costs, profitability, Radomiro Tomic, sustainable development.

### **Introducción**

Las inversiones realizadas en minería –especialmente durante la década de 1990– explican una parte importante del crecimiento económico de Chile, que a su vez se tradujo en un aumento significativo

tanto en la producción como en la exportación de metales<sup>4</sup>. No obstante, la productividad de la minería –en particular, la que se realiza a rajo o cielo abierto (*open pit*)<sup>5</sup>–ha experimentado un significativo deterioro en años recientes. Esto se debe a que las leyes<sup>6</sup> son cada vez menores, al tiempo que aumentan las distancias de acarreo, dado que los rajos en operación se hacen cada vez más profundos. Esto, obviamente, se traduce en mayores costos operativos<sup>7</sup>. Además, los rajos abiertos están sujetos a la alta variabilidad del precio del cobre en los mercados internacionales. Así, por tratarse de un *commodity*, se trata de un bien que efectivamente tiene «valor» o utilidad pero también un muy bajo nivel de diferenciación o especialización.

De otro lado, tanto el desarrollo presente como de los proyectos futuros en el sector dependen significativamente de las innovaciones que potencien la rentabilidad de la actividad a lo largo del tiempo. Tales innovaciones están generalmente relacionadas con la tecnología, en la que muchas empresas –públicas y privadas– se orientan al desarrollo de sistemas inteligentes para ser utilizados en todas las fases del proceso, desde la extracción de los minerales o la elaboración de cátodos. De esta forma, el futuro de la minería estará marcado, entre otros, por el uso de maquinaria automatizada, controlada remotamente; el análisis predictivo e integración de datos (minas conectadas a sistemas digitales, para a través del análisis de los datos prever vulnerabilidades, peligros, mejoras en la maquinaria y otros aspectos); el uso de prendas tecnológicas modificadas, para mejorar el clima laboral y bienestar de los trabajadores; la incorporación de la realidad aumentada (virtual/simuladores) en la capacitación, dada la incorporación de maquinaria y sistemas más innovadores; y por la automatización minera –objetivo final de las innovaciones, para contar con equipos autónomos–, que permitirá reducir la variabilidad, los

---

<sup>4</sup> Leturia, Francisco Javier y Merino, Álvaro. «Tributación y minería en Chile: antecedentes para un debate informado», *Estudios Públicos*, no. 95, 2004, pp. 193-235.

<sup>5</sup> Consiste en la explotación de minas en la superficie, empleando para ello una línea de explosivos. Luego de la tronadura –que remueve el material mineralizado – se realiza el carguío de materiales en camiones o en cintas transportadoras, empleando para ello cargadores frontales o palas mecánicas, que lo llevan hasta la Planta de Chancado para iniciar el proceso de concentración. Es el método de explotación más utilizado en la explotación de yacimientos de metales básicos y preciosos.

<sup>6</sup> En inglés *ore grade*, se refiere a la concentración de minerales específicos (e.g., oro, plata, cobre, estaño) presente en las rocas y en el material mineralizado de un yacimiento. Según Donoso (2013), en el caso del cobre ese porcentaje o valor es variable; así, e.g., una ley del 1,2% significa que por cada tonelada métrica de mineral hay 12 kilos de cobre fino.

<sup>7</sup> Asociación de Proveedores Industriales de la Minería, APRIMIN. *Informe de productividad Aprimin-Resultados preliminares*, Santiago de Chile, APRIMIN, 2016.

costos operativos, los accidentes en entornos peligrosos, entre otros aspectos<sup>8</sup>.

Durante las últimas seis décadas, la minería del cobre en Chile transformó sustancialmente su escala productiva, al pasar de 528 mil toneladas durante el período 1950-1970, a 1,12 millones de toneladas en el período 1970-1990 (luego de la nacionalización del cobre), hasta alcanzar las 4,28 millones de t en el período 1990-2015. Es también la actividad económica con mayor peso en las exportaciones del país. Durante el período 1960-2015 promedió el 52% del total exportado, ubicándose siempre por encima de 1/3 del valor total exportado (que promedió US\$ 1.359 millones durante el período 1960-1990)<sup>9</sup>. Cifras más recientes<sup>10</sup> dan cuenta que la producción a través de la estatal Codelco –propia, aunada a la de su participación en Anglo American Sur y El Abra– fue de casi 1,3 millón de toneladas durante el III trimestre de 2018, convirtiéndola en la primera productora mundial de cobre. Adicionalmente, la minería constituye una importante fuente de ingresos para el fisco nacional: de un aporte promedio del 5,9% durante el período 1994-2003, pasó casi a triplicarse en el 2004-2014 (con una media anual del 19,6%), aportando en valores absolutos US\$ 96.017 millones<sup>11</sup>.

De acuerdo con el Servicio de Impuestos Internos de Chile<sup>12</sup>, las cifras más recientes dan cuenta de un total de 1.280 empresas que laboran y tributan en la actividad de «Extracción de minerales metalíferos» –cobre–, con unas ventas que ascienden a 301.634.627,33 Unidades de Fomento (UF, equivalentes a unos 7,95 billones de pesos chilenos; *i.e.*, 11.912,20 millones de US\$ al 31/12/2016). Esto es posible gracias al gran peso que tienen las exportaciones chilenas de cobre en el total. Estas promediaron los US\$ 33.518 millones entre 2004 y 2014, muy por encima de la media registrada en los años precedentes (*i.e.*, US\$ 2.628 millones), al tiempo que el peso relativo de Chile en las reservas mundiales del mineral se han mantenido durante el mismo período en alrededor del 29,90%<sup>13</sup>. Así,

<sup>8</sup> ESAN, Graduate School of Business-Perú ¿Qué innovaciones impactarían en el futuro del sector minero?, Lima, ESAN, 2018.

<sup>9</sup> Comisión Nacional de Productividad. Productividad en la gran minería *del cobre*. Santiago de Chile, Comisión Nacional de Productividad, 2017. República de Chile-Ministerio de Minería, MinMineía. *Historia de la minería en Chile*, Santiago de Chile, Minminería, 2018.

<sup>10</sup> Minería Chilena. *Codelco genera US\$1.418 millones en excedentes al tercer trimestre*, 29 de noviembre de 2018. República de Chile-Ministerio de Minería, MinMinería, *op. cit.*

<sup>11</sup> Comisión Nacional de Productividad, *op. cit.*

<sup>12</sup> Servicio de Impuestos Internos-Chile, SII. *Estadísticas de empresas por rubro, subrubro y actividad económica*, Santiago de Chile, SII, 2016.

<sup>13</sup> United States Geological Service, USGS. *Mineral commodity summaries*, Washington, USGS, 2018.

la actividad minera del cobre representa el 55% de las exportaciones (y de las divisas generadas) por el país, siendo la segunda fuente más importante en cantidad de ingresos del Fisco y más del 10% de su Producto Interno Bruto-PIB<sup>14</sup>. Chile es, por tanto, un ejemplo de países con economías basadas en recursos naturales que han registrado un crecimiento económico significativo, sobre todo gracias al auge de sus exportaciones<sup>15</sup>.

En el sector público son dos las empresas que participan en la actividad minera del cobre en Chile: la Empresa Nacional de Minería, ENAMI<sup>16</sup>; y la Corporación del Cobre de Chile (Codelco), esta última resultante de una fusión ocurrida tras la promulgación del Decreto Ley N° 1.350 del 1 de abril de 1976<sup>17</sup>. Codelco-Chile es un consorcio que cuenta con 7 divisiones productivas, Codelco conforma una red de 46 empresas y sociedades, en las que participa como socio mayoritario o minoritario. Tiene operaciones que datan desde hace más de 100 años (e.g., los yacimientos de Chuquicamata y Teniente) y posee además 7 rajos, los cuales han agotado ya sus reservas en superficie<sup>18</sup>.

No obstante los datos alentadores de largo plazo en cuanto a la minería chilena, durante el III trimestre de 2018 Codelco registró una disminución de 56.000 toneladas en la producción de cobre fino, debido a una caída de un 5% en la ley de mineral, con respecto al mismo período de 2016, así como al impacto negativo del mayor precio de los insumos (e.g., energía, petróleo y compra de ácido sulfúrico para algunos procesos)<sup>19</sup>. De hecho, sus costos directos en el año 2017 alcanzaron 135,90 c/lb, cifra que es 8% mayor que la registrada en 2016 (de 126,1 c/lb), principalmente debido a la disminución del tipo de cambio y al mayor precio de los insumos<sup>20</sup>.

---

<sup>14</sup> Comisión Chilena del Cobre, Cochilco. *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1995-2014*, Santiago de Chile, Cochilco, 2015.

<sup>15</sup> Rehner, Johannes y Vergara, Felipe. «Efectos recientes de la actividad exportadora sobre la reestructuración económica urbana en Chile», *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 59, 2014, pp. 83-103.

<sup>16</sup> República de Chile-Ministerio de Hacienda. República de Chile-Ministerio de Hacienda. *Decreto con fuerza de ley [por el que se] crea la Empresa Nacional de Minería*, 29 de febrero de 1960.

<sup>17</sup> República de Chile-Ministerio de Minería. *Decreto con fuerza de ley [por el que se] crea la Corporación Nacional del Cobre de Chile*, 28 de febrero de 1976.

<sup>18</sup> Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Plan de negocio y desarrollo. Edición 2016*, Santiago de Chile, Codelco, 2016. Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Memoria anual 2017*, Santiago de Chile, Codelco, 2018.

<sup>19</sup> Minería Chilena, op. cit.

<sup>20</sup> Codelco, 2018, op. cit.

Otro aspecto adicional a considerar es que el sector minero – particularmente, del cobre–ha sido y seguirá siendo clave para mejorar las condiciones de vida y el bienestar de las personas, como parte de los procesos de desarrollo económico. Países exportadores (e.g., Chile, Perú, Canadá, Australia, EE.UU., Suecia, Finlandia y Nueva Zelanda, entre otros) han demostrado que se puede crecer a partir de la explotación de sus riquezas mineras. Además, por su importancia estratégica, la gran magnitud de las inversiones realizadas y la creciente cuantía de proyectos en torno a ella, la minería demanda la realización de estudios para la que las empresas involucradas puedan mejorar permanentemente sus sistemas productivos, comerciales y de financiamiento, para el adecuado equilibrio entre los aspectos coyunturales y estructurales de la actividad<sup>21</sup>.

Por tanto, el escenario descrito pone en relieve la importancia de la minería en Chile, tanto como motor del crecimiento económico y sus encadenamientos, como por los efectos sobre el bienestar social de la población (directa o indirectamente, vía fiscal); esto es, del desarrollo humano. No obstante, la declinación en la productividad – concomitantemente con el aumento de los costos operativos de las empresas, en particular de las estatales–, también evidencia la necesidad de promover la generación y adopción de nuevas tecnologías para el transporte de materiales que favorezcan la explotación de minas a rajo, como mecanismo para la reducción de sus costos, aumento de su productividad y sostenibilidad financiera<sup>22</sup>. Sin embargo, materializar estas necesidades supone un desafío científico y tecnológico para la sociedad minera actual<sup>23</sup> pues implica el desarrollo de procesos de innovación y desarrollo tecnológico<sup>24</sup>.

No obstante, la innovación –y de modo particular la cultura de la innovación– se halla en un proceso emergente, dado que debe enfrentar una serie de cambios sociales y ambientales del entorno, nue-

---

<sup>21</sup> Donoso Muñoz, Manuel J. (2013). «El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras», *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 21, no. 2, pp. 248-261.

<sup>22</sup> Ejemplo de ello ha sido el empuje registrado en la búsqueda de alternativas para la eliminación de desechos mineros, como parte de esta necesidad de mejorar los costos operacionales..

<sup>23</sup> Bravo-Ortega, Claudio y Muñoz, Leonardo. *Knowledge intensive mining services in Chile: Challenges and opportunities for future development*, Washington, Inter-American Development Bank, IADB Discussion Paper no.IDB DP 418, 2015.

<sup>24</sup> Centro de Estudios del Cobre y la Minería-CESCO y Fundación Chile. Proveedores y minería: desafíos para potenciar la innovación de alto impacto, Santiago de Chile, CESCO-Fundación Chile, 2013.

vas exigencias de los mercados, la búsqueda de maximización de la productividad y la sustentabilidad de las empresas. En particular, al hablar de cultura de innovación y de sustentabilidad, el recurso humano –directivos, empleados– constituye uno de los elementos fundamentales. Todo esto implica, la adopción de mejoras en las estrategias competitivas de las empresas, como la vía para posicionarse y subsistir en el mercado<sup>25</sup>. En esta línea, en parte también debido a las presiones externas (e.g., Protocolo de Kyoto, Cumbre de París, Agenda 2030), se pone en relieve la necesidad de dar cumplimiento a mayores exigencias ambientales, particularmente en la actividad minera. En el caso de estudio se materializa en lograr, a través de la alternativa tecnológica seleccionada, la eficiencia energética y la operación de la mina en condiciones de menor impacto medioambiental.

Adicionalmente, debido a la elevada volatilidad en los precios de materias primas –en especial, el cobre en los mercados internacionales de materias primas<sup>26</sup>, la generación de nuevos proyectos resulta cada vez más difícil debido a que demandan una alta inversión de capitales (*Capital Expenditure*, CapEx). Por tanto, para que un proyecto realmente pueda ser rentable y sustentable –además de considerar criterios relacionados con impacto ambiental, características y condiciones de la zona–, se deben aprovechar las instalaciones existentes, enfocándose tanto en la reducción de los costos de operación como de las inversiones requeridas para su desarrollo. Para la sociedad minera –y en especial para Codelco, principal empresa del Estado de Chile en el sector–, resulta de interés emprender acciones que permitan emplear nuevas tecnologías que permitan reducir los costos de operación de los rajes (*Operating expense*, OpEx), en especial el cobre. De hecho, estos pueden llegar a representar entre 60 y 70% del costo mina, por lo que su adecuado manejo es clave para la rentabilidad y sostenibilidad del negocio<sup>27</sup>.

<sup>25</sup> Arancibia Carvaja, Sara; Donoso Pérez, Macarena; Venegas Cabello, Ricardo y Cárdenas Espinosa, Cristina. «Identificación de factores clave en la cultura de innovación. El caso de la mediana minería en Chile», *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 132-145.

<sup>26</sup> Anglo American PLC. *Annual Report 2014*, London, Anglo American PL, 2015; Economipedia. *Noticias de economía, finanzas y educación financiera*, Santiago de Chile, 2015.

<sup>27</sup> En la rentabilidad de cualquier negocio es clave el manejo de los riesgos. En la minería del cobre –como sucede en otras similares– hay una presencia permanente de ingentes factores de riesgo, que obligan a las empresas a su adecuada gestión para prevenir sus impactos negativos en los resultados económicos. Los más relevantes son: i) los de unidad estratégica de negocio (i.e., asumidos por la empresa para obtener una ventaja competitiva y crear valor sostenido para los accionistas; ii) y financieros (i.e., que aparecen en los mercados financieros y se traducen, generalmente, en importantes pérdidas de capital; los más importantes son los operacionales, de liquidez, legal, de crédito, de mercado, del proyecto minero y de la naturaleza)

Con base en estas consideraciones, se diseñó y realizó un estudio dirigido a evaluar la factibilidad de incorporar tecnologías que permitan llevar los rajos actuales a una mayor vida útil, dado su agotamiento de leyes y altas distancias de acarreo, sin tener que invertir en nuevos proyectos. El ámbito de estudio se focalizó en el caso de los rajos y, de manera especial, en el denominado Radomiro Tomic (DRT) de la división Codelco-Chile. El estudio estuvo orientado a determinar la factibilidad de incorporar tecnologías en el diseño minero de rajos, siendo el desafío y objetivo de este análisis hacerlo para aquellos que se encuentran en operación en Codelco-Chile. Debido al envejecimiento de los yacimientos y a la disminución de la ley del mineral<sup>28</sup>, si no se realizan importantes inversiones en un plazo perentorio podría registrarse una caída en la producción (de los 6 millones de t, a 4 para el 2025). En consecuencia, la explotación rentable del potencial cuprífero de Chile depende básicamente de la diferencia entre el precio del cobre y sus costos de producción. Como el primero es una variable exógena, el énfasis del estudio estuvo en la búsqueda de alternativas tecnológicas para reducir los segundos.

## 1. Materiales y métodos

El estudio se basó en el examen de las tecnologías aplicadas para el transporte de materiales en la explotación de minas de cobre a cielo/rajo abierto por parte de Codelco en Chile. Con este fin se realizó un *roadmap* tecnológico<sup>29</sup> de las operaciones realizadas por la corporación, identificándose así cinco grupos de ellas: i) pre-corte, para lograr una pared estable de acuerdo con un diseño que minimiza

---

<sup>28</sup> Debido al deterioro de la calidad del recurso geológico –en particular, la disminución de las leyes de cobre– en los actuales yacimientos, se ha reducido la productividad y se ha estancado el proceso de extracción del mineral. Ello tendrá implicaciones a futuro para las empresas participantes, pues se focalizarán aún más en las actividades de extracción de concentrados –a pesar de que estas últimas han sido objeto de cuestionamientos y sujetas a normas restrictivas en los mercados internacionales–. Adicionalmente, provocará un aumento de los costos laborales, electricidad y –especialmente–, de recursos hídricos. Concluido el ciclo actual, las metas de las empresas mineras ya no son elevar la producción, sino mantener sus capacidades productivas (Silva Flores, Consuelo y Lara Cortés, Claudio. «¿El fin del superciclo del cobre y de las reformas sociales en Chile?» *Textos & Contextos (Porto Alegre)*, vol. 16, no. 2, 2017, pp. 479-494).

<sup>29</sup> Australian Minerals Industry Association. *Copper technology roadmap 2004*, Melbourne, Amira International Ltd., 2004. Australian Minerals Industry Association. *Copper technology roadmap 2006. A strategic overview*, Melbourne, Amira International Ltd, 2006. Ilns, John y Pincock, Layne. *Technology development roadmaps – A systematic approach to maturing needed technologies*, Idaho, Idaho National Laboratory, 2010.



el daño en los taludes; ii) arranque que consiste en la perforación y tronadura para fragmentar los materiales (mineral/lastre), minimizando el daño y el uso de energía mina-planta; iii) manejo de materiales aplicando los criterios carguío y transporte/alta productividad y mínimo costo); iv) operaciones de apoyo que resultan invisibles para el proceso productivo, son automatizadas y se basan en procesos predictivos para evitar v) los eventos no deseados: cero o mínima ocurrencia.

A tal fin se aplicaron los lineamientos del método cuantitativo<sup>30</sup> para la cuantificación de las variables relacionadas con el manejo/acarreo de materiales, específicamente en lo referido al transporte. La población estuvo representada por los rajos mineros con profundidad mayor a 300 metros, cuyo crecimiento futuro se encuentra sobre los 450 metros de profundidad. Actualmente (año 2018), en Chile ese universo corresponde a nueve rajos mineros en operación, de los cuales al menos cinco son operados por Codelco<sup>31</sup>. Sobre esta base se seleccionó como muestra intencionada a los rajos mineros que cumplieran con la condición de que estuvieran siendo operados por Codelco-Chile y/u operadores internacionales/privados.

Como instrumento de investigación se construyó un *roadmap* o ruta tecnológica *ad hoc*, focalizado en: i) sistemas autónomos para transporte de materiales (camiones autónomos); ii) sistemas de transporte de minerales con chancadoras interior mina; iii) sistemas de transporte con electricidad (para motores de camiones), *trolley*; y, iv) sistemas de transporte a través de correas transportadoras, *overland*. La misma se aplicó para el estudio técnico de la productividad en uno de los rajos de la Corporación del Cobre de Chile, a saber, la División Radomiro Tomic, analizando los costos de operación con énfasis en el *transporte de materiales*. Los datos recopilados se analizaron mediante diversas técnicas estadísticas, *software* (Vulcan-Medsistem-Jigsaw, Statgraphics y MS-Excel) y de *benchmarking*.

Para esta última fase se consideraron como referentes a las siguientes empresas: i) la Comisión Chilena del Cobre y Comisión de Productividad del Estado de Chile (Cochilco), para el análisis de la productividad de la Gran Minería del Cobre (que representa aproximadamente 75% producción nacional). En este caso se compararon 12 faenas de esta última, con 7 faenas correspondientes a las mejores

---

<sup>30</sup> Hernández Sampieri, Roberto; Fernández-Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. *Metodología de la investigación*, 4a. ed., México, McGraw Hill, 2006.

<sup>31</sup> Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Plan de negocio y desarrollo. Edición 2016*, Santiago de Chile, Codelco, 2016. Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Memoria anual 2017*, Santiago de Chile, Codelco, 2018.

prácticas encontradas en Australia, Canadá, EE.UU. y Perú; ii) Minelens-McKinsey (con capital de origen estadounidense y que opera al nivel mundial; y, iii) Encare, para determinar los KPI (acrónimo inglés de *Key Performance Indicator*, i.e., los indicadores clave o medidores de desempeño o rendimiento de un proceso determinado) de la industria nacional e internacional.

## 2. La actividad minera y su vinculación con el desarrollo sostenible

El «desarrollo sostenible» es, en líneas generales, un ideal que aspiran alcanzar las distintas naciones para mejorar el bienestar de la población. Se ha concebido como un proceso multidimensional que abarca la articulación de aspectos de carácter económico, social, político, institucional, cultural y ambiental.. Tiene su origen en la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, conocida también como Cumbre de la Tierra y Conferencia de Estocolmo (en Suecia, 1972) en la cual se discutió la problemática medioambiental del desarrollo al nivel global. Allí se formularon veintiséis (26) principios que destacan lo ambiental como parte del desarrollo<sup>32</sup>.

Posteriormente, el *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*<sup>33</sup>, conocido como Informe Brundtland para hacer referencia a un desarrollo que «satisfaga las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias». Basándose en esta concepción, Riestra y Lucas<sup>34</sup> definen las dimensiones del desarrollo sostenible en los siguientes términos: i) económica, que implica transitar de la racionalidad económica hacia la racionalidad ambiental, para articular los aspectos económicos y ambientales que fundamentan el proceso con criterios de sustentabilidad; ii) social, que comprende todos los aspectos socio culturales que contribuyen con el mejoramiento del bienestar social y, el desarrollo de los pueblos, lo cual se relaciona directamente con la equidad social; y, iii) ecológica, que promueve la protección y uso racional de los recursos naturales renovables y no

---

<sup>32</sup> Comisión Económica para América Latina y El Caribe-Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social, CEPAL-ILPES. *Resultados de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Humano*, Santiago de Chile, CEPAL-ILPES, 1972.

<sup>33</sup> Organización de las Naciones Unidas, ONU. *Asamblea General. Desarrollo y cooperación económica internacional medio ambiente. Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Desarrollo sustentable*, Nueva York, ONU, 1987, p. 23.

<sup>34</sup> Riestra, Lucas. «Las dimensiones del desarrollo sostenible como paradigma para la construcción de las políticas públicas en Venezuela», *Tekhné*, vol. 21, no. 1, 2018, pp. 24-33.

renovables para garantizar su existencia para las futuras generaciones.

Un aspecto adicional a considerar es el papel de la innovación en la articulación de las dimensiones antes mencionadas en dicho proceso. Algunos autores señalan que las tecnologías dominantes no se identifican solo por innovaciones individuales, sino por los conjuntos o *clusters* de innovaciones interrelacionadas. La idea de que estos *clusters* generan las fases del desarrollo económico es antigua; de hecho, los economistas marxistas y schumpeterianos han intentado relacionar –durante más de un siglo– las etapas de desarrollo con el surgimiento y declive de diferentes tecnologías. Así, de acuerdo con esta visión, cada período histórico estaría dominado por el uso intensivo y extenso de tecnologías de producción específicas<sup>35</sup>. Esto es precisamente lo que ocurre en el caso de la minería.

En este sentido, las tecnologías pueden ser fomentadas u obstaculizadas por instituciones y creencias sociales, que a menudo explican por qué se desarrollan y se difunden en algunas partes del mundo y no en otras. Particularmente dentro de la visión schumpeteriana es relevante el que las innovaciones no tengan un impacto económico aislado: se vuelven dominantes porque se aplican en diferentes contextos, moldeando y transformando ideas originales. De otro lado, las innovaciones podrían ocurrir en diferentes ámbitos económicos, pero se mezclan y combinan en el tejido económico y social. Luego, cuando el nuevo conocimiento asociado con algunas tecnologías emergentes comienza a difundirse ampliamente en la vida económica, generará una fase de expansión económica. Las nuevas oportunidades tecnológicas estimulan y abren nuevas industrias que no existían antes, lo que lleva a la creación de empleos y al cambio estructural (*ídem*).

Por otra parte y en relación con la sostenibilidad del desarrollo, la Asamblea General de las Naciones Unidas del 2015<sup>36</sup>, en el documento titulado *La Agenda 2030 para el desarrollo sostenible*, establece una nueva ruta para que los países latinoamericanos y del Caribe promuevan un desarrollo con criterios de sostenibilidad. En el documento, se destacan algunos temas de interés que contribuyen con un desarrollo sostenible: i) la reducción de las desigualdades en sus distintas dimensiones; ii) la promoción de un crecimiento económico in-

---

<sup>35</sup> Archibugi, Daniele. «Blade Runner economics: Will innovation lead the economic recovery?», *Research Policy*, no. 46, 2017, pp. 535-543.

<sup>36</sup> Organización de las Naciones Unidas, Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y El Caribe, *op. cit.*

clusivo; iii) el trabajo decente; iv) la conformación de ciudades sostenibles; y, v) el cambio climático. De este modo, se proponen diecisiete (17) *Objetivos de Desarrollo Sostenible*, los cuales se configuran como una estrategia para la planificación del desarrollo al nivel nacional y local. Estos aportan una visión de largo plazo y constituyen el sustento para que cada país promueva una «senda hacia un desarrollo sostenido, inclusivo y en armonía con el medio ambiente, a través de políticas públicas e instrumentos de presupuesto, monitoreo y evaluación»<sup>37</sup>.

En esta senda, un elemento particular resulta clave para el caso específico de esta armonía medioambiental: las externalidades negativas de la minería. Entre ellas destacan los grandes volúmenes de residuos de roca y de relaves de minas que, no obstante las diversas alternativas que existen para reciclar y reutilizarlos, la mayor parte de ellos simplemente se almacena. Además de los problemas físicos asociados con estos enormes depósitos y a los voluminosos relaves en embalses o de los derrames en lagos y ríos, la reactividad química de algunos desechos mineros –específicamente, la liberación de elementos potencialmente tóxicos y biodisponibles en aguas naturales, tanto porque llegaran a ingerirse o como fluidos corporales–son los causantes del mayor daño ambiental<sup>38</sup>.

En este punto es especialmente relevante tener en cuenta lo planteado por Seal y Hammarstrom<sup>39</sup>, en cuanto a que el impacto potencial de los depósitos minerales depende de una serie de variables, que incluyen –entre otros– la mineralogía de los yacimientos, los métodos de extracción, el procesamiento de minerales (pasado y presente), el clima y el nivel de desarrollo del país del que se trate. Por tanto, la mineralogía resulta clave para comprender qué metales pueden convertirse naturalmente (*i.e.*, mediante procesos geológicos) o industrialmente (*i.e.*, a través de la minería y metalurgia) para ser luego incorporados al medio ambiente. Además, en las explotaciones cupríferas también suele utilizarse intensivamente minerales como el mercurio (Hg) para la recuperación de oro, al igual que en instalaciones mineras artesanales (trapiches semi-industriales). Dicho metal suele encontrarse al examinar los terrenos mineros, pudiendo tener

---

<sup>37</sup> ONU-CEPAL, *op. cit.*, p. 5.

<sup>38</sup> Jamieson, Heather E. «Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: Essential knowledge for predicting environmental impact», *Elements*, no. 7, 2011, pp. 381-386.

<sup>39</sup> Seal, Robert y Hammarstrom, Jane. «Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits», en: Jambor, John, David Bowles e Ian Ritchie (eds.). *Environmental aspects of mine wastes. Short Course Series*, Vancouver, Mineralogical Association of Canada, 2003, pp. 11-50.

dos orígenes distintos: proveniente del amalgamamiento aurífero o bien un origen primario (mineral), que se libera durante su producción (de Hg, o durante la flotación y lixiviación de los minerales Cu-Au)<sup>40</sup>. Por lo tanto, la minería en todas sus fases puede resultar tremendamente contaminante, tanto para el ambiente como para los humanos, demandando en consecuencia la adopción de nuevas tecnologías para atenuar –o eliminar, en lo posible– tales efectos. Algunas medidas adoptadas en la actualidad por las compañías mineras –particularmente orientadas a disminuir su huella de carbono–, han sido la adopción de políticas de eficiencia energética y la incorporación de fuentes de energías renovables no convencionales a sus matrices energéticas. Sin embargo, estas no son suficientes para reducir de manera significativa las emisiones directas e indirectas de su actividad.

Por otra parte, en el caso concreto del sector minero chileno es importante destacar su contribución al desarrollo del país a partir de la promoción del crecimiento, la generación de empleo e ingreso crecimiento económico, los encadenamientos productivos, la formación de capital humano y la gestión ambiental responsable de los recursos locales que conforman el potencial de desarrollo. Pero ello, no obstante, requiere la adopción de tecnologías alternativas que promuevan la explotación de las minas con criterios de sostenibilidad. De hecho, Leturia y Merino<sup>41</sup>—a partir del análisis del sector minero chileno— afirman que los yacimientos mineros tienen existencia económica cuando el minero inicia el proceso exploratorio, asumiendo por su cuenta y bajo riesgo los procesos u actividades que los convierten en un potencial productivo. De allí que «... un recurso minero que no se conoce o que no se puede usar, no tiene valor económico» y —por ende— no aporta al mejoramiento del bienestar social.

Otro aspecto a considerar es que las reservas de minerales se encuentran determinadas por un conjunto de factores que son en extremo dinámicos. Dependen así, resumidamente, de la innovación y el desarrollo tecnológico, de los costos de explotación y el precio de los metales. Como consecuencia de ese dinamismo de los factores determinantes, actualmente las reservas de minerales se incrementan de manera proporcional con el volumen de mineral explotado durante un período determinado. Este rasgo de la minería reafirma el planteamiento de que el mecanismo más idóneo para «aumentar los recur-

---

<sup>40</sup> Higuera, Pablo; Oyarzun, Roberto; Oyarzún, Jorge; Maturana, Hugo *et al.* «Environmental assessment of copper-gold-mercury mining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile», *Applied Geochemistry*, vol. 19, no. 11, 2004, pp. 1855-1864.

<sup>41</sup> *Op cit.*, p. 231.

«... los mineros es favorecer la inversión, la innovación tecnológica y la exploración minera»<sup>42</sup>. Esto último justamente explica tanto el interés como la urgente necesidad que tiene la minería del cobre de incorporar nuevas/mejores tecnologías, que permitan mantener (o mejorar) la producción, la productividad y rentabilidad del negocio (en este caso, por parte de las empresas públicas).

Adicionalmente es necesario recordar que el significativo crecimiento económico alcanzado por Chile ha sido el resultado del auge alcanzado por las exportaciones vinculadas con la explotación de recursos naturales. Y dentro de ellas, la minería del cobre—aunada a otras actividades de menor importancia como la agricultura, pesca y silvicultura—, ha desempeñado un importante rol en la conformación de una condición territorial de «semiperiferia» o «periferia» en cuanto a recursos. El problema es que tales circunstancias—dado el carácter de materias primas/recursos naturales no renovables, con poco valor agregado—, dan cuenta también de la posición vulnerable que presenta Chile en relación con los flujos comerciales (por ejemplo, su exposición a la gran variabilidad de sus precios, en tanto *commodities*) y con las cadenas productivas globales<sup>43</sup>.

Dicha vulnerabilidad es sustentada por Rehner y Vergara<sup>44</sup> con base en la tesis de la Enfermedad Holandesa (*Dutch disease*), cuando demuestran que en dos ciudades ubicadas en el norte de Chile—en las que predominan la minería complementada con el desarrollo de las actividades agrícolas e importantes funciones de centralidad—, se ha generado un crecimiento del empleo—dependiente del sector minero—, en algunos sectores vinculados con el crecimiento de la minería (e.g., la construcción y el comercio). Esto significa que la generación de empleo se ha concentrado en el sector servicios y la construcción, que son actividades de bienes no transables (no exportables). Estos y otros rasgos que no se abordan en este estudio dejan en la palestra la discusión sobre la necesidad de buscar alternativas económicas integradoras, en las que la sostenibilidad económico-financiera de la actividad minera sea compatible y estén en armonía con el desarrollo humano y la sustentabilidad ambiental.

### 3. Estimación, resultados y discusión

Los epígrafes anteriores han evidenciado la necesidad de que los procesos mineros se realicen, tanto en su programación como en su

---

<sup>42</sup> *Ibidem*, pp. 231-232.

<sup>43</sup> Rehner y Vergara, *op cit.*

<sup>44</sup> *Ibidem*

ejecución, siguiendo simultáneamente criterios de rentabilidad, de sostenibilidad y de sustentabilidad. Todos ellos se fundamentan –y por tanto, están condicionados– por la innovación y el desarrollo tecnológico de maquinarias y procesos que se emplean en la actividad. Dentro de estos últimos tienen especial relevancia los avances alcanzados en las tecnologías de información, comunicación y automatización, así como en la robótica, por cuanto han permitido mejorar tanto la productividad como la rentabilidad del negocio, así como la seguridad del capital humano que en ella se desempeña.

La minería de *open pit* (o rajos abiertos) involucra varios procesos operativos, que abarcan desde la extracción de la roca mineralizada hasta el producto final, que en el caso del cobre este puede ser en forma de cátodos o de concentrado de cobre. Estos pueden resumirse, grosso modo, como sigue: i) pre-corte; ii) arranque o extracción de materiales; iii) manejo de materiales; iv) apoyo a la producción; y, v) eventos no deseados. En los diferentes estudios relacionados con la ejecución de los proyectos mineros se observa que en el manejo de materiales –en su etapa de extracción, *i.e.*, perforación tronadura-carguío y transporte– es el que marca/define los costos de esta etapa. Así, en la evaluación de los límites tecnológicos del sistema de manejo de materiales es evidente que la distancia de transporte es la que precisa el punto de quiebre en los costos y, por tanto, la que define los diferentes ritmos a ser considerados para analizar las diferentes alternativas.

Para optimizar la actividad resulta necesario entender primero una serie de criterios, tales como las bases para la planificación, la determinación de reservas, el *pit final*, la secuencia económica de extracción, el proceso de optimización, el modelo de valorización, el envolvente final y la secuencia de extracción, entre otros aspectos. Adicionalmente, para tener una visión ordenada sobre las tecnologías actuales aplicadas a los diferentes procesos de una operación a rajo abierto en este estudio se incorpora un *roadmap* tecnológico. Su construcción busca conocer los escenarios actuales y desafíos futuros de la minería en el contexto chileno, en tanto país productor de cobre, con respecto a los diferentes procesos involucrados. El énfasis estriba en el levantamiento tecnológico para cada uno de ellos, indicando su nivel de tecnología o grado de automatización. En estos casos el énfasis estará en el transporte de materiales.

### 3.1. El roadmap tecnológico u hoja de ruta tecnológica (HRT)<sup>45</sup>

El objetivo de la HRT es responder las siguientes preguntas clave: ¿Dónde se está ahora? ¿Dónde se quisiera estar en el futuro? ¿Cómo alcanzar ese futuro deseado? En este estudio, su conceptualización y construcción se alimentó a partir de información del entorno, así como de las características y necesidades del mercado. El punto de partida era identificar dónde y por qué realizar el análisis de la HRT en la producción de cobre en minas a rajo abierto en Codelco-Chile. Esto se hizo con base en la situación y desafíos de la actividad hecha en el epígrafe 1), resumidas en el deterioro de la calidad del recurso geológico y aumento de los costos de producción, traducidos en la reducción de la productividad y el estancamiento del proceso de extracción del mineral, así como la eventual caída de la participación chilena en la producción mundial. En este escenario, las compañías mineras deben hacer grandes esfuerzos para mantener su nivel de producción. Factores como las grandes distancias de acarreo –debido a la profundización de los yacimientos, mayores movimientos de materiales por el deterioro de la calidad del recurso– y el procesamiento más complejo –debido a la mayor dureza y presencia de contaminantes–, se han traducido en factores clave que inducen una disminución de la productividad. Por lo tanto, la minería a rajo abierto necesita desarrollar soluciones y tecnologías que permitan mover grandes volúmenes de tierra a través de largas distancias y optimizar la gestión de activos.

Una vez precisada la situación actual, surgen algunas interrogantes fundamentales para el objetivo de la investigación: ¿Seguirá siendo el cobre el motor de la economía chilena? ¿Hasta cuándo cumplirá ese rol? y ¿El salto al desarrollo de la economía chilena depende del cobre? La premisa de partida, tras esta HRT, radica en que el cobre puede desempeñar un rol crucial en el desarrollo de Chile, pero se requiere vincular a su explotación procesos de innovación tecnológica que resulten sostenibles<sup>46</sup>. No obstante los ingentes y va-

---

<sup>45</sup> Neologismo inglés referido a un proceso de planificación tecnológica que abarca la identificación, selección y desarrollo de tecnologías alternativas con capacidad de satisfacer las necesidades o requerimientos de producción de empresas en distintos sectores económicos (Fariás Coelho, José Antonio; Botelho Junior, Sergio y FontineleTahim, Elda. «Roadmap tecnológico: um estudo preliminar», *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa (RECADM)*, vol. 11, no. 2, 2012, pp. 168-177). Se trata de gráficas simplificadas para comunicar y compartir eficazmente una intención estratégica con la finalidad de movilizar, alinear y coordinar esfuerzos entre las partes involucradas para alcanzar uno o varios objetivos organizacionales.



riados desafíos para la sostenibilidad de la producción de cobre en Chile –dada su importancia para la economía del país–, el estudio enfatizó en uno de los núcleos traccionantes<sup>47</sup> de las operaciones actuales de rajos abiertos para el caso de Codelco y específicamente en el transporte de materiales, categoría con mayor peso en los costos (representan cerca del 45% de los costos en rajos con menos de 350 metros de profundidad y, para mayores, de hasta un 60-70% aproximadamente del costo de extracción). De hecho, las cifras de Codelco (reales para el año 2014 y estimaciones anuales al 2019), dan cuenta que el costo en dólares de EE.UU. por tonelada métrica húmeda (US\$/tmh) pasaron de 2,6 a 3,5 (*i.e.*, crecieron 35%), al aumentar la distancia media equivalente de 9,1 a 13,9 kilómetros (esto es, la distancia media de transporte horizontal más una homologación de lo que se realiza en pendiente). Los «núcleos» fueron las operaciones y la planificación minera.

De otro lado, dado que establecer la visión de futuro resulta fundamental para la definición del *roadmap*, se requiere primero identificar los aspectos relevantes del negocio y los procesos de valor que lo conforman, así como buscar y explorar más allá de las prácticas y de las tecnologías existentes en la actualidad en los procesos e imaginar a partir de estos el proceso minero que se desea alcanzar en el futuro. Los elementos que constituyen la visión están directamente relacionados con los KPI de los procesos actuales y futuros. Tales elementos se resumen en: i) seguridad (ningún accidente fatal); ii) sustentabilidad (uso mínimo de energía, agua y mínimo impacto ambiental-contaminación); iii) procesos eficientes (con capacidad de responder a los cambios de material, selectivos y flexibles); iv) productividad (maximizar la producción obtenida por un sistema productivo, dados los recursos utilizados para obtenerla); v) niveles de automatización (sensores, máquinas, sistemas integrados, proactivos con capacidad de aprender, para responder en tiempo real a cambios en las condiciones de operación); y, vi) recursos humanos especializados (alto nivel de especialización y capacidad de análisis de procesos mineros). Sobre estas bases, la propuesta de visión de futuro fue definida en los siguientes términos: *»La División Radomiro Tomic de Codelco-Chile utiliza procesos mineros seguros, eficientes,*

---

<sup>46</sup> Consejo de Innovación para el Desarrollo, CNID. *Minería y desarrollo sostenible de Chile. Hacia una visión compartida. Una minería virtuosa, sostenible e inclusiva*, Santiago de Chile, CNID, 2014.

<sup>47</sup> *I.e.*, aquellos ámbitos que constituyen, en el corazón del proceso minero, los desafíos tecnológicos más cruciales para la evolución de la industria.

*de alta productividad y sustentables, con uso intensivo de tecnologías de información, comunicación y automatización en sus principales operaciones unitarias».* Dicha visión, que inspira la HRT, se estableció dado la baja I+D que se ha aplicado a los procesos de operación minera en cada uno de los procesos

Las tecnologías analizadas y sus principales restricciones pueden resumirse como sigue:

1) Tecnología autónoma (camiones de extracción fuera de carretera/sin operador): se requiere diseñar fases donde el paquete de bancos en la vertical no supere los 250 metros de profundidad, con máximos de movimientos de 200 mil toneladas por día (ktpd), debido a la restricción base, que condicionada por la cantidad de satélites (e.g., GPS, Glonass, Galileo), para la cobertura de su flota de equipos mineros<sup>48</sup>. El gran plus de dicha tecnología es prescindir del operador del camión de extracción, con los consiguientes ahorros en costos que supone (Caso 1).

2) Sistema *In Pit Crushing and Conveying* (IPCC): se refiere al chancado/triturado y correa transportadora al interior del rajo abierto. Requiere zonas que permanezcan fijas en el tiempo para la instalación de la infraestructura requerida para la implantación del sistema: chancado, correas transportadoras tradicionales (hasta 15 grados de pendiente), con rampas (vías de circulación de los camiones), fijas en el tiempo para poder generar los trazados de los servicios de energía eléctrica y agua, requeridos por el sistema (Caso 2).

3) *High Angle Conveying* (HAC), o transporte de materiales en rajos abiertos mediante correas transportadoras de alta pendiente, con retos similares: requiere también de conceptos de diseños de las fases y secuencia minera que permitan aplicar las tecnologías; esto es, generar una pared fija a lo menos por 10 años, inter-rampas inferiores a 200 metros. En otros términos, se requiere un sistema de correas afianzados al ángulo global o inter-rampa de la pared, por lo que este sistema combina los camiones de extracción con correas de alta pendiente (Caso 3).

---

<sup>48</sup> Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *División Gabriela Mistral, «Camiones Fuera de Carretera Autónomos», Sistema de Autónomos. Plan de Negocio y Desarrollo*, Santiago de Chile, Codelco, 2010.

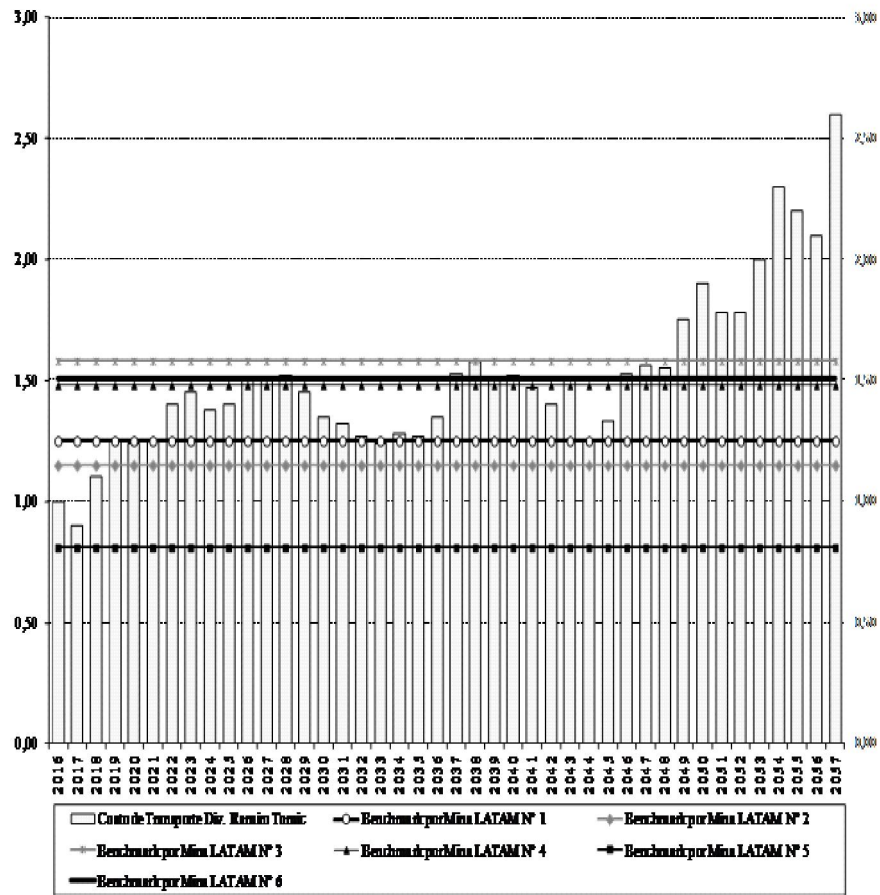
### 3.2. Benchmarking en la minería del cobre en Chile. Caso costos de transporte

Llevar a cabo nuevos proyectos (*i.e.*, los del tipo *greenfield*) resulta cada vez más complicado, dadas las dificultades para conseguir financiamiento de inversionistas privados –y más aún, desde el Estado, por cuanto hay que competir por los fondos con proyectos que tienen una orientación social-. Así, dado el complejo escenario para iniciar nuevos proyectos, la alternativa es seguir operando con los ya existentes (*i.e.*, los del tipo *brownfield*), mediante la promoción de tecnologías o innovaciones que permitan hacer rentable las próximas etapas del proyecto.

La industria minera nacional e internacional ha dirigido sus esfuerzos hacia la búsqueda de nuevas tecnologías para el transporte de materiales, específicamente manteniendo los camiones de extracción pero autónomos (*i.e.*, sin operador, bajo la tecnología de GPS u otras de posicionamiento global vía satelital, como Glonass o Galileo). En estos sistemas destacan las operaciones mineras de rajo abierto en Chile y Australia, principalmente (*e.g.*, Minera Gaby, Calama-Chile de Codelco y Mina Jimbleber en Pilabara-Australia de BHP), orientadas hacia la eliminación del costo de operación/OpExen cuanto a la remuneración de los trabajadores, pero manteniendo los altos costos de CapEx (*Capital expenditure*, gastos de capital) y también la manutención de los camiones. Se enfatiza que en su vida útil económica, el OpEx supera en 4 a 5 veces el CapEx. Estos rasgos evidencian la necesidad de generar nuevas tecnologías que puedan enfrentar el agotamiento de los minerales secundarios (en la parte superficial de la corteza), lo cual lleva a minerales primarios profundizando en los rajes, para tener perfiles de acarreo de materiales más exigentes y por ende más caros.

En el Gráfico no. 1 se muestra la proyección de los costos promedio en rajes mineros de Codelco (barras verticales), versus la industria minera en Chile (líneas horizontales, cada una representando el *benchmarking* para cada una de las 6 minas consideradas en la División RT), correspondiente al costo de transporte de materiales en su forma tradicional (camiones de extracción). El desafío consiste en proponer un «*Sistema Minero de Alta productividad*», que viabilice un costo de transporte menor a 1,3 US\$/t. Del análisis del mismo se infiere que la industria ha sido cautelosa en la inversión en nuevas ampliaciones, debido al elevado costo que –tanto en el desempeño reciente, como para sus proyecciones de mediano y largo plazo– re-

presenta el transporte, debido a que los rajos vez más son más profundos y al descenso de sus leyes. De allí que el análisis del plan minero de cada mina sea la clave para constatar que los gastos constituyen un indicador prospectivo con respecto al futuro del negocio. Se precisan también las variables que lo mueven, determinando las opciones de continuar con dicho proyecto o cerrarlo. No obstante, es necesario considerar que cada tecnología requiere de diseños conceptuales diferentes, debido a que los criterios de éxito de c/u de ellas establecen las condiciones técnicas requeridas para el funcionamiento de la misma.



**Gráfico 1.** Costo promedio de transporte en operación en rajo abierto (*open pit*), 2016-2057

Fuente: elaboración propia, con base en datos del Codelco y del Proyecto ingenieril.

#### 4.3. Análisis económico-financiero del sistema de alta productividad en rajos de Codelco (open pit)

Para la planificación minera en rajo/*open pi* existen algunas consideraciones geotécnicas. En este sentido y con base en las caracterizaciones geotécnica, geomecánica y hidrogeológica de la DTR, en el proyecto completo (estudio base) se precisaron las siguientes: requerimientos de rampas de acceso; desarrollo y cierre de fases; sectores con infraestructura y otras consideraciones (e.g., adelanto de los frentes de avance de la fase localizada en niveles superiores respecto al frente de avance de las inferiores, desarrollo de huinchas, botaderos, entre otras).

Se instrumentó luego un modelo de valorización para estimar un valor económico de cada uno de los bloques del modelo de recursos, para poder así determinar la envolvente final. Este proceso de valorización de bloques es realizado internamente por el *software* Whittle. Se consideró la valorización de mineral sulfuro y Óxido de Baja Ley. Para la estimación de los beneficios totales el modelo considera una ecuación de beneficio tradicional (ingresos menos costos). Los ingresos dependen del precio del producto, de la recuperación metalúrgica y de la Ley del mineral. Dentro de ellos se consideran los ingresos por cobre, por plata y por ácido. Por su parte, los segundos abarcan el costo fijo mina, el costo variable mina, la distancia equivalente, el costo de proceso y el costo de venta del producto. Dentro del costo mina, el de transporte es considerado del tipo variable, dependiendo de la distancia desde el bloque al destino de los materiales. También se consideran costos como los de planta de concentrados, de tostación, de fundición, de tratamiento de arsénico y de refinación.

Seguidamente, a partir de nuevos parámetros geotécnicos se definió la zonificación de ángulos de talud. Para incorporar el efecto de la inclusión de las rampas al operativizar las envolventes, los ángulos de talud fueron aumentados en cinco grados. A continuación se realizó el proceso de optimización, mediante los módulos *Dipper Economic Pit Limit Complexslope 720v2* del *software* Minesight. Este emplea el algoritmo del cono móvil y se generó en Fortran (un programa de valorización de bloques). Considerando el precio del Cu desde 0,5 US\$/lb hasta 1,68 US\$/lb, se originó una serie de envolventes o de *pits* anidados. Precisamente estas últimas constituyeron el insumo básico para la determinación de la envolvente final y la secuencia de extracción.

La metodología empleada para aproximar la determinación de las reservas económicas<sup>49</sup>, consistió en estimar el rajo o envolvente económica que presenta el máximo valor presente neto (VPN) sin inversiones, en función de las envolventes computacionales no operativas calculadas mediante el módulo Milawa de Whittle. Los resultados de este junto con los parámetros económicos definidos se emplearon para estimar el VPN de cada envolvente, incorporando el valor del dinero en el tiempo (con una tasa de descuento del 8%)<sup>50</sup>. Finalmente, se agruparon incrementos o envolventes conformando fases computacionales de mayor tonelaje, para simular una condición operacional. De los resultados de la corrida Milawa de Whittle para el modelo RT se obtuvo un rango de máximo VPN entre el *pit* 19 y el *pit* 23 (RF 0,75 y 0,85, correspondientes a US\$/lb 2,26 y 2,56 US\$/lb, respectivamente). Mediante un análisis marginal de fases, en etapa posterior se confirmaba el límite económico del rajo.

Pasando ya al caso específico del transporte de materiales y el diseño del Sistema de Alta Productividad óptimo para el caso RT, las variables más importantes –tanto para el diseño conceptual como para el análisis financiero–, fueron: i) la distancia media equivalente (en km equivalentes); ii) costo de transporte (en US\$/t de mineral húmedo); iii) el ritmo de extracción (en miles de t por día, ktph); iv) la productividad media (en ktph); v) el tiempo de ciclo medio (en minutos); vi) la utilización media (en %); vii) precio del cobre (en US\$/lb); viii) los CaPexy OpEx (en US\$); y, ix) el Valor Actual de Costos (VAC, en US\$). De ellas, las tres últimas son no controladas (*i.e.*, independientes, debido a su carácter macroeconómico o de mercado); las restantes son controlables o dependientes (por su naturaleza dependen de la gestión de la empresa).

En el Cuadro no. 1 se presentan las tres alternativas que se evaluaron y analizaron en el transcurso del estudio base, para el diseño del denominado «Sistema de Alta Productividad» para el caso del cobre en rajos abiertos explotados por Codelco en Chile. Si bien en aquel se analizó en detalle todo el diseño de la propuesta desde el punto de vista ingenieril, por razones de espacio este artículo se limita solo a

---

<sup>49</sup> Tourinho, Octavio. The valuation of reserves of natural resources: An option pricing approach, Tesis Doctoral Inédita, University of California, Berkeley, 1979.

<sup>50</sup> Para efectos de este ejercicio se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: i) sulfuros a Concentradora con ley mayor o igual a 0,2% CuT; precio del cobre de 3,01 US\$/lb; iii) valorización de recursos con categorías de medidos, indicados e inferidos; iv) no se consideró período de *pre-stripping*; iv) extracción de óxidos sin restricciones de capacidad a proceso ROM; capacidad máxima concentradora de 240 miles de toneladas por segundo/día.

### Cuadro 1 Resumen comparativo del caso base vs las alternativas tecnológicas

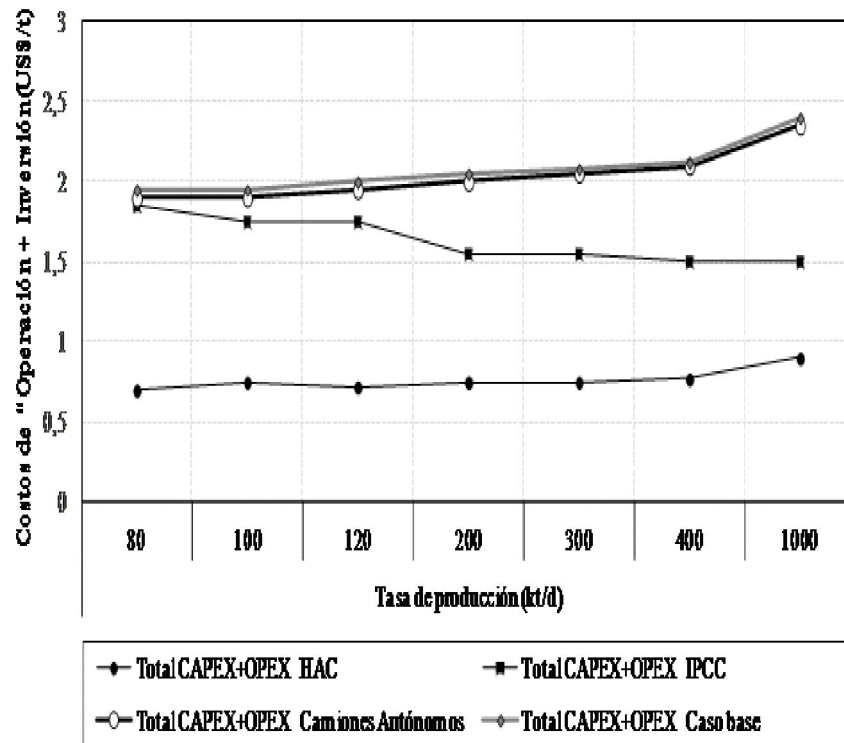
Sistema	Descripción	Conceptualización	Indicadores financieros (CapEx, OpEx y VAC+I)
Caso base: ingeniería básica 100+100 plan vigente (1 etapa con alimentación de minerales sulfurados a razón de 100 ktpd a planta concentradora); para desarrollar en estudios posteriores una segunda etapa que fundamente subir a 200 ktpd	* Operación normal * Camiones y palas, sujetos a horario operativo	* Producción de mineral en 3 puntos diferentes de extracción, c/u con 1 pala; 1 punto de producción de estéril; chancado; botadero y estacionamiento  * Se generaron tablas con KPI de índices operacionales del perfil de transporte (e.g., velocidades <i>inpit</i> y <i>expit</i> (dentro y fuera del rajo), además de tiempos, capacidades de camiones, chancador, número de camiones y disponibilidad de estos	
Caso 1: Camiones autónomos (sin operador; sin paradas en colación ni cambios de turno)	* Operación autónoma * Palas sujetas a horario operativo * Camiones operativos 24 horas, conducción autónoma, no van a estacionamiento	* Se mantienen parámetros del caso base; horario operacional solo rige para las palas; los tiempos de colación y cambio de turno de camiones de extracción no se rigen por el horario operacional (son autónomos)	
Caso 2: <i>High Angle Conveyor</i> - HAC (transporte de minerales desde el interior del rajo a superficie a través de correas de alta pendiente, combinando operación con camiones de extracción)	* Operación con camión pala más implementación del HAC; centro de alimentación * Camiones y palas sujetas a horario operativo * Solo se transporta mineral por el sistema HAC * Camiones para transporte de estéril	* Mantiene algunos parámetros del caso base; el aspecto diferencial es la instalación del centro de <i>sizers</i> , dos opciones de trazado de sistema HAC y una correa de superficie	<b>CapEx:</b> 96,30 millones de USD <b>OpEx:</b> 0,38 USD/tonelada métrica <b>VAC + I:</b> 0,71 USD/tonelada métrica
Caso 3: In-PitCrushing&Conveying, IPCC (chancado interior mina y correas tradicionales/pendiente o ángulo normal; i.e., menor al 15%)	* Operación camión pala más implementación del sistema HAC * Todo el material se transporta mineral por sistema IPCC	* Se consideran los 3 puntos de extracción del caso base, además de 1 chancador central, 1 sistema IPCC, su correa transportadora y 1 correa transportadora de superficie	<b>CapEx:</b> 81,70 millones de USD <b>OpEx:</b> 0,48 USD/tonelada métrica <b>VAC + I:</b> 0,58 USD/tonelada métrica

**Fuente:** elaboración propia, con base en datos disponibles.

**Nota:** ktpd = miles de toneladas métricas por día.

resumir sus principales características, para destacar principalmente sus elementos de rentabilidad económica y sostenibilidad financiera (4ª columna).

A partir de los datos recabados, se efectuó una simulación para cada uno de los casos con respecto al caso base. Los resultados (Gráfico no. 2) indican a priori que cada una de las tecnologías aplicadas (Caso 1, Camiones autónomos; Caso 2, Sistema HAC; y Caso 3, Sistema IPCC) tienen una productividad media similar. Sin embargo, el otro aspecto más destacable es que todas ellas resultaron ostensiblemente mejores en cuanto al requerimiento de la flota de transporte con respecto al caso base. Un tercer hallazgo relevante es que permite poner el foco de atención en las tecnologías HAC e IPCC, cada una de las cual dependerá de la productividad y sus costos (CapExy OpEx), la ver las potencialidades de cada una.



**Gráfico 2.** Estimación de Costos de «Operación + Inversión».

Fuente: elaboración propia, con base en datos disponibles.



Una primera interpretación de los resultados de la simulación es que cada una de las tecnologías aplicadas (Caso 1-Camiones autónomos, Caso 2-Sistema HAC, Caso 3-Sistema IPCC) poseen una productividad media similar. Sin embargo, las tres son significativamente mejores en cuanto al requerimiento de la flota de transporte con respecto al caso base (100 + 100). La segunda interpretación permite colocar el foco de atención en las tecnologías HAC e IPCC (*i.e.*, los casos 2 y 3), cuya implementación finalmente dependerá de la productividad y sus costos (CapEe y OpEx), así como de las potencialidades de cada una (Cuadro no.2).

**Cuadro 2**  
**Resultados de la simulación de caso base vs. casos**  
**1(Autónomo), 2 (HAC) y 3 (IPCC)**

	<b>Casos (tecnologías a utilizar para el Sistema de Alta Productividad)</b>			
	<b>Caso Base</b>	<b>Caso 1 (Autónomos)</b>	<b>Caso 2 (HAC)</b>	<b>Caso 3 (IPCC)</b>
Nº Camiones	70	67	58	58
Mineral Pala 1	3.015	2.701	1.813	2.781
Mineral Pala 2	2.766	2.624	2.206	3.534
Mineral Pala 3	2.538	2.446	2.555	3.534
Lastre Pala 1	4.255	4.532	4.255	5.158
Lastre Pala 2	4.002	4.179	4.007	4.858
Lastre Pala 3	4.443	3.712	4.443	5.385
Productividad media (ktph)	21.019	20.194	19.279	25.250
Tiempo de ciclo medio (min)	55,50	55,40	49,00	44,00
Utilización media (%)	78	69	72	77

**Fuente:** elaboración propia, con base en datos disponibles.

De esta manera, cuando se analizan la productividad media (miles de toneladas por hora, ktph), el tiempo de ciclo medio (minutos, min) y la utilización media (%) en cada una de las alternativas tecnológicas, se observa un desempeño superior en el sistema IPCC. Sin embargo, es necesario adicionalmente considerar su flexibilidad operacional, por cuanto esta tecnología requiere de un chancador fijo/estacionario en un punto dentro del rajo abierto y correas por rampas de transporte semimóviles (pendientes no mayores al 10%, correspondientes a la inclinación de la rampa de acarreo de materiales).

Finalmente, al analizar conjuntamente los resultados del Gráfico no. 2 y del Cuadro no. 2 se observa que la tecnología asociada al Sistema HAC exhibe los mejores costos combinados de CapEx y OpEx. Este hallazgo reafirma que, si bien la tecnología IPCC es más productiva, resulta demasiado rígida y por ende sus costos en el tiempo son mejores que los sistemas tradicionales basados en camiones y que la tecnología autónoma. Sin embargo, no compite con el sistema HAC, que sí incorpora la flexibilidad requerida por el sistema a instalar en rajo abierto. De allí que la fase posterior del estudio (y que no se detalla en este artículo), es la aplicación de la tecnología o sistemas HAC a uno de los rajos de Codelco-Chile (División Radomiro Tomic. Esta se consideró como la tecnología «retadora» del sistema tradicional (caso base).

Para calcular el gasto de operación y la inversión para el año 2019, debido a que no existe la tecnología al nivel industrial que considere el modelo conceptual aquí propuesto, se consideró el *benchmarking* de empresas del rubro para aplicar la tecnología HAC en un rajo abierto en operación. Se consideraron tres categorías de costos: i) la basada en la experiencia de la empresa Joy global (partidas de costo, parámetros técnicos y disponibilidad); ii) partidas del sistema HAC (remuneraciones; costos de operación, mantenimiento y reparación de la correa transportadora, del chancador y del HAC); y, 3) partidas camión (materiales, combustibles, remuneraciones, mantenimiento y reparación). De las estimaciones efectuadas se observó que el sistema HAC resultó un 10% menor que el caso base. Así mismo, el valor actual de costo (VAC) a una tasa de interés del 8% fue de 1,41 USD\$/t versus 1,57 USD\$/t del caso base. Adicionalmente se realizó un análisis de sensibilidad, con 12 escenarios a partir de la introducción de cambios en las variables clave (energía, correas, combustible, mantenimiento y reparación, entre otras), resultando en la mayoría de los casos un mejor desempeño de la tecnología HAC con respecto al caso base.

#### **4. Reflexiones finales y conclusiones**

Al nivel mundial la minería –en general– y la del cobre –en particular– es considerada en la actualidad como un negocio complejo, no solo por las tareas y procesos que implica su implantación, sino además debido a las externalidades negativas consecuencias no deseadas tanto en las comunidades del entorno de influencia, como sobre los recursos naturales y el ambiente en general. Es también un negocio costoso, en particular, cuando se trata de inversiones para nue-

vos proyectos o desarrollos (tipo *greenfield*). Sin embargo, al mismo tiempo puede ser una actividad muy rentable. Estos y otros rasgos evidencian la necesidad de que los procesos mineros se realicen, tanto en su programación como en su ejecución, siguiendo criterios de rentabilidad, de sostenibilidad y de sustentabilidad. Además, los aspectos económico-financieros suponen una presión constante para las empresas mineras (particularmente para planificadores y programadores), expresada en la necesidad de que sus planes mineros sean muy precisos y optimicen la producción en todas sus etapas.

El problema es que las explotaciones en desarrollo (proyectos *greenfield*) –de modo particular, la minería a rajo; y, en el caso específico de Chile, con el cobre– se caracterizan por sus elevados costos de producción. Esto se debe en general a las menores leyes, dado el envejecimiento de los yacimientos y la disminución de la ley del mineral remanente en los yacimientos, las mayores distancias de transporte de materiales extraídos y los costos de energía y agua, con sus consecuentes efectos económicos y ambientales. Este último aspecto –lograr que los proyectos sean sustentables– es la clave para que los principales *stakeholders* vinculados con la industria y la actividad minera en Chile (grupos de interés que afectan o pueden ser afectados por las actividades de la empresa, tales como comunidades, gobiernos de turno, en otros), puedan otorgar la licencia para operar<sup>51</sup>.

Solucionar parcial o totalmente los problemas actuales de la actividad minera en Chile –y enfrentar los desafíos tecnológicos y de mercado– implica cuantiosas inversiones en plazos perentorios, pues de lo contrario es previsible una severa caída en la producción (de los 6 actuales a unos 4 millones de t en 2025). Esto representaría para el país una drástica merma en sus ingresos, tanto en divisas por exportación como en aportes al fisco. Dado que la minería del cobre constituye la principal actividad económica aportadora al PIB, podrían igualmente producirse efectos no deseados sobre variables como el empleo, el consumo y otras variables socioeconómicas, imponiendo por tanto algunas trabas en el proceso de desarrollo humano registrado durante las últimas décadas.

Vistas las limitaciones para emprender nuevos proyectos y la necesidad de hacer más rentables los ya existentes –con el fin último

---

<sup>51</sup> En el diseño minero, los criterios deben privilegiar la eficiencia energética y de operación en condiciones de menor impacto medioambiental, respetando por tanto la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) aprobada para dicho proyecto. Esto significa que se debe mantener la licencia para operar, que depende de las acciones que integran la sociedad donde se emplazará el proyecto.

de mantener o mejorar el liderazgo de Chile en el mercado mundial—, la propia Comisión Nacional de Productividad ha reconocido que el país (que no tiene capacidades para incidir sobre el precio internacional del cobre o en la ley del mineral), cuenta con la capacidad para mejorar la productividad de la actividad minera y reducir sus costos operacionales. Ambos aspectos constituyen las fuentes de las ventajas competitivas de la industria chilena del cobre y, por tanto, son las que en el mediano y largo plazos permitirán consolidar su posición de liderazgo al nivel mundial. Además, tales aspectos se hallan en concordancia con lo establecido en el Programa Nacional de Minería Alta Ley, específicamente en cuanto a los lineamientos orientados a mejorar la gestión interna de los actores participantes en la actividad minera, a disponer de terrenos para la explotación del mineral de forma sostenible y ejecución de nuevos proyectos y/o ampliación de los ya existentes. Ello implica, en consonancia con lo señalado por Nehring, Knights, Kizil y Hay<sup>52</sup>, que las operaciones futuras de la industria —deberán ejecutarse mediante tecnologías con menor consumo de energía y agua, con menores emisiones de gases de efecto invernadero.

Traducir esas necesidades a la realidad actual de la industria minera —y en particular, la efectuada por Codelco-Chile, objeto de estudio en esta investigación— es completamente viable. De hecho, están ya disponibles variadas aplicaciones tecnológicas cuya utilización en la minería del cobre permitirá sustituir el transporte de materiales bajo el sistema tradicional, lo que resulta también de interés para el sector minero en otros países en los que también se busca desarrollar y aplicar nuevas tecnologías que reduzcan sus costos de operación (OpEx) de los rajos.

En este complejo escenario, el artículo presentó resultados parciales de un estudio base orientado a determinar la factibilidad de incorporar tecnologías alternativas (nuevas o variantes de las ya existentes) en el diseño minero de rajos, específicamente los que actualmente Codelco-Chile tiene en operación. Así, se diseñó un Sistema de Alta Productividad para el transporte de materiales en minas de explotación a rajo abierto, comparando un caso base (100+100; ingeniería básica, cuya primera etapa implica la alimentación de minerales sulfurados a razón de 100 ktpd a planta concentradora) versus

---

<sup>52</sup> Nehring, Micah; Knights, Peter; Kizil, Mehmet Siddik y Hay, Edward. «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems», *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 28, 2018, pp. 205-214.

tres alternativas tecnológicas: i) Caso 1 (camiones autónomos); Caso 2 (sistema HAC o de transporte de minerales desde el interior del rajo a superficie mediante correas transportadoras de alta pendiente, combinando operación con camiones de extracción); y, iii) Caso 3 (sistema IPCC, chancado interior de mina y correas tradicionales/pendiente o ángulo normal); todo ello, con base en la construcción de un *roadmap* u hoja de ruta tecnológica y del *benchmarking*, examinando estos procesos en empresas internacionales y nacionales que operan en el caso chileno. Todo ello estuvo dirigido a la búsqueda de nuevas herramientas tecnológicas que permitan a las empresas –en este caso, Codelco-Chile– ser competitivas en la captura de valor económico asociado a la industria del cobre.

Los principales hallazgos de la investigación dan cuenta que los costos de operación de un sistema basado en IPCC y HAC, en comparación con los de la tecnología autónoma (Caso base, con camiones y palas) resultó ser 25% menos para un IPCC y HAC estacionario; igualmente, resultó ser 40% menos para un sistema semimóvil y hasta un 60% menos para un IPCC y HAC completamente móvil. No obstante, existen algunos retos de diseño e implementación que deben superarse para la aceptación de estos sistemas a un nivel masivo. Por tanto, el estudio constituye una investigación aplicada que combina criterios económicos, financieros, ingenieriles, ambientales y hasta jurídicos, para el diseño de un Sistema de Alta Productividad que podrá ser empleado para el transporte de materiales en minas de explotación a rajo abierto –en este caso particular, en las que actualmente son operadas por Codelco-Chile–. Así, a través del mismo se formularon alternativas económicas relevantes para los proyectos desarrollados por la empresa, en los que se evidencia la necesidad de un cambio tecnológico en proyectos tipo *brownfield*, indispensable para extender su vida útil. Esto se fundamenta en la existencia de la viabilidad técnico-económica para evaluar las etapas de ingeniería al nivel conceptual para la tecnología HAC.

Otros hallazgos no menos relevantes evidenciaron que, debido a que los sistemas IPCC también requieren de operaciones mineras con una larga vida útil, para que la inversión inicial se rentable (durante al menos 10 años), su aplicación es más idónea para los casos de nuevos proyectos o expansiones (*greenfield*) (en menor medida, en operaciones ya existentes-*brownfield*). Por último y en cuanto a la aplicación de los resultados en la cotidianidad de Codelco-Chile, se concluye que: i) los Sistemas de Alta Productividad incorporan valor al proceso de transporte, al tiempo generan ahorro de costos; ii) los sistemas IPCC son poco flexibles para ajustarse a la secuencia ac-

tual de las operaciones de la *División Radomiro Tomic*; iii) existe la oportunidad de instalar el sistema HAC en el año 2019, en el escenario productivo actual; y, iv) existe un punto de inflexión (precisado sobre 400 m de profundidad y 200 ktpd) para restablecer la opción tecnológica propuesta en este estudio para mejorar la productividad y rentabilidad de la mina objeto de estudio.

## Referencias

- Anglo American PLC. *Annual Report 2014*, London, Anglo American PL, 2015, disponible en: <https://www.angloamerican.com/~media/Files/A/Anglo-American-PLC-V2/report-builder-2014/annual-report/aa-ar14-interactive-final.pdf> (consulta: 20 de mayo de 2018).
- Arancibia Carvaja, Sara; Donoso Pérez, Macarena; Venegas Cabello, Ricardo y, Cárdenas Espinosa, Cristina. «Identificación de factores clave en la cultura de innovación. El caso de la mediana minería en Chile», *Journal of Technology Management & Innovation*, vol. 10, no. 1, 2015, pp. 132-145.
- Archibugi, Daniele. «Blade Runner economics: Will innovation lead the economic recovery?», *Research Policy*, no. 46, 2017, pp. 535-543, disponible en: <https://ideas.repec.org/a/eee/respol/v46y2017i3p535-543.html> (consulta: 30 de agosto de 2018).
- Asociación de Proveedores Industriales de la Minería, APRIMIN. *Informe de productividad Aprimin-Resultados preliminares*, Santiago de Chile, APRIMIN, 2016.
- Australian Minerals Industry Association. *Copper technology roadmap 2004*, Melbourne, Amira International Ltd., 2004.
- Australian Minerals Industry Association. *Copper technology roadmap 2006. A strategic overview*, Melbourne, Amira International Ltd, 2006.
- Bravo-Ortega, Claudio y Muñoz, Leonardo. *Knowledge intensive mining services in Chile: Challenges and opportunities for future development*, Washington, Inter-American Development Bank, IADB Discussion Paper no. IDB DP 418, 2015, disponible en: <https://webimages.iadb.org/publications/english/document/Knowledge-Intensive-Mining-Services-in-Chile-Challenges-and-Opportunities-for-Future-Development.pdf> (consulta: 27 de septiembre de 2018).

- Centro de Estudios del Cobre y la Minería-CESCO y Fundación Chile. *Proveedores y minería: desafíos para potenciar la innovación de alto impacto*, Santiago de Chile, CESCO-Fundación Chile, 2013, disponible en: <http://www.fch.cl/recurso/innovum/proveedoresy-mineria-desafios-para-potenciar-la-innovacion-de-altoimpacto> (consulta: 25 de enero de 2019).
- Collins, John y Pincock, Layne. *Technology development roadmaps – A systematic approach to maturing needed technologies*, Idaho, Idaho National Laboratory, 2010, disponible en: <https://inldigitallibrary.inl.gov/sites/sti/sti/4591819.pdf> (consulta: 30 de septiembre de 2018).
- Comisión Chilena del Cobre, Cochilco. *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1995-2014*, Santiago de Chile, Cochilco, 2015, disponible en: <http://www.Cochilco.cl/descargas/estadisticas/anuarios/Anuario2015web.pdf> (consulta: 25 de enero de 2019).
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe-Instituto Latinoamericano de Planificación Económica y Social, CEPAL-ILPES. *Resultados de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Desarrollo Humano*, Santiago de Chile, CEPAL-ILPES, 1972, disponible en: [https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/34957/S7200676\\_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/34957/S7200676_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y) (consulta: 25 de enero de 2019).
- Comisión Nacional de Productividad. *Productividad en la gran minería del cobre*, Santiago de Chile, Comisión Nacional de Productividad, 2017.
- Consejo de Innovación para el Desarrollo, CNID. *Minería y desarrollo sostenible de Chile. Hacia una visión compartida. Una minería virtuosa, sostenible e inclusiva*, Santiago de Chile, CNID, 2014, disponible en: <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2014/06/Propuesta-minera.pdf> (consulta: 23 de enero de 2019).
- Corporación del Cobre de Chile, Codelco. División Gabriela Mistral. *Camiones Fuera de Carretera Autónomos, Sistema de Autónomos. Plan de Negocio y Desarrollo*, Santiago de Chile, Codelco, 2010.
- Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Plan de negocio y desarrollo*, Santiago de Chile, Codelco, 2016.
- Corporación del Cobre de Chile, Codelco. *Memoria anual 2017*, Santiago de Chile, Codelco, 2018, disponible en: [https://www.codelco.com/prontus\\_codelco/site/artic/20180402/asocfile/20180402205622/memoriacodelco\\_2017.pdf](https://www.codelco.com/prontus_codelco/site/artic/20180402/asocfile/20180402205622/memoriacodelco_2017.pdf) (consulta: 10 de mayo de 2018).

- Donoso Muñoz, Manuel J. «El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras», *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, vol. 21, no. 2, 2013, pp. 248-261, disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008> (consulta: 21 de enero de 2019).
- Dos Ramos Nunes, Diego; Lopes de Oliveira Filho, Waldyr y, Margarida Silva, Jose. «Wastedisposalusing a spreaderand conveyorbeltmethod», *Revista Escola de Minas*, no. 68, 2015, disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56442723012> (consulta: 21 de enero de 2019).
- Economipedia. *Noticias de economía, finanzas y educación financiera*, Santiago de Chile, 2015, disponible en: <http://economipedia.com/ques-economipedia> (consulta: 10 de mayo de 2018).
- ESAN, Graduate School of Business-Perú. *¿Qué innovaciones impactarían en el futuro del sector minero?*, Lima, ESAN, 2018, disponible en: <https://www.esan.edu.pe/apuntes-empresariales/2018/08/que-innovaciones-impactarian-en-el-futuro-del-sector-minero/> (consulta: 25 de octubre de 2018).
- Fariás Coelho, José Antonio; Botelho Junior, Sergio y Fontinele Tahim, Elda.»Roadmap tecnológico: um estudo preliminar», *Revista Eletrônica de Ciência Administrativa (RECADM)*, vol. 11, no. 2, 2012, pp. 168-177.
- Hernández Sampieri, Roberto; Fernández-Collado, Carlos y Baptista Lucio, Pilar. *Metodología de la investigación*, 4ª. ed., México, McGraw Hill, 2006.
- Higueras, Pablo; Oyarzun, Roberto; Oyarzún, Jorge; Maturana, Hugo; *et al.* «Environmental assessment of copper-gold-mercurymining in the Andacollo and Punitaqui districts, northern Chile», *Applied Geochemistry*, vol. 19, no. 11, 2004, pp. 1855-1864.
- Jamieson, Heather E. «Geochemistry and mineralogy of solid mine waste: Essential knowledge for predicting environmental impact», *Elements*, no. 7, 2011, pp. 381-386.
- Leturia, Francisco Javier y Merino, Álvaro. «Tributación y minería en Chile: antecedentes para un debate informado», *Estudios Públicos*, no. 95, 2004, pp. 193-235, disponible en: [https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160304/asocfile/20160304093413/r95\\_leturia\\_merino\\_tributacionminera.pdf](https://www.cepchile.cl/cep/site/artic/20160304/asocfile/20160304093413/r95_leturia_merino_tributacionminera.pdf) (consulta: 28 de enero de 2019).
- Minería Chilena. *Codelco genera US\$1.418 millones en excedentes al tercer trimestre*, 29 de noviembre de 2018, disponible en: <http://www.mch.cl/2018/11/29/codelco-genera-us1-418-millones-excedentes-al-tercer-trimestre/> (consulta: 28 de diciembre de 2018).



- Nehring, Micah; Knights, Peter; Kizil, Mehmet Siddik y Hay, Edward. «A comparison of strategic mine planning approaches for in-pit crushing and conveying, and truck/shovel systems», *International Journal of Mining Science and Technology*, no. 28, 2018, pp. 205-214, disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S209526861630221X> (consulta: 25 de enero de 2019).
- Organización de las Naciones Unidas, Naciones Unidas y Comisión Económica para América Latina y El Caribe, ONU-CEPAL. *Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe*, Santiago de Chile, ONU-CEPAL, 2016, disponible en: <http://www.sela.org/media/2262361/agenda-2030-y-los-objetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf> (consulta: 12 de enero de 2019).
- Organización de las Naciones Unidas, ONU. Asamblea General. Desarrollo y Cooperación Económica Internacional Medio Ambiente. *Informe de la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo. Desarrollo sustentable*, Nueva York, ONU, 1987, disponible en: [http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE\\_Lecture\\_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf](http://www.ecominga.uqam.ca/PDF/BIBLIOGRAPHIE/GUIDE_Lecture_1/CMMAD-Informe-Comision-Brundtland-sobre-Medio-Ambiente-Desarrollo.pdf) (consulta: 28 de enero de 2019).
- Rehner, Johannes y Vergara, Felipe. «Efectos recientes de la actividad exportadora sobre la reestructuración económica urbana en Chile», *Revista de Geografía Norte Grande*, no. 59, 2014, pp. 83-103.
- República de Chile-Ministerio de Hacienda. República de Chile-Ministerio de Hacienda. *Decreto con fuerza de ley [por el que se] crea la Empresa Nacional de Minería*, 29 de febrero de 1960, disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=4836> (consulta: 12 de marzo de 2018).
- República de Chile-Ministerio de Minería. *Decreto con fuerza de ley [por el que se] crea la Corporación Nacional del Cobre de Chile*, 28 de febrero de 1976, disponible en: <https://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=4836> (consulta: 12 de diciembre de 2018).
- República de Chile-Ministerio de Minería, MinMinería. *Historia de la minería en Chile*, Santiago de Chile, MinMinería, 2018, disponible en: <http://www.minmineria.gob.cl/%C2%BFque-es-la-mineria/historia-de-la-mineria-en-chile/> (consulta: 28 de enero de 2019).
- Riestra, Lucas. «Las dimensiones del desarrollo sostenible como paradigma para la construcción de las políticas públicas en Venezuela», *Tekhné*, vol. 21, no. 1, 2018, pp. 24-33, disponible en: <http://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/temas/index.php/tekhne/article/download/3543/30> (consulta: 25 de enero de 2019).

Seal, Robert y Hammarstrom, Jane. «Geoenvironmental models of mineral deposits: examples from massive sulfide and gold deposits», en: Jambor, John; David Blowes y Ritchie Ian (eds.). *Environmental aspects of mine wastes. Short Course Series*, Vancouver, Mineralogical Association of Canada, 2003, pp. 11-50.

Servicio de Impuestos Internos-Chile, SII. *Estadísticas de empresas por rubro, subrubro y actividad económica*, Santiago de Chile, SII, 2016, disponible en: [http://www.sii.cl/estadisticas/empresas\\_rubro.htm](http://www.sii.cl/estadisticas/empresas_rubro.htm) (consulta: 12 de enero de 2019).

Silva Flores, Consuelo y Lara Cortés, Claudio. «¿El fin del superciclo del cobre y de las reformas sociales en Chile?», *Textos & Contextos (Porto Alegre)*, vol. 16, no. 2, 2017, pp. 479-494.

Tourinho, Octavio. *The valuation of reserves of natural resources: An option pricing approach*, Tesis Doctoral Inédita, University of California, Berkeley, 1979.

United States Geological Service, USGS. *Mineral commodity summaries*, Washington, USGS, 2018.