

# Hacia una minería 4.0

Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente



## SOBRE CESCO

El Centro de Estudios del Cobre y la Minería es una organización sin fines de lucro independiente y pluralista, con sede en Chile. Establecida en 1984 como una asociación de profesionales del sector, promueve la legitimidad social y políticas públicas sólidas en la industria minera en países donde la minería es estratégica para su desarrollo. Además de monitorear, proporcionar información y análisis de calidad, apoya y promueve actividades que fomenten el diálogo entre los distintos stakeholders tanto de la industria minera como de la sociedad civil. Sus principales eventos públicos son la Semana del Cesco en Santiago y Asia Copper Week en Shanghai.

Para más información sobre Cesco, visite [www.cesco.cl](http://www.cesco.cl)



@CentroCESCO

# Hacia una minería 4.0

Recomendaciones para impulsar una  
industria nacional inteligente

# Índice

Prólogo .....	5
Resumen ejecutivo .....	6
El largo camino hacia la modernidad tecnológica en la industria minera .....	10
Penetración de las tecnologías 4.0 en la industria minera internacional .....	17
Desafíos y obstáculos para alcanzar una operación inteligente .....	34
Principales conclusiones y recomendaciones .....	54

# Prólogo

El Centro de Estudios del Cobre y la Minería es un espacio independiente y plural, que promueve la legitimidad social y confianza del país en su minería. Bajo este concepto, es que como Centro hemos buscado la forma de apoyar e impulsar, a través de la propuesta de políticas públicas, el desarrollo de la industria.

Como institución, nos impusimos como meta el crear este informe para entender de qué forma el Estado y los distintos entes no gubernamentales -universidades, centros de investigación, proveedores, y el sector minero en sí mismo- pueden encontrar mecanismos para la incorporación de nuevas tecnologías enmarcadas en la Revolución Industrial 4.0, que permitan mejorar el desempeño de las faenas, tanto desde el punto de vista productivo, como medioambiental y de seguridad, entre otros.

Bajo esta premisa es que se conformó un grupo de trabajo que contó con participantes con conocimiento o experiencias en el ámbito de las nuevas tecnologías asociadas a la Revolución Industrial 4.0, y cómo impactan o impactarían en la industria minera.

La Comisión de trabajo tuvo como objetivo identificar las oportunidades, riesgos y barreras de la implementación de las tecnologías de automatización, digitalización e inteligencia artificial en la industria minera del cobre, y establecer una línea base o diagnóstico del rol de estas tecnologías en su aplicación actual, para luego discutir de manera fundada el rol que la tecnología podría tener en el futuro de mediano y largo plazo (entre 5 y 10 años).

Agradecemos el trabajo realizado por:

Nicolás Jubera, CEO de TI Mining.

José Joaquín Jara, Director Cesco y académico PUC.

Darko Louit, CEO Komatsu Cummins Chile.

Cristian Barrientos, Superintendente Gestión y Programación Operativa Minera Los Pelambres.

Sebastián Carmona, Gerente de Innovación de Codelco.

Osvaldo Urzúa, Director Cesco, consultor.

Pablo Klein, Superintendente de Mejora Continua de Centinela.

Leopoldo Reyes, Presidente del Directorio de Cesco.

Juan Ignacio Guzmán, Gerente General de GEM.

# Resumen Ejecutivo

La relación dicotómica de la minería con la tecnología es histórica. Por un lado, el sector ha sido muy conservador al momento de incorporar nuevas soluciones tecnológicas en sus operaciones, pero por otro, éste ha jugado un rol esencial en cada revolución tecnológica debido al gran consumo de *commodities* que cada una ha impulsado. Sin minería, no hay nuevas tecnologías.

Con tres revoluciones industriales a cuestas, hoy el sector enfrenta un momento clave para avanzar hacia una minería 4.0. Pero este camino ha sido dispar para la gran minería en todo el mundo. Mientras existen empresas que han puesto en el centro de su core business la incorporación de tecnologías de la hoy llamada Cuarta Revolución Industrial -como es el caso de Anglo American y su proyecto FutureSmart Mining™, Rio Tinto con Mine of the future®, o Codelco con los Centros Integrados de Operaciones-, otras aún consideran que estas tecnologías no forman parte de la esencia de su negocio y por lo tanto se han mantenido alejados de estos avances.

Para identificar el grado de incorporación de estas nuevas soluciones tecnológicas que forman parte de la Cuarta Revolución y su penetración en la industria internacional minera, con el objeto de contribuir a identificar las barreras a su adopción, es que el Centro

de Estudios del Cobre y la Minería, Cesco, formó una Comisión denominada Minería 4.0, la que fue integrada por miembros con alto conocimiento tecnológico en el sector.

La Comisión, luego de sesionar entre los meses de junio y diciembre de 2019, logró identificar 77 soluciones asociadas a: Tecnologías computacionales, Blockchain, Internet de las cosas, Inteligencia artificial y robótica, Materiales avanzados, Manufactura aditiva, Biotecnología, Realidad virtual y aumentada, y Captura, almacenamiento y transmisión de energía .

Sumado a esto, se definieron distintos criterios para establecer el estado de penetración de estas tecnologías en las cuatro etapas de la cadena de valor del negocio minero: Exploración y Geociencias, Extracción, Procesamiento y Servicios.

## Criterios

Primero, se definió el **Estatus** de la solución, que responde a la pregunta sobre qué tan avanzada está la incorporación de esa tecnología en la faena. Su clasificación se definió en base a una escala de 1 a 4, donde 1 implica que la tecnología está en evaluación o estudio; 2, la tecnología está implementándose en una operación; 3, la tecnología ha sido implementada en pocas operaciones; y 4, la tecnología ha sido

\* Para el economista y fundador del Foro Económico Mundial, Klaus Schwab, existen doce grupos de tecnologías. Además de los grupos mencionados, están las tecnologías asociadas a la neurotecnología, la geoingeniería, y las Tecnologías espaciales. Esto será profundizado en el presente documento.

implementada en numerosas operaciones.

Segundo, se definió la **Mejora Esperada**, que considera el potencial impacto que tendrá esa tecnología en la cadena de valor de la mina. También se definió una escala de 1 a 4, donde 1 implica que el impacto de la implementación de la tecnología es marginal, no teniendo mayor relevancia en la cadena de valor; 2, el impacto de la implementación es incremental, con un potencial de mejora pequeño dentro de la cadena de valor de la mina; 3 el impacto de la implementación de la tecnología es sustantiva, teniendo un potencial significativo en la cadena de valor; y 4, el impacto de la implementación de la tecnología es transformacional, cambiando la forma de hacer minería y obteniendo grandes resultados de mejora en la cadena de valor de la mina.

Tercero, se caracterizó el entusiasmo sobredimensionado y la subsiguiente decepción que habitualmente ocurre cuando se incorpora una nueva tecnología en un proceso, de acuerdo al **Ciclo de Sobreexpectativas** definido por la consultora norteamericana Gartner.

De acuerdo a esta clasificación, existen 5 etapas en el proceso: la etapa 1, es el “Gatillante de la innovación”, el que genera un alto interés entre los consumidores; la etapa 2 es el “Pico de expectativas sobredimensionadas”, y es el

entusiasmo poco realista entre los consumidores por el nuevo avance tecnológico; la etapa 3, que consiste en la entrada de la tecnología a un “Abismo de desilusión” al no cumplir con las altas expectativas generadas en el consumidor; la etapa 4, o “Rampa de consolidación”, en la que la nueva tecnología ya no es una novedad, pero las empresas siguen experimentando con ésta para identificar los beneficios que pueda proporcionar dicha tecnología; y por último la etapa 5, donde la tecnología se consolida, alcanzando la “Meseta de productividad”. Sus beneficios ya son ampliamente aceptados, y evoluciona a una segunda y tercera generación.

Por último, se definieron **cuatro grupos** para clasificar el estado de avance de la incorporación de las tecnologías en las etapas del ciclo minero. En el Grupo I se identifican aquellas tecnologías que hoy se encuentran a nivel piloto, o que recién están implementándose en una faena, son inmaduras desde el punto de vista de la implementación en la industria, pero son maduras desde el punto de vista tecnológico.

En el Grupo II se ubican aquellas tecnologías que han superado el abismo de la desilusión, por lo que son consideradas tecnologías maduras que ya han comprobado su eficacia, y que además han sido ampliamente incorporadas a la industria minera.

En el Grupo III se encuentran aquellas tecnologías que son inmaduras a nivel global, donde hay altas expectativas respecto a su uso, pero que, a su vez, en la industria minera están ampliamente incorporadas.

En el Grupo IV están las tecnologías que son inmaduras, y que además no han sido implementadas en la minería.

En base a esta caracterización, la Comisión identificó que el estado de avance en la penetración de las tecnologías en la gran minería a nivel mundial es bastante heterogéneo.

### Penetración en la industria, brechas y desafíos

En Exploración y Geociencias, la Comisión logró identificar 7 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial. Se está frente a soluciones que, en cuanto a su Mejora Esperada es Marginal o Incremental. A su vez, la incorporación de estas tecnologías, en su mayoría, están en una etapa muy temprana de incorporación en faena, por lo que hay pocas mineras que hoy hacen uso de esas tecnologías.

En el caso de la Extracción, donde se identificaron 17 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial, se encuentran soluciones con variados estados de penetración en la industria, por lo que es posible encontrar tecnologías en

los distintos Grupos definidos por la Comisión.

En cuanto a Procesamiento, donde se encontraron 16 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial, se identificó que un porcentaje importante de éstas se encuentran en el Grupo II de la clasificación de la Comisión, por lo que son tecnologías maduras, que han logrado penetrar en la industria de una forma más masiva. Acá también es posible encontrar tecnologías cuya Mejora Esperada es Sustantiva y Transformacional.

Por último, en Servicios, se encontraron 26 tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial, donde la mayoría se reparte en los Grupos IV y II. Esto quiere decir que un número importante de tecnologías se encuentra en un estado inmaduro y de poca penetración en la industria, mientras que, en contraste, hay otro porcentaje relevante de tecnologías maduras y con un alto nivel de penetración en faena.

En base a este análisis, la Comisión hizo una revisión de los principales obstáculos que se enfrenta en la industria al momento de incorporar nuevas tecnologías, y la responsabilidad de los actores involucrados en el proceso.

Entre dichos obstáculos están: Cultura organizacional, Conocimiento, CAPEX, No se considera core del negocio, Tecnología poco robusta, Información propiedad del

fabricante, Conectividad insuficiente, Requiere otras tecnologías, OPEX, y Masificación de la tecnología. Mientras que los actores involucrados para enfrentar estas brechas son la Empresa Minera, los Proveedores, la Academia y el Estado.

### Principales recomendaciones

Todos los actores involucrados en el proceso para dar el salto tecnológico necesario y lograr contar con una minería 4.0, tienen un rol que cumplir.

En el caso del papel de la Empresa Minera, la Comisión ha recomendado que haya un cambio en el método de evaluación para decidir si se realiza o no una inversión para incorporar nuevas soluciones tecnológicas, que usualmente no han sido probadas a gran escala

Por su parte, las empresas de Proveedores tienen una gran responsabilidad no solo en seguir avanzando hacia tecnologías más

robustas, confiables y de menor costo para que el CAPEX sea más bajo, sino que también tienen un rol en el conocimiento y en la generación de su propio cambio cultural, para generar nuevas tecnologías en sus propios servicios, aunque el cliente no lo requiera de forma explícita.

En cuanto a la Academia, al ser el motor intelectual de la sociedad, juega un rol fundamental en la generación de nuevas soluciones que excedan las capacidades de la industria. Este conocimiento debe ser impartido a nivel de alumnos de carreras asociadas a la minería que hoy no están siendo formado en estas nuevas tecnologías

Y por último el Estado, a través de los distintos mecanismos de financiamiento de los que dispone, puede generar instrumentos que permitan potenciar el conocimiento de este tipo de tecnologías en la industria, y desarrollar las capacidades y habilidades asociadas al conocimiento.

El largo camino hacia la modernidad  
tecnológica en la industria minera

La historia nos ha demostrado que la minería ha sido conservadora al momento de incorporar nuevas tecnologías en sus operaciones. Sin embargo estamos frente a una nueva revolución industrial, donde la masificación de la tecnología y el acceso a internet se presentan como una oportunidad para que el sector sea parte de esta nueva tendencia.

Un cambio radical. Esa es la mejor forma de definir una revolución. Y la historia de la humanidad ha estado marcada por miles de hitos de este tipo, que han ayudado a dar un giro a la sociedad.

En el caso de la economía, estas revoluciones han estado ligadas a la irrupción de nuevas tecnologías y nuevas percepciones del mundo, desencadenando un cambio sin precedentes tanto en el mercado como en la sociedad.

En ese contexto, es que se han definido cuatro grandes revoluciones industriales que han impulsado un cambio en el paradigma de la producción, y la relación social que existe con la economía. De ellas se ha hablado largamente, sin embargo, vale la pena revisar el impacto que tuvieron en su momento en el sector minero.

### [El impacto de las revoluciones industriales en la minería](#)

Es de conocimiento común que la **Primera**

**Revolución Industrial** inició con la creación de la máquina a vapor, y que se concretó entre 1760 y 1840. Esto permitió mecanizar muchos procesos y marcando un antes y un después en la historia.

Sin embargo, pocas personas saben que la primera máquina de este tipo se creó para la minería.

El mecánico inglés Thomas Savery patentó en 1688 la primera máquina de vapor de la historia. Consistía en un sistema para elevar agua, un gran problema para las faenas de la época, que no lograban extraer el líquido en esas profundidades.

Savery logró solucionar este problema gracias a un sistema consistente en un depósito conectado a una caldera, y a dos tuberías, una de ellas era conectada al agua de la mina que se pretendía extraer y otra al exterior.

Lamentablemente el sistema no se masificó al resto de las faenas en Reino Unido. Sin embargo,

y luego de múltiples mejoras, este sistema dio paso a la máquina a vapor impulsada por James Watt, y que permitió la concreción de la Primera Revolución Industrial, disparando de paso el consumo de hierro y carbón, minerales clave para su éxito.

De esta forma, la minería debió dar respuesta al fuerte consumo de estos minerales, pero de forma tardía incorporó nuevas tecnologías en sus procesos. Un ejemplo de esto es que, hacia 1839, y ya finalizando la Primera Revolución, se implementó recién la pala de vapor en esta industria.

La **Segunda Revolución Industrial**, que se llevó a cabo entre 1860 y 1920, está asociada a la electricidad, los ensamblajes en línea y la producción en masa. Este conjunto de factores facilitó, por ejemplo, el desarrollo del automóvil.

Uno de los impactos positivos que tuvo esta Segunda Revolución, fue el fuerte impulso en el consumo de *commodities*, especialmente hierro, cobre, petróleo, y nitratos, entre otros. El cobre en particular, fue fundamental para la masificación de la electricidad para uso público después de 1870, y hasta el día de hoy, gran parte del consumo del mineral rojo

ha sido demandado para este fin.

Este *boom* en el consumo de minerales empujó el desarrollo de la industria minera, obligando al sector a incorporar nuevas tecnologías para dar respuesta a las necesidades del mercado. Sin embargo, éstas recién estaban incorporando de manera masiva las tecnologías de la Primera Revolución. Un ejemplo de aquello es la invención de las correas transportadoras movidas a vapor, lo que facilitó dar respuesta a las necesidades del mercado por más minerales, pero como se mencionó con anterioridad, era parte de las tecnologías de la Primera Revolución.

Para mediados del siglo XX, la industria minera recién incorporó de manera masiva las tecnologías de la Segunda Revolución Industrial. La incorporación de la electricidad en las faenas se empezó a masificar, al igual que las telecomunicaciones.

Con la electricidad, la creación de nuevas tecnologías parecía no tener límite. Entre 1940 y 1970, se concreta la **Tercera Revolución Industrial**, impulsada principalmente por la computación, la automatización y la robótica, el láser, y la energía nuclear.

Paralelamente, en la minería recién se estaba



*Pocas personas saben que la primera máquina de este tipo se creó para la minería. El mecánico inglés Thomas Savery patentó en 1688 la primera máquina de vapor de la historia. Consistía en un sistema para elevar agua, un gran problema para las faenas de la época”.*

masificando el uso de camiones en faena. Resulta curioso, tomando en cuenta que el petróleo se estaba produciendo desde 1870. Esta brecha temporal fue de más de 60 años.

Al igual que las primeras revoluciones, la Tercera Revolución Industrial trajo consigo un fuerte impacto en el consumo de *commodities*, como el aluminio, el petróleo, y el uranio, este último esencial para el desarrollo de energía nuclear.

## La Cuarta Revolución Industrial

Aún es materia de discusión cuáles son las tecnologías que pertenecen a la Revolución Industrial 4.0. Para los fines de este documento, se tomó como guía el trabajo realizado por el economista y fundador del World Economic Forum, Klaus Schwab.

El experto antes mencionado señala que, “teniendo en cuenta las diversas definiciones y argumentos académicos utilizados para describir las tres primeras revoluciones industriales, creo que hoy estamos en los albores de una cuarta revolución industrial. Esta comenzó a principios de este siglo y se basa en la revolución digital. Se caracteriza por un internet más ubicuo y móvil, por sensores más pequeños y potentes que son cada vez más baratos, y por la inteligencia artificial y el aprendizaje de la máquina”<sup>1</sup>.

En su libro, Schwab concluye que existen 12 tipos de tecnologías asociadas a esta revolución, las que están clasificadas en cuatro grupos: el primero de ellos incluye las tecnologías digitales, blockchain, e Internet de las cosas; el segundo considera a las tecnologías con conexión física, Inteligencia Artificial con Robótica, Materiales Avanzados, y Manufactura de IT (impresión 3D); el tercero contempla tecnologías con conexión humana, biotecnologías, neurotecnologías, y realidad virtual y aumentada; y el último grupo incluye tecnología sustentable asociada a la captura y almacenamiento y transmisión de energía, a la geoingeniería, y a las tecnologías espaciales.

En contraste a lo sucedido con las primeras tres revoluciones, la minería está observando qué es lo que está pasando con esta Cuarta Revolución, y busca la forma de adecuar su proceso productivo a esta nueva realidad. Existen varios ejemplos de iniciativas que apuntan a contar con una minería inteligente a mediano plazo, que destacamos a continuación (cabe señalar que la lista en cuestión no es en ningún caso exhaustiva).

- [Mine of the Future®](#), Rio Tinto

No se trata solo de tener camiones, palas, trenes o barcos automatizados. En Rio Tinto, se han planteado el desafío de analizar toda la información obtenida por los procesos

<sup>1</sup> Schwab, Klaus, 2017. “La Cuarta Revolución Industrial”, editorial Debate.

de automatización, con análisis inteligente, inteligencia artificial, y aprendizaje automático entre otros, con el fin de contar con una faena más segura y productiva, a través del programa Mine of the Future®.

A esto se suman una serie de Centros de Excelencia focalizados en el análisis, la automatización, la gestión de activos, energía y cambio climático, conocimiento de yacimientos, minería subterránea, minería superficial y procesamiento, para alcanzar este fin. En estos centros, se reúnen expertos técnicos para definir el futuro de las operaciones de Rio Tinto alrededor de todo el mundo, gestionando de mejor forma los distintos factores de riesgo, y alcanzar la meta de contar con una mina inteligente.

En este contexto, la minería ha estado impulsando esta filosofía en su proyecto minero Koodaideri, en Australia, que entraría en operaciones en 2021, y se tratará de la primera mina inteligente de Rio Tinto y el mundo.

- [FutureSmart Mining™, Anglo American](#)

Por su parte, la centenaria empresa Anglo American, ha planteado el futuro de sus operaciones bajo el concepto de FutureSmart Mining™, con el que apunta a una minería sustentable a través de la tecnología y la digitalización, e integrarlas en las distintas

---

# 12

tipos de tecnologías están asociadas a esta Cuarta Revolución Industrial, de acuerdo al economista Klaus Schwab.

---

etapas de la cadena de valor de la empresa.

La empresa ha declarado que, con estos elementos, trabajará en conjunto con los trabajadores, las comunidades, los gobiernos locales, y otros stakeholders, para el desarrollo de una minería con una huella reducida, apoyo al desarrollo de las economías locales, y a mejorar las condiciones en las que viven las comunidades aledañas.

Este primer esfuerzo se ha concretado en la futura entrada en operaciones en 2021 del proyecto Quellaveco, mina de cobre a rajo abierto ubicada en la región de Moquegua, al sur de Perú. Quellaveco tienen una vida de reservas por 30 años, y se espera que produzca en promedio 300 mil toneladas de cobre por año en sus primeros 10 años de operación. Para concretarlo, Anglo American se ha asociado con la Corporación Mitsubishi.



*Los potenciales beneficios de implementar estas tecnologías en la industria minera entre 2016 y 2025, consideran beneficios económicos del orden de USD \$189 billones en la industria minera mundial, y USD\$ 130 billones en los metales”.*

- **Centro Integrado de Operaciones y Gestión, Codelco**

En Chile, la estatal Codelco ha incorporado el Centro Integrado de Operaciones y Gestión, o Sala CIO, que empezó a operar en 2010 en la División Andina. El sistema consiste en una sala especialmente diseñada para operar la mina a distancia, donde se registra y analiza en vivo los procesos asociados a la faena, mejorando su desempeño tanto en eficiencia como en productividad.

A División Andina, se sumó División Ministro Hales y Chuquicamata. Esta última empezó a operar durante el cuarto trimestre de 2019, modernizando la operación para el funcionamiento de la Mina Subterránea y los principales equipos de la Concentradora. Paulatinamente se sumará la Fundición y Refinería.

### **Tecnologías 4.0 asociadas a la minería**

Históricamente la minería ha sido una industria que ha sido bastante conservadora al momento de adoptar nuevas tecnologías. Sin embargo, ante las nuevas exigencias

ambientales y sociales que enfrenta el sector, así también como el imperativo de mejorar la productividad, la incorporación de estas tecnologías facilita el cumplimiento de la demanda social que enfrentamos hoy.

Algunas estimaciones internacionales que hablan de los potenciales beneficios de implementar estas tecnologías en la industria minera entre 2016 y 2025, consideran beneficios económicos del orden de USD \$189 billones en la industria minera mundial, y USD\$ 130 billones en los metales<sup>2</sup>. Hay otros beneficios no económicos asociados, como la reducción de CO2 o una mayor seguridad para los trabajadores en la operación.

Y no sólo la industria minera será beneficiada. Para Chile, esta tendencia también permite apuntar a la diversificación de la economía, si se apuesta por la creación de nuevas tecnologías en el país, las que puedan ser exportadas al resto del mundo. Es cuestión de ver el caso de Australia, que ha logrado posicionarse en el mundo tanto como país minero, como país proveedor de tecnología de punta.

<sup>2</sup> World Economic Forum- Accenture, 2017. “Digital Transformation Initiative Mining and Metals Industry”.

# Penetración de las tecnologías 4.0 en la industria minera internacional

En base a las 12 tecnologías que forman parte de la Cuarta Revolución Industrial, y en consideración a la estructura de la cadena de valor de la industria minera, es que la Comisión de Minería 4.0 identificó un conjunto de tecnologías aplicables a cada una de las etapas del negocio, desde la exploración, hasta el cierre y remediación de una faena.

Tomando como base el trabajo realizado por el economista Klaus Schwab, donde se identifican 12 tecnologías que forman parte de la Cuarta Revolución Industrial, además de la configuración de la cadena de valor de la industria minera, desde la etapa de exploración hasta el cierre y remediación de una faena, la Comisión de Minería 4.0 de Cesco pudo listar el conjunto de tecnologías que se aplicaban a cada una de esas etapas, logrando identificar 77 tecnologías asociadas.

Esta clasificación se basa en los conocimientos y experiencias con los que cuenta cada uno de los miembros que participaron en la Comisión que, si bien puede no ser exhaustivo, resulta ser una buena muestra de tecnologías a considerar.

A continuación, detallamos las tecnologías identificadas, las que se dividen en cuatro grupos: Exploración y Geociencias; Extracción; Procesamiento y Servicios.

Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial		Exploración y Geociencias	Extracción
Digital	Computacionales	Análisis multivariantes; Monitoreo geotécnico en línea; Simulación de depósitos	Modelamiento avanzado en perforación; Modelamiento avanzado en tronadura
	Blockchain		
	Internet of Things	Captura de información <i>in situ</i>	Análisis de muestras <i>in situ</i> / Operación autónoma; Carga inteligente de explosivos; Captura de información <i>in situ</i> / Operación autónoma en carguío; Operación semiautónoma / Captura de información <i>in situ</i> / Operación autónoma / Sistema activo anticollisión / Operación semiautónoma en Transporte
Conexión física	IA & Robótica	Uso de IA para filtrar alarmas (asistencia experta); Captura de información geofísica (drones)	Operación autónoma en perforación; Operación asistida en carguío; Operación autónoma en transporte
	Materiales avanzados	Nuevos materiales para brocas; Nuevos elementos de desgaste	
	Manufactura aditiva		
Conexión humana	Bioteología		
	Neuroteología		
	Realidad virtual y aumentada	Modelamiento geológico	Entrenamiento de operación de carguío; Entrenamiento de operación de transporte
Sustentabilidad	Captura, almacenamiento y transmisión de energía		Equipos eléctricos /equipos híbridos (trolley assist); Fuel cells / equipos
	Geoingeniería		
	Tecnologías espaciales		

Fuente: elaboración propia

Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial		Procesamiento	Servicios
Digital	Computacionales	Reconocimiento de imágenes; Monitoreo en línea en: Molienda, Flotación, Lixiviación, Fundición, Refinación, SX, EW	SAP/ERP/Centro de distribución automatizada (picking automático); Simulación de Mont Carlo; Monitoreo condición Mantenición; Modelamiento hidrogeológico; Monitoreo condición Servicios Mina; Monitoreo sísmico; Monitoreo en línea de estabilidad de tranques; Monitoreo de acidez de agua
	Blockchain		MineHub, WEF para trazabilidad
	Internet of Things	Medición <i>online</i> de <i>performance</i> / Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores) / Operación remota en: chancado y molienda	Medición <i>online</i> de <i>performance</i> / Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores) / Operación remota; Monitoreo en línea y operación asistida (fundiciones y polvo de minas); Control activo asociado a los sistemas de <i>collision avoidance</i>
Conexión física	IA & Robótica	Sistema experto / <i>Machine learning</i> / Brazo robótico para cambio de revestimiento de corazas / Apernado; Sistema experto / <i>Machine learning</i> ; Monitoreo de condición de pilas (drones); Despegadora de cátodos robotizada.	Modelos de falla predictiva / Uso de drones para envío de repuestos
	Materiales avanzados	Nuevos elementos de desgaste; Nuevos materiales para bolas	
	Manufactura aditiva		Impresión de elementos para la construcción modular en proyectos; Impresión 3D metálica de repuestos en mantención
Conexión humana	Bioteología	Biolixivación de sulfuros	Biocementación
	Neuroteología		Smartcab / Chalecos inteligentes
	Realidad virtual y aumentada		Entrenamiento y ejecución de mantenimiento
Sustentabilidad	Captura, almacenamiento y transmisión de energía	Correa regenerativa	Uso de energía renovables / Transporte de personal con vehículos eléctricos
	Geoingeniería		
	Tecnologías espaciales		

Fuente: elaboración propia

Una vez reconocidas estas tecnologías, se procedió a identificar cuáles de éstas han sido implementadas, o están siendo evaluadas para ser implementadas en la industria minera internacional. Como ya ha sido mencionado con anterioridad, esta lista se desarrolló en base al conocimiento y experiencia del equipo de trabajo que conformó la Comisión.

## Metodología de trabajo

Si bien algunas de estas tecnologías están bastante incorporadas al funcionamiento de las faenas en el mundo, hay otras que aún están en etapa de estudio. Para evaluar esta situación en las cuatro etapas de la cadena de valor de la industria minera anteriormente identificadas, se tomaron en cuenta tres criterios:

### 1. Estatus

El estatus consiste en evaluar qué tan avanzada está la incorporación de una tecnología en particular a 2019 en distintas faenas. Dicha evaluación se hizo con una escala del 1 al 4:

- Estatus 1: La tecnología está en evaluación o estudio.
- Estatus 2: La tecnología está implementándose en una operación.
- Estatus 3: La tecnología ha sido implementada en pocas operaciones.

- Estatus 4: La tecnología ha sido implementada en numerosas operaciones.

### 2. Mejora Esperada

La Mejora Esperada consiste en identificar cómo será el impacto que tendrá esa tecnología en la cadena de valor de la mina. Al igual que el criterio de Estatus, la Mejora Esperada también está evaluada en una escala del 1 al 4:

- Mejora Esperada 1: El impacto de la implementación de la tecnología es marginal, no teniendo mayor relevancia en la cadena de valor.
- Mejora Esperada 2: El impacto de la implementación de la tecnología es incremental, con un potencial de mejora pequeño dentro de la cadena de valor de la mina.
- Mejora Esperada 3: El impacto de la implementación de la tecnología es sustantiva, teniendo un potencial significativo en la cadena de valor.
- Mejora Esperada 4: El impacto de la implementación de la tecnología es transformacional, cambiando la forma de hacer minería y obteniendo grandes resultados de mejora en la cadena de valor de la mina.

Cabe mencionar que, si bien varias de las

tecnologías que aquí se presentan por sí solas pueden ser evaluadas con una Mejora Esperada de 1 o 2, lo cierto es que, si estas tecnologías se toman en su conjunto, pueden volverse Transformacionales para una faena, por lo que, si bien en un principio su aplicación es poco atractiva para el negocio minero, incorporarlas es un paso necesario para dar el gran salto a una mina inteligente.

### 3. Ciclo de sobreexpectativas

En 1995, la empresa consultora y de tecnología estadounidense Gartner, realizó una presentación gráfica de lo que ellos llamaron el Ciclo de sobreexpectativas, que consiste en una forma de caracterizar el entusiasmo sobredimensionado y la subsiguiente decepción que habitualmente ocurre cuando se incorpora una nueva tecnología en un proceso.

---

## 5

etapas son las que conforman el Ciclo de sobreexpectativas creado por la empresa consultora y de tecnología Gartner.

---

De acuerdo a esta representación, el Ciclo de sobreexpectativas se compone de cinco fases, las que también han sido aplicadas a la clasificación de las 77 tecnologías identificadas por la Comisión, y que se evalúan en base a una escala de 1 a 5:

- Etapa 1: La primera fase de este ciclo es el “Gatillante de la innovación”, el que genera un alto interés entre los consumidores.
- Etapa 2: La segunda fase es el “Pico de expectativas sobredimensionadas”, y es el entusiasmo poco realista entre los consumidores por el nuevo avance tecnológico. En el caso de las tecnologías desarrolladas para el público en general (celulares, tabletas, etc.), este entusiasmo se ve exacerbado por los medios de comunicación.
- Etapa 3: Poco después del lanzamiento de la tecnología, ésta entra en un “Abismo de desilusión” al no cumplir con las altas expectativas generadas en el consumidor.
- Etapa 4: Si bien la nueva tecnología ya no es una novedad, las empresas siguen experimentando con ésta para identificar los beneficios que pueda proporcionar dicha tecnología. Esta etapa se conoce como “Rampa de consolidación”.

• Etapa 5: La tecnología se consolida, alcanzando la “Meseta de productividad”. Sus beneficios ya son ampliamente aceptados, y evoluciona a una segunda y tercera generación.

Tomando en cuenta estos tres criterios, fue posible posicionar las tecnologías asociadas a la cadena de valor de la industria minera para realizar un diagnóstico en cuanto al estado de implementación de éstas.

### Gráfico de Gartner



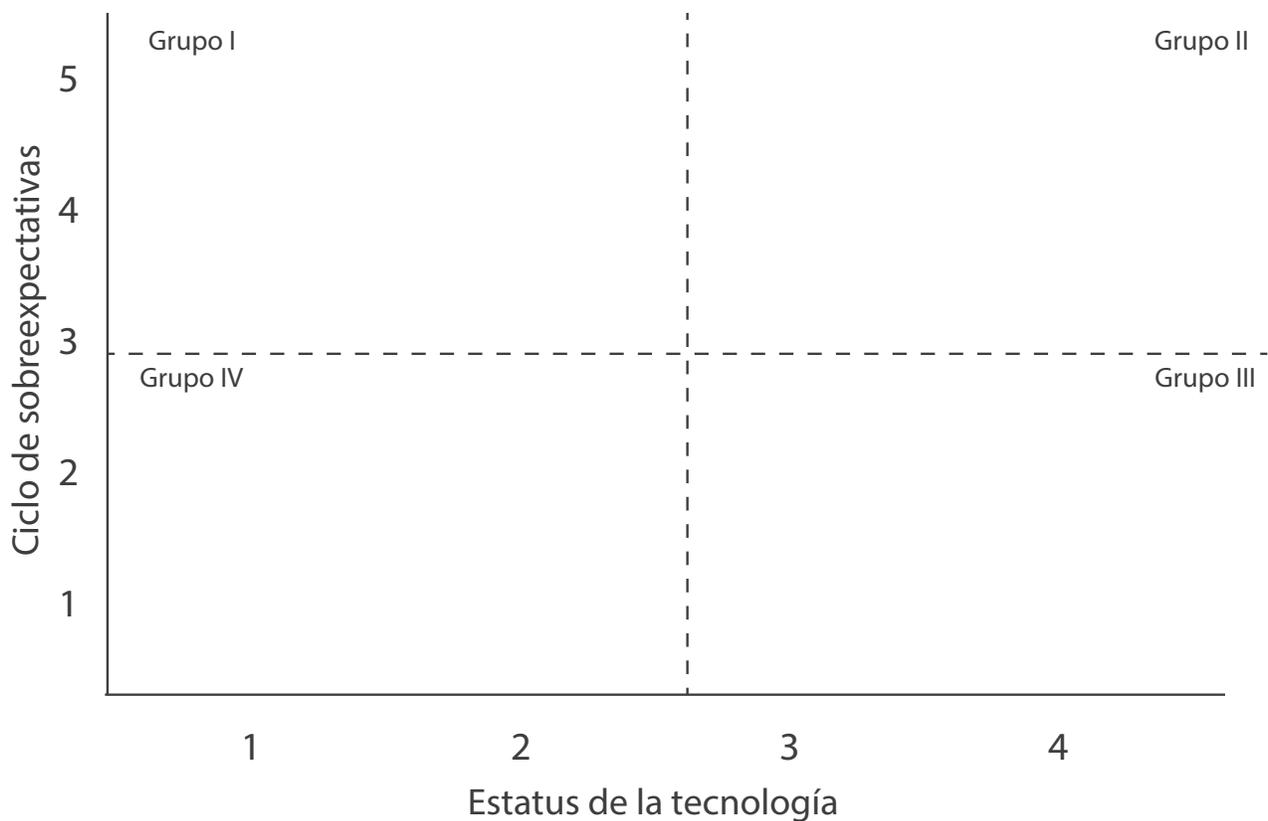
Fuente: Consultora Gartner

Para efectos de este documento se trabajó dicho posicionamiento en el siguiente gráfico, que además considera cuatro grupos para clasificar el estado de avance de la incorporación de las tecnologías en las etapas del ciclo minero, y así poder identificar dónde

hace falta generar políticas que potencien el uso de éstas.

En el **Grupo I** se identifican aquellas tecnologías que hoy se encuentran a nivel piloto, o que recién están implementándose en una faena.

### Gráfico referencial



Mejora esperada

- 1 Marginal
- 2 Incremental
- 3 Sustantiva
- 4 Transformacional

Fuente: elaboración propia

Son inmaduras desde el punto de vista de la implementación en la industria, pero son maduras desde el punto de vista tecnológico, ya que han superado el abismo de desilusión, por lo que se comprende que, si bien son tecnologías disponibles en el mercado, no necesariamente han sido incorporadas en la minería. Si el aporte a la cadena de valor de las tecnologías ubicadas en este grupo es significativo, debiese ser cuestión de tiempo para que las propias empresas incorporen la solución en el mercado porque ya están disponibles.

En el **Grupo II** se ubican aquellas tecnologías que han superado el abismo de la desilusión, por lo que son consideradas tecnologías maduras que ya han comprobado su eficacia, y que además han sido ampliamente incorporadas a la industria minera. En este grupo, se puede hablar de tecnologías maduras y donde es cuestión de tiempo para que sean incorporadas por la mayoría de las faenas de la gran minería, por lo que solo habría que dejar que el mercado opere libremente.

En el **Grupo III** se encuentran aquellas

tecnologías que son inmaduras a nivel global, donde hay altas expectativas respecto a su uso, pero que, a su vez, en la industria minera están ampliamente incorporadas. Para lograr que las tecnologías ubicadas en este grupo pasen al Grupo II, sería necesario considerar la asociación de la industria con centros de tecnología, la academia o proveedores que se encuentren desarrollando estas tecnologías para potenciar su uso.

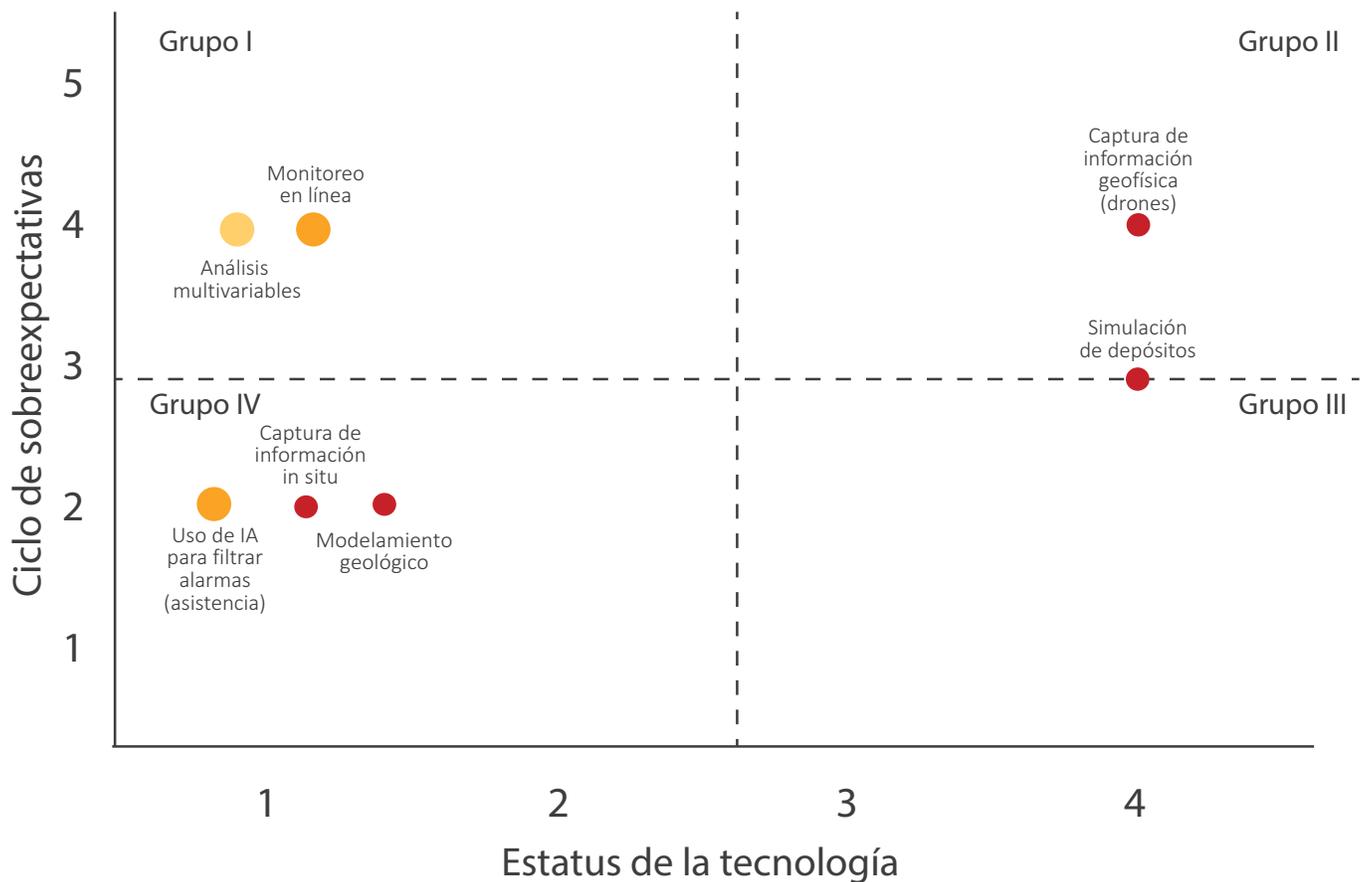
En el **Grupo IV** están las tecnologías que son inmaduras, y que además no han sido implementadas en la minería. En este grupo el desafío es significativamente mayor, porque acá la industria minera está consciente de que es necesario hacer madurar la tecnología, pero no se está implementando, por lo que se requeriría crear mayor conocimiento al respecto para que así la industria comprenda el valor que existe al implementar estas soluciones.

Dicho esto, se presenta el diagnóstico realizado por la Comisión en cada una de las etapas de la cadena de valor mencionadas al principio de este capítulo.

# Exploración y Geociencias

Dentro de esta etapa de la cadena de valor del negocio minero, se encontraron cuatro procesos: Geoquímica, Geotecnia, Sondajes / Geología y Análisis de laboratorio. En éstos, se identificaron siete tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial.

Gráfico Exploración y Geociencias



## Mejora esperada

○ 1 Marginal   ○ 2 Incremental   ○ 3 Sustantiva   ○ 4 Transformacional

## Proceso identificado



Geoquímica



Sondaje / Geología



Geotecnia



Análisis de laboratorio \*

Fuente: elaboración propia

En la etapa de Exploración y Geociencias, se puede identificar que en el Grupo I se ubican tecnologías de los procesos de Geoquímica y Geotecnia, correspondientes a Análisis multivariantes y Monitoreo en línea respectivamente, y donde ambas tienen una Mejora Esperada de carácter Incremental. Se trata de tecnologías relativamente maduras, y con las que aún se pueden probar nuevos usos para lograr todo su potencial, por lo que eventualmente deberían ser incorporadas en el sector minero.

Por otro lado, en el Grupo II, se encuentran dos tecnologías asociadas al proceso de Sondaje / Geología, las que son de Captura de información geofísica a través del uso de drones, y la Simulación de depósitos. Ambas tecnologías son maduras, y están ampliamente incorporadas en el sector. Sin embargo, su aporte se considera marginal a la cadena de valor.

En el Grupo IV, donde se ubican tecnologías inmaduras y que no han sido incorporadas en el sector, podemos encontrar una solución asociada al proceso de Geotecnia, como es el Uso de Inteligencia Artificial para filtrar alarmas (asistencia experta) y cuya Mejora Esperada es Incremental; y tecnologías asociadas al proceso de Sondaje / Geología, específicamente tecnología de Captura de información *in situ* y Modelamiento geológico, ambas con una Mejora Esperada considerada Marginal. En este grupo se concentran tecnologías donde la industria debe hacer un esfuerzo por incorporarlas, y así lograr su madurez, ya que, como se mencionó con anterioridad, la suma de estas tecnologías es la que genera un impacto en el desarrollo de una faena inteligente.

En el caso del proceso de Análisis de Laboratorio, no se encontraron tecnologías relacionadas a la Cuarta Revolución Industrial.

# Extracción

En esta etapa de la cadena de valor del negocio minero, se encontraron cuatro procesos: Perforación, Tronadura, Carguío y Transporte, donde se identificaron 17 tecnologías<sup>3</sup> asociadas a la Cuarta Revolución Industrial.



## Mejora esperada

- 1 Marginal
- 2 Incremental
- 3 Sustantiva
- 4 Transformacional

## Proceso identificado

- Perforación
- Tronadura
- Carguío
- Transporte

Fuente: elaboración propia

<sup>3</sup> La Comisión identificó, dentro del Proceso de Carguío, la tecnología de Operación asistida. Esta no fue identificada en el Ciclo de sobreexpectativas. Sin embargo, su estatus es de Estudio (1), y su Mejora Esperada es Marginal. Asimismo, identificó la tecnología de Operación autónoma, cuya Mejora Esperada es Marginal.

En Extracción, es posible encontrar al menos seis tecnologías que tienen un grado de madurez alto, donde cuatro de ellas están ampliamente implementadas en la industria minera, aunque su Mejora Esperada es Marginal: hablamos de Nuevos materiales para brocas en el proceso de Perforación; Nuevos elementos de desgaste y equipos eléctricos en Carguío; y Operación autónoma en Transporte. Todas ellas se ubican en el Grupo II, por lo que es cuestión de tiempo para que su incorporación en faena sea transversal.

En el caso del Grupo I, donde se ubican tecnologías maduras, pero poco incorporadas en el sector minero, se encuentran tres tecnologías que para la industria tienen una Mejora Esperada Marginal, en el proceso de Transporte: Operación autónoma, Captura de información *online* y Equipos híbridos. Si bien son tecnologías que han demostrado su valor, aún en la industria no están mayormente incorporadas, por lo que cabe preguntarse qué hace falta para que su uso sea generalizado.

Por otro lado, en la etapa de Extracción, es posible encontrar varias tecnologías que son inmaduras, pero que están bastante incorporadas en la industria minera, y que

se ubican en el Grupo III. Estas tecnologías son: Operación autónoma en Perforación; Entrenamiento de operación, Captura de información *in situ* y Operación semiautónoma en el proceso de Carguío; y Entrenamiento de operación en Transporte. Tomando en cuenta esto, podemos decir que la industria está siendo pionera en la incorporación y desarrollo de estas tecnologías, y que a lo mejor no se encuentran de forma masiva en el mercado.

En el caso del Grupo IV, se encuentran las siguientes soluciones: Carga inteligente de explosivos y Modelamiento avanzado en Tronadura; Análisis de muestras *in situ* y Modelamiento avanzado en Perforación; y Fuel cells y Equipos eléctricos en Transporte. Respecto a esta última en particular, clasificada con una Mejora Esperada Sustantiva, es interesante que sea una tecnología inmadura y que ha sido poco incorporada en la industria, pese a su potencial aporte de valor. Situación similar ocurre con otras soluciones consideradas con una Mejora Esperada Incremental, y que para que se ubiquen en el Grupo II, estamos frente a un desafío doble, que es un mayor desarrollo de tecnología y a su vez, implementarla en la industria.



En la etapa de Procesamiento se observa una concentración de tecnologías en el Grupo II del gráfico, lo que se debe asociar a una alta implementación de soluciones en la industria, y que éstas se encuentran maduras en el mercado. También es posible observar que la Mejora Esperada en estas tecnologías varía, como es el caso de las Mejoras consideradas Marginales, asociadas a las soluciones de: Nuevos elementos de desgaste, Reconocimiento de imágenes y Medición *online* de *performance*, Operación remota y Correa regenerativa, todas ellas parte del proceso de Chancado; Monitoreo remoto y diagnóstico (Sensores) y Operación remota en Molienda; Monitoreo en línea y Despegadora de cátodos robotizado, en EW; y Monitoreo en condiciones de pilas (drones) en Lixiviación.

En este mismo grupo se encuentran tecnologías con Mejoras consideradas Incrementales: Nuevos materiales para bolas en Molienda, y Monitoreo en línea en Flotación.

A diferencia de las etapas analizadas con anterioridad, acá es posible encontrar 3 tecnologías maduras, altamente incorporadas en la industria, y que además tienen una Mejorada esperada Sustantiva y Transformacional: Medición *online* de *performance* y Monitoreo en línea en Molienda; y Biolixiviación de sulfuros en Lixiviación, siendo esta última considerada Transformacional.

En cuanto al resto de las tecnologías, las que son consideradas con una Mejora Esperada Marginal, encontramos cinco soluciones ubicadas en los Grupos I, III y IV. En el caso del Grupo I, se ubica el Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores) en Chancado, lo que quiere decir que es una tecnología madura, pero que en el sector aún está en etapa de estudio. Como contraste, encontramos en el Grupo III la solución de Monitoreo en línea en Lixiviación, una tecnología más bien inmadura, pero que está implementada en algunas faenas.

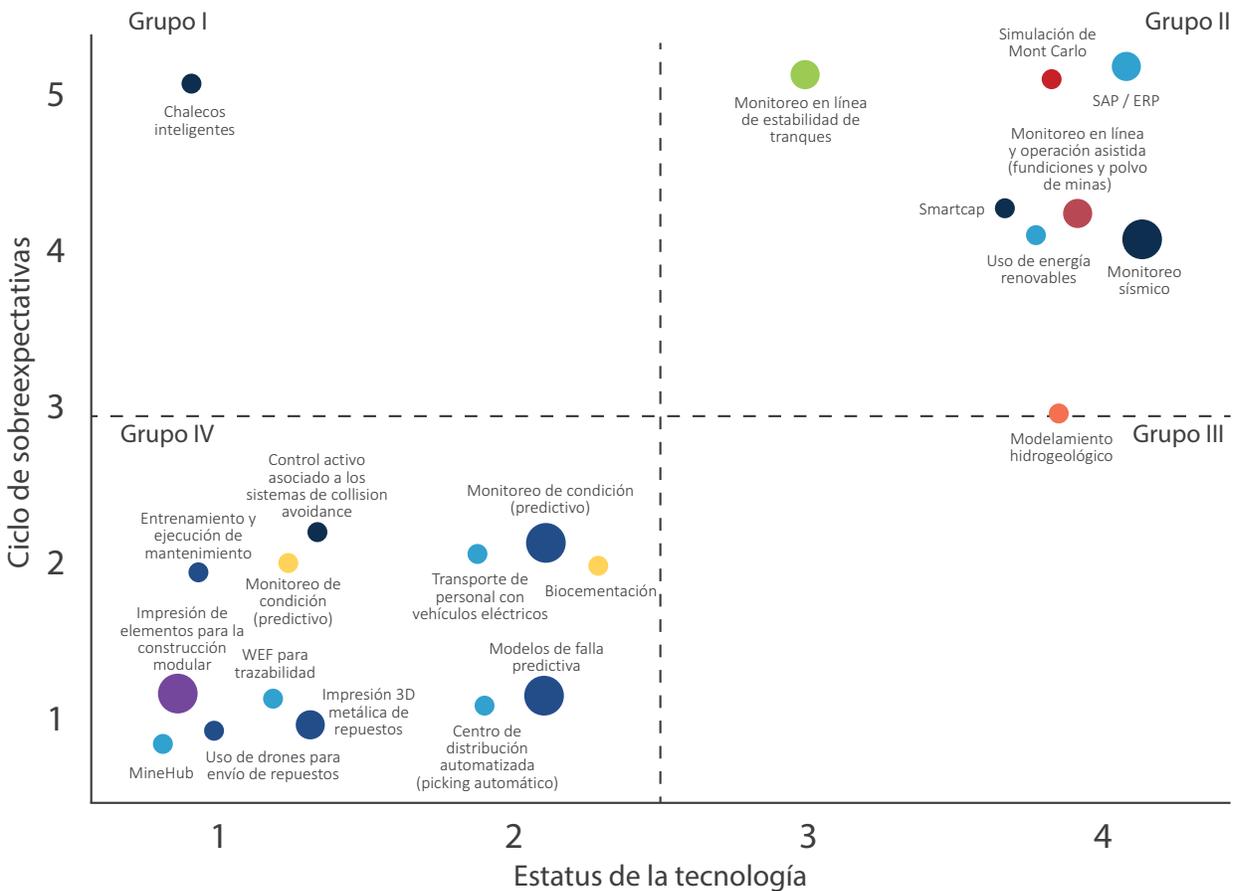
En el Grupo IV se encuentran cuatro tecnologías consideradas inmaduras: el Brazo robótico para cambio de revestimiento de corazas en Molienda; Sistema experto en Flotación; Monitoreo en línea de SX; y Sistema experto en Molienda. Las dos primeras se encuentran en etapa de prueba, y las otras dos están incorporadas en al menos una operación. En el caso de Sistema experto en Molienda, vale la pena destacar que se considera una Mejora Esperada Sustancial, por lo que podría ser incorporada a más faenas en el futuro.

En base a esto podemos decir que, en la etapa de Procesamiento, las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial están ampliamente incorporadas en la industria. Sin embargo, aún queda espacio para realizar mejoras y alcanzar una faena inteligente.

# Servicios

En esta etapa se encontraron doce procesos: Servicios Mina, Seguridad, Relaves, y Cierre Logística<sup>4</sup>, Estimación de recursos, Estimación de reservas<sup>5</sup>, Evaluación económica, Permisos, Proyectos, Mantención, Dewatering, Industrial. Servicios Mina, Seguridad, Relaves, y Cierre Logística<sup>4</sup>, Estimación de recursos, Estimación de reservas<sup>5</sup>, Evaluación económica, Permisos, Proyectos, Mantención, Dewatering, Industrial.

Gráfico Servicios



Mejora esperada

- 1 Marginal
- 2 Incremental
- 3 Sustantiva
- 4 Transformacional

Proceso identificado

- |   |   |   |
|---|---|---|
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #00AEEF; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Logística              | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #A52A2A; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Permisos   | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FFD700; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Servicios Mina       |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #3CB371; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Estimación de recursos | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #6A329F; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Proyectos  | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Seguridad            |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FFA500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Estimación de reservas | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #000080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Mantención | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #9ACD32; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Relaves              |
| <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #DC143C; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Evaluación económica   | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #FF4500; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Dewatering | <span style="display: inline-block; width: 15px; height: 15px; background-color: #008080; border: 1px solid black; margin-right: 5px;"></span> Cierre / Remediación |

Fuente: elaboración propia

En esta etapa de la cadena de valor del negocio minero, se identifican tecnologías concentradas principalmente en los Grupos II y IV. En el caso del Grupo II, se trata de soluciones que están maduras en el mercado, y que se encuentran incorporadas en varias faenas, donde la Mejora Esperada varía entre Marginal, Incremental y Sustantiva.

En este Grupo se encuentran: SAP / ERP y Uso de energías renovables en el proceso de Logística; Simulación de Mont Carlo en Evaluación Económica; Monitoreo en línea y operación asistida en Permisos; Modelamiento hidrogeológico en Dewatering; Smartcap y Monitoreo sísmico en Seguridad; y Monitoreo en línea de estabilidad de tranques en el proceso de Relaves. Es cuestión de tiempo para que estas tecnologías sean ampliamente incorporadas en la gran minería.

Como contraste, en el Grupo IV se concentran soluciones inmaduras, que no están incorporadas en la industria. En este cuadrante se encuentran nueve tecnologías cuya Mejora Esperada es considerada Marginal: Minehub, WEF para trazabilidad, Transporte para personal en vehículos eléctricos y Centro de distribución automatizada, las que forman parte del proceso de Logística; Entrenamiento y ejecución de mantenimiento y Uso de drones para envío de repuestos en Mantenición; Monitoreo de

condición y Biocementación en Servicios Mina; y Control activo asociado a los sistemas de *collision avoidance* en el proceso de Seguridad.

Sin embargo, se identifican al menos cuatro tecnologías en este grupo, que tienen una Mejora Esperada Incremental (Impresión 3D metálica de repuestos en el proceso de Mantenición) y Sustantiva (Monitoreo de condiciones y Modelos de fallas predictivas en Mantenición; e Impresión de elementos para la construcción modular en el proceso de Proyectos), por lo que se requiere de un impulso para que éstas se incorporen en la industria.

En el Grupo I es posible encontrar sólo una tecnología, la de Chalecos inteligentes en Seguridad. Esta solución en particular es muy madura y ha demostrado su efectividad, alcanzando nuevas versiones de sí. Sin embargo, en la industria aún son parte de pruebas piloto, y no se han incorporado a faenas a gran escala. Si esta tecnología ya ha demostrado su madurez, cabe preguntarse qué hace falta para que la industria la incorpore en sus faenas para una mayor seguridad de sus trabajadores.

### Un camino por recorrer

En base al análisis efectuado, se puede concluir que hay una alta penetración de tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en el sector minero, pero dicha penetración no se ha desarrollado de una manera heterogénea,

<sup>4</sup> En el proceso de Logística, hubo tres tecnologías que no pudieron ser clasificadas: Medición *online* de *performance*, Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores), y Operación remota. Estas tres soluciones, sin embargo, pudieron ser clasificadas de acuerdo con la Mejora Esperada, donde la primera acá identificada fue Incremental, mientras que las dos restantes fueron Marginales.

<sup>5</sup> Cabe señalar que, para los procesos de Estimación de recursos y Estimación de reservas, no se identificaron tecnologías asociadas.

<sup>6</sup> En el proceso de Cierre y Remediación, se identificó una tecnología que no pudo ser clasificada: Monitoreo de acidez de agua. Sin embargo, esta tecnología sí pudo ser clasificada de acuerdo con la Mejora Esperada, siendo ésta Marginal.

y los niveles de madurez de las tecnologías también varían de un proceso a otro.

Tanto en el área de Exploración y Geociencias como en Extracción, es posible encontrar soluciones “repartidas” en todos los cuadrantes identificados. A diferencia de Procesos y Servicios, en estas dos etapas de la cadena de valor del negocio minero, la incorporación de las tecnologías parece ser más lenta, y esto puede deberse a diversos factores, como el desconocimiento o la cultura organizacional, entre otros.

En el caso de Procesamiento, las tecnologías se ubican principalmente en el Cuadrante II, siendo éstas maduras y con una mayor extensión en la industria. Tomando esto en consideración, se puede decir que esta etapa de la cadena de valor minero es la que ha liderado el uso de las tecnologías de la Cuarta Revolución.

En esta línea, no es casualidad que Procesamiento lleve la delantera por sobre Extracción, ya que históricamente se ha enfocado en la incorporación de soluciones relacionadas a la automatización, el control,

en mostrar de forma gráfica los procesos y en tiempo real, donde ha habido implementación de tecnologías tanto de hardware, que de software.

En el caso de los Servicios, es posible encontrar una situación distinta. Si bien hay algunas excepciones, la mayoría de las tecnologías asociadas a esta etapa se encuentran en un estado más inmaduro y no han logrado permear la industria, tomando en consideración que varias de ellas han sido clasificadas con Mejoras Esperadas Sustantivas. Como contexto, es necesario considerar que son empresas proveedoras las que impulsan principalmente estos procesos, ya que no son el core business de la industria minera. Tomando esto en consideración, se puede pensar que hay una disociación en la industria de servicios, en la que hay una parte que está altamente tecnologizada y que es rápidamente incorporada, y hay otra parte que pareciera estar más atrás respecto a las tecnologías de la Cuarta Revolución Industrial, por lo que se está frente a un gran desafío para el sector.

Desafíos y obstáculos para alcanzar  
una operación inteligente

El éxito en la implementación de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en los próximos tres años depende de diversos factores, los que, teniendo identificados, pueden ser resueltos de forma oportuna.

Teniendo un primer atisbo del estado actual de implementación de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en el sector minero, cabe preguntarse por qué muchas de estas soluciones no están mayormente incorporadas en la industria.

Para ello, la Comisión de Minería 4.0 de Cesco, en base a su conocimiento técnico y experiencia, analizó cada una de las tecnologías detectadas, para determinar la probabilidad de éxito en su implementación en el transcurso de 3 años (2020-2022), y las brechas que podrían dificultar que éstas sean incorporadas en una faena.

Para eso, se ha clasificado la probabilidad de implementación de acuerdo con la siguiente escala:

- Probabilidad 1: Es improbable que se implemente en los próximos tres años.

- Probabilidad 2: Es posible que se implemente en los próximos tres años.
- Probabilidad 3: Es probable que se implemente en los próximos tres años.
- Probabilidad 4: Es casi cierto que se implemente en los próximos tres años.

Independiente de su clasificación se agregan las posibles brechas o causas de fracaso que podrían impedir que se implemente con éxito la solución entre 2020 y 2022, las que se detallan a continuación:

- **Cultura organizacional:** dentro de las empresas existe una cultura de cómo se hacen las cosas, y con la que los trabajadores se sienten cómodos. Implementar una nueva tecnología puede requerir un cambio en esta cultura organizacional, lo que puede generar una fuerte resistencia

a dicho cambio.

- **Conocimiento:** existe un desconocimiento de parte de la industria respecto a la utilidad que podría tener una tecnología, o incluso de que existe una solución nueva para un proceso en particular.

- **CAPEX:** Si el gasto de capital que las empresas mineras tendrían que realizar para implementar esta tecnología es muy alta, eso puede desincentivar su implementación. El proceso para que una empresa minera apruebe el invertir en una tecnología puede verse mermado por el alto costo, especialmente en aquellas soluciones cuya Mejora Esperada es Marginal o Incremental.

- **No se considera core del negocio:** la empresa minera considera que la tecnología se aleja de su *core business*, por lo que se decide no invertir en ella.

- **Tecnología poco robusta:** la solución aún es inmadura, y si bien existe, puede fallar al momento de implementarla, por lo que no es confiable.

- **Información propietaria del fabricante:** existe recelo de implementar alguna de estas tecnologías porque ésta tiene un dueño, quien va a mantener en reserva la información de la aplicación de la tecnología.

- **Conectividad insuficiente:** muchas de estas soluciones requieren una conexión estable de internet, y dentro de una mina, dadas sus características de aislamiento, altura o profundidad, muchas veces no puede tener una conexión asegurada. Esto influye en que, al final del día, no se podrá funcionar en tiempo real.

- **Requiere otras tecnologías:** para implementar una tecnología en particular, se necesita implementar otra tecnología de manera previa, por lo que no es una opción lo suficientemente rápida.

- **OPEX:** si se implementa la solución, los costos de producción podrían subir, ya que se puede requerir más trabajadores, o se requerirá realizar un gasto en un ámbito que antes no existía, encareciendo los costos.



*Teniendo un primero atisbo del estado actual de implementación de las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial en el sector minero, cabe preguntarse por qué muchas de estas soluciones no están mayormente incorporadas en la industria”.*

- **Masificación de la tecnología:** la tecnología todavía está probándose, por lo que la industria no está dispuesta a realizar una inversión mientras no se demuestre su efectividad. En este sentido, el sector minero se caracteriza por ser un buen seguidor, más no un innovador. Esto quiere decir que generalmente las empresas

implementan soluciones a medida que otra empresa ya lo haya hecho antes y haya comprobado sus resultados. Esto se conoce como tecnología probada.

A continuación, se analiza la situación en las cuatro etapas identificadas en la cadena de valor del negocio minero.

# Exploración y Geociencias

Las tecnologías asociadas a esta etapa de la cadena de valor del negocio minero, se encuentran principalmente en los Grupos I y IV -donde la tecnología varía de inmadura a madura, y que está en evaluación o se ha implementado solo en una faena-, por lo que vale la pena analizar qué dificultades podría

haber en el camino para que en el transcurso de tres años se posicionen en el Grupo II (tecnologías maduras / implementadas en algunas o muchas faenas) que se identificó con anterioridad.

## Implementación: Casi cierto

En el caso de la etapa de Exploración y

Proceso	Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas de fracaso
Geoquímica	Análisis multivariable	3	Cultura organizacional
Geotecnia	Monitoreo geotécnico en línea	4	
	Uso de IA para filtrar alarmas (asistencia experta)	3	Conectividad insuficiente
Sondajes / Geología	Simulación de depósitos	3	Cultura organizacional, Conocimiento
	Captura de información <i>in situ</i>	2	Conocimiento
	Captura de información geofísica (drones)	2	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Modelamiento geológico	1	No se aprecia valor significativo de parte de la industria

Fuente: elaboración propia

Geociencias, específicamente en el proceso de Geotécnica, se encuentra una tecnología donde es Casi cierto que se implementará en los próximos tres años. Se trata de Monitoreo geotécnico en línea. Se está frente a una solución madura, que se encuentra en Estudio, pero cuya Mejora Esperada es Incremental.

### Implementación: Probable

En esta etapa se encuentran tres tecnologías cuya implementación en el corto plazo se considera Probable. La primera de ellas se encuentra en el proceso de Geoquímica. Se trata de la solución Análisis multivariable, la que se considera madura, aún en etapa de estudio y cuya Mejora Esperada es Incremental. Como causal de fracaso de esta solución, se ve que la Cultura organizacional podría jugar un rol en contra de esta implementación.

---

## 4

soluciones tecnológicas de esta etapa se clasificaron como Casi Cierto y Muy Probable en cuanto a su implementación en 3 años.

---

En Geotecnia por su parte, se encuentra el Uso de IA para filtrar alarmas, la que se ubica en el Grupo IV del Diagnóstico, siendo una solución relativamente inmadura, y que estaría en etapa de estudio. Como causal de fracaso, se identificó que una Conectividad insuficiente impediría su implementación, situación que podría cambiar si se trabaja en conjunto con el Estado y el sector de telecomunicaciones para mejorar este escenario.

Por último, en el proceso de Sondaje / Geología, se encuentra la solución Simulación de depósitos, clasificada en el Grupo II del diagnóstico, y que se encuentra bastante madura y está incorporada en varias faenas. En ese sentido, sería cuestión de tiempo para que otras faenas la incorporen ya que ha sido una solución probada, siendo una causal de fracaso la falta de Conocimiento de su existencia, y la Cultura organizacional para lograr su implementación.

### Implementación: Posible

Continuando en el proceso de Sondaje / Geología, se encuentran dos soluciones que posiblemente se implementarían entre 2020 y 2022: Captura de información *in situ* y Captura de información geofísica.

En el caso de la primera, la brecha para su concreción se debería al desconocimiento

existente sobre esta tecnología, que además es una solución inmadura tecnológicamente, que está en estudio y cuya Mejora Esperada es Marginal. Sin embargo, su importancia radica en el valor que tiene en si misma la captura de datos en tiempo real. Puede ser que esta solución por si sola no genere un valor al negocio minero, pero es una tecnología habilitante para poder implementar otras soluciones en la industria.

En el caso de la Captura de información geofísica, estamos frente a una solución madura y que ya ha sido probada en varias faenas, aunque su Mejora Esperada es Marginal. Pese a esta

clasificación, esta solución tiene como Causa de fracaso que una parte de la industria no considera que ésta tenga un valor significativo, situación que podría cambiar en el futuro.

### Implementación: Improbable

Por último, la solución de Modelamiento geológico es poco probable que se implemente en el sector en los próximos años, y su principal brecha es que no se considera que tenga un valor significativo de parte de la industria. Esta tecnología además está inmadura y no se ha probado en faena, reafirmando la causa de fracaso anteriormente mencionada.

# Extracción

Las tecnologías asociadas a la etapa de Extracción se encuentran en todos los Grupos. Hay una concentración de soluciones consideradas inmaduras que se encuentran en los Grupos IV y III, cuyo estatus va desde el 1

(en evaluación) al 4 (implementada en muchas faenas). Tomando esto en consideración, cabe preguntarse qué hace falta para que estas tecnologías maduren y así sean incorporadas a muchas faenas.

Proceso	Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas de fracaso
Perforación	Modelamiento avanzado	3	Cultura organizacional Conocimiento
	Análisis de muestras <i>in situ</i>	2	Tecnología poco robusta
	Operación autónoma	2	Cultura organizacional
	Nuevos materiales para brocas	4	
Tronadura	Modelamiento avanzado	3	Cultura organizacional, conocimiento
	Carga inteligente de explosivos	2	Cultura organizacional
Carguío	Captura de información <i>in situ</i>	3	Cultura organizacional, tecnología poco robusta
	Operación autónoma (llenado de balde en el caso de cargadores frontales, por ejemplo)	1	Tecnología poco robusta
	Operación semiautónoma	3	CAPEX
	Operación asistida	3	CAPEX
	Nuevos elementos de desgaste		
	Entrenamiento de operación	3	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
Transporte	Equipos eléctricos	4	
	Captura de información <i>online</i>	3	Overhaul de equipos antiguos si no están incorporados, información propietaria de fabricante
	Operación autónoma	2	No aplica en todas las faenas
	Entrenamiento de operación	3	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Equipos híbridos (trolley assist)	1	CAPEX
	Fuel cells	1	Tecnología poco robusta, CAPEX
Equipos eléctricos	2	Tecnología poco robusta, CAPEX	

Fuente: elaboración propia

## Implementación: Casi cierto

Entre las tecnologías con mayor probabilidad de implementarse entre 2020 y 2022, están las de Nuevo materiales para brocas en el proceso de Perforación, y Equipos eléctricos en el proceso de Carguío. Ambas soluciones son tecnologías maduras que, aunque se consideran con una Mejora Esperada Marginal, ya se están implementando en diversas faenas, por lo que han demostrado su eficacia.

## Implementación: Probable

En el caso de las soluciones que son consideradas como Probable, éstas se encuentran en todos los procesos de esta etapa de la cadena de valor. Las soluciones de Modelamiento avanzado, tanto para Perforación como Tronadura, tienen una Mejora Esperada Marginal e Incremental respectivamente. En estos procesos, la tecnología es inmadura y en cuanto a su Estatus, la primera está implementándose en una faena, y la segunda está en estado de evaluación. Como brecha para lograr su implementación, la Comisión identificó que la Cultura organizacional y el Conocimiento sobre estas tecnologías, serán posibles causas de fracaso.

En el proceso de Carguío, es posible encontrar el mayor número de soluciones que probablemente se implementen en el corto

plazo. En el caso de Captura de información *in situ*, se trata de una tecnología inmadura pero que se ha implementado en varias faenas, con una Mejora Esperada considerada Incremental. El hecho de que sea una tecnología inmadura puede ser una causal de fracaso, al igual que la Cultura organizacional dentro de las empresas.

En este mismo proceso, se encuentran las soluciones de Operación Semiautónoma, Operación asistida<sup>7</sup> y Entrenamiento de operación. En el caso de la primera, se trata de una tecnología inmadura, que ya está implementada en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Incremental, por lo que es cuestión de tiempo para que esta solución madure y se masifique. Sin embargo, su alto costo ha sido considerado como causa de fracaso. En el caso de la Operación asistida, se trata de una tecnología que está en estudio, con una Mejora Esperada Marginal, y cuya brecha también es el CAPEX. En Entrenamiento de operación, se está frente a una tecnología inmadura, pero que está incorporada en varias faenas. Se trata de una tecnología cuya Mejora Esperada es Marginal, y cuya causa de fracaso sería el que No se aprecia valor significativo de parte del sector.

En Transporte, se encuentran dos tecnologías cuya implementación a corto plazo es considerado Probable: Captura de información

<sup>7</sup> La Comisión no pudo identificar esta tecnología en cuanto a su Ciclo de sobreexpectativas. Por esta razón no fue analizada en el Diagnóstico.

---

# 19

soluciones tecnológicas fueron identificadas por la Comisión. De ellas, 10 fueron clasificadas como Casi Cierto y Muy probable para su implementación.

---

*online* y Entrenamiento de operación. La Captura de información online es una solución madura, pero que aún está en estudio, y cuyas causas de fracaso serían el que Requiere de otras tecnologías previas y que la Información es propiedad del fabricante. En Entrenamiento de operación, se trata de una solución inmadura que ha sido incorporada en varias faenas, y cuya causa de fracaso sería que el sector no aprecia su valor.

## Implementación: Posible

Entre las tecnologías consideradas en esta clasificación, específicamente en el proceso de Perforación, se encuentran Análisis de muestra *in situ* y Operación autónoma. En cuanto a Análisis de muestra *in situ*, se trata de una tecnología inmadura que está en

estudio, y su Mejora Esperada es Marginal. Lo poco robusta de la solución es la causa de fracaso identificada. En el caso de Operación autónoma, es una tecnología inmadura, pero que ha sido incorporada en algunas faenas, siendo la Cultura organizacional su principal causa de fracaso.

En el proceso de Tronadura, se encuentra la solución Carga inteligente de explosivos. Esta tecnología es considerada como Posible en cuanto a su implementación, dado que es inmadura y está aún en Estudio, y cuya Mejora Esperada es Marginal. Su causa de fracaso sería la Cultura organizacional.

En Transporte, existen dos tecnologías con la clasificación de Posible: Operación autónoma y Equipos eléctricos. La primera es una tecnología madura con una Mejora Esperada Marginal, y se ha implementado en varias faenas, pero se trata de una solución que no sirve de forma transversal a todo el sector, siendo ésta la principal causa de fracaso. En el caso de la segunda, se trata de una tecnología inmadura y en estudio, pero cuya Mejora Esperada es Sustantiva. Sin embargo, la alta inversión que conlleva y su inmadurez, son dos factores que impiden tener mayor certeza respecto a su implementación en el corto plazo.

## Implementación: Improbable

Respecto a las tecnologías consideradas como Improbables respecto a su implementación, se encuentran tres: Operación autónoma en el proceso de Carguío; y Equipos híbridos y Fuel Cells en Transporte. En Operación autónoma<sup>8</sup>, se está frente a una solución cuya Mejora Esperada es Marginal, y se considera que la principal causa de fracaso sería que se trata de una tecnología poco

robusta. En cuanto a Equipos híbridos, es una tecnología relativamente madura, que sólo ha sido incorporada en una faena y cuya Mejora Esperada es Incremental. Su alto costo hace pensar que ésta será la principal causa de fracaso (CAPEX). En Fuel Cells, se ve una tecnología inmadura, en estudio y cuya Mejora Esperada es Marginal. El ser una tecnología poco probada y su alto costo (CAPEX), son las principales causas identificadas de fracaso.

<sup>8</sup> La Comisión no pudo identificar esta tecnología en cuanto a su Ciclo de sobreexpectativas y estatus. Por esta razón no fue analizada en el Diagnóstico.

# Procesamiento

En la etapa de Procesamiento se ve una mayor concentración de tecnologías en el Grupo II, que es donde se quiere llegar en cuanto a madurez y penetración en faena de las soluciones. Sin embargo, aún quedan tecnologías que requerirán de medidas para su impulso, ya sea por parte de la industria, el Estado, la Academia, o los proveedores.

Proceso	Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas de fracaso
Chancado	Reconocimiento de imágenes	2	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Medición <i>online</i> de <i>performance</i>	2	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores)	2	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Operación remota		
	Nuevos elementos de desgaste		
	Correa regenerativa	2	Condiciones topográficas de la operación
Molienda	Monitoreo en línea	3	CAPEX, overhaul de plantas antiguas
	Medición <i>online</i> de <i>performance</i>	3	CAPEX, overhaul de plantas antiguas
	Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores)	3	CAPEX, overhaul de plantas antiguas
	Operación remota	3	CAPEX, cultura organizacional
	Sistema experto /Machine learning	2	Requiere otras tecnologías (monitoreo), conocimiento, cultura organizacional
	Brazo robótico para cambio de revestimiento de corazas / Apernado	2	Tecnología poco robusta
	Nuevos materiales para bolas		
Flotación	Monitoreo en línea	3	CAPEX, overhaul de plantas antiguas
	Sistema experto /Machine learning	2	Requiere otras tecnologías (monitoreo), conocimiento, cultura organizacional
Lixiviación	Monitoreo en línea	2	Conocimiento
	Monitoreo de condición de pilas (drones)	1	Lixiviación pierde interés como proceso
	Biolixiviación de sulfuros	1	Pérdida de interés en la tecnología (hoy en día el cloro está con más fuerza)
SX	Monitoreo en línea	2	Sobredimensionamiento actual de plantas
EW	Monitoreo en línea	2	Sobredimensionamiento actual de plantas
	Despegadora de cátodos robotizada	4	

Fuente: elaboración propia

### Implementación: Casi cierto

En la etapa de Procesamiento sólo se identifica una tecnología cuya implementación a corto plazo se considera Casi cierto. La solución es la Despegadora de cátodos robotizada del proceso de EW, una tecnología madura y que ya se utiliza en numerosas faenas, por lo que es cuestión de tiempo para que su uso sea generalizado.

### Implementación: Probable

En el proceso de Molienda se encuentran cuatro tecnologías cuya implementación en tres años se considera Probable. La primera de ellas es Monitoreo en línea, una solución madura, que ya se encuentra operativa en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Sustantiva. Sin embargo, su alto costo (CAPEX) y Overhaul de plantas antiguas, son las principales Causas de fracaso que impedirían su materialización.

En el caso de la Medición online de performance, al igual que Monitoreo en línea, se está frente a una tecnología madura, implementada en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Sustantiva. También el CAPEX y Overhaul de plantas antiguas serían Causas de fracaso para lograr su implementación.

Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores), es una tecnología madura, implementada en varias faenas, pero cuya Mejora Esperada

es Marginal. Como posibles Causas de fracaso, están el CAPEX y Overhaul de plantas antiguas. En cuanto a Operación remota, se está frente a una solución muy madura, que se utiliza en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Marginal. Como causales de fracaso se encuentran el CAPEX y la Cultura organizacional.

En el proceso de Flotación se encuentra la solución Monitoreo en línea, también una tecnología madura e incorporada a varias faenas, y cuenta con una Mejora Esperada Incremental. Como principales Causas de fracaso, se encuentra el CAPEX y Overhaul de plantas antiguas.

### Implementación: Posible

En el proceso de Chancado se encuentran varias soluciones cuya implementación es considerada Posible. La tecnología Reconocimiento de imágenes es una solución madura y está implementada en varias faenas. Su Mejora Esperada es Marginal, y su principal Causa de fracaso es que la industria no aprecie un valor significativo en ella.

Por su parte, Medición *online* de performance es una tecnología madura e implementada en varias faenas, y su Mejora estimada es Sustancial. Sin embargo, su Causa de fracaso sería que la industria no aprecie un valor significativo en ella.

En el caso de Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores), se ve una tecnología madura, implementada en varias faenas, y con una Mejora Esperada Marginal. Su Causa de fracaso, al igual que con las tecnologías mencionadas con anterioridad, sería que no se aprecia un valor significativo por parte de la industria.

En Correa regenerativa, si bien se trata de una tecnología muy madura, se ha implementado en pocas faenas, y su Mejora Esperada es Marginal. Su implementación depende principalmente de las condiciones topográficas de cada faena, por lo que ésta es considerada su Causa de fracaso.

En el caso del proceso de Molienda se aprecia la tecnología Sistema experto / Machine learning, se está frente a una tecnología inmadura que se ha implementado en una faena, pero su Mejora Esperada es Sustancial. Como Causas de fracaso, se identificó que Requiere otras tecnologías (monitoreo), hay una falta de Conocimiento respecto a su uso, y la Cultura organizacional.

Continuando con el proceso de Molienda, la tecnología Brazo robótico para cambio de revestimiento de corazas / Apernado, se considera inmadura y en estudio, además de tener una Mejora Esperada Marginal. Su Causa de fracaso es que se trata de una Tecnología

---

## 15

---

tecnologías en la etapa de Procesamiento se ubican en el Grupo II de la clasificación. Son soluciones maduras y con mayor penetración en el sector minero.

---

poco robusta.

En el proceso de Flotación, la solución Sistema experto / Machine learning, es considerada inmadura, en estudio y con una Mejora Esperada Marginal. Sus Causas de fracaso serían que Requiere otras tecnologías (monitoreo), hay una falta de Conocimiento respecto a su uso, y la Cultura organizacional.

En Lixiviación, se encuentra el Monitoreo en línea, considerada una tecnología inmadura que ha sido implementada en algunas faenas. Su Mejora Esperada es Marginal, y su principal Causa de fracaso, es la falta de Conocimiento respecto a ella.

En el caso de los procesos de SX y EW, también se encuentra la tecnología de Monitoreo en línea. En el proceso SX, esta tecnología es

inmadura y está implementada en al menos una faena, mientras que en EW es una tecnología madura y que se ha implementado en varias faenas. En ambas, la Mejora Esperada es Marginal. Como Causa de fracaso, se considera el Sobredimensionamiento actual de plantas, dada la disminución de óxidos, y por ende, la mayor capacidad de las plantas para lixiviar, por lo que ya no existen los mismos incentivos para desarrollar más tecnología asociada a esta parte de la cadena de valor del negocio minero.

### Implementación: Improbable

Solo en el proceso de Lixiviación se encontraron dos tecnologías cuya implementación en tres

años se considera Improbable: Monitoreo de condición de pilas (drones), y Biolixiviación de sulfuros. En el caso de la primera, si bien se trata de una tecnología bastante madura, que se ha implementado en varias faenas y su Mejora Esperada es Marginal, se considera que la Lixiviación pierde interés como proceso. En el caso de la Biolixiviación de sulfuros, se considera que es una tecnología madura, incorporada a diversas faenas, y cuya Mejora Esperada ha sido Transformacional. Sin embargo, se ha perdido el interés en esta tecnología, siendo reemplazada por nuevos adelantos. Esta es la principal Causa de fracaso detectada por la Comisión.

# Servicios

En Servicios se concentra el mayor número de tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial. La mayoría de ellas se ubican en el Grupo IV del Diagnóstico realizado por la Comisión, por lo que se trata de tecnologías inmaduras y poco implementadas. El siguiente grupo que concentra el mayor número de tecnologías es el Grupo II, las que son maduras y se han implementado en algunas y varias faenas.

Proceso	Tecnología asociada a la 4ta Revolución Industrial	Probabilidad de implementación 2020-2022	Causas de fracaso
Logística	SAP/ERP	4	
	Centro de distribución automatizada (picking automático)	1	No se considera como <i>core</i> del negocio
	Medición <i>online</i> de performance	2	
	Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores)	1	Cultura organizacional
	Operación remota		
	Uso de energía renovables	4	
	Transporte de personal con vehículos eléctricos	3	Masificación de la tecnología (no hay electrolineas)
	MineHub	1	
	WEF para trazabilidad	2	
Evaluación económica	Simulación de Monte Carlo		
Permisos	Monitoreo en línea y operación asistida (fundiciones y polvo de minas)	4	
Proyectos	Impresión de elementos para la construcción modular	1	CAPEX, conocimiento, cultura organizacional
Mantenión	Monitoreo de condición (predictivo)	3	Conocimiento
	Modelos de falla predictiva	2	Conocimiento, requiere implementar otras tecnologías
	Uso de drones para envío de repuestos	1	Tecnología poco robusta, no se aprecia valor significativo de parte de la industria
	Impresión 3D metálica de repuestos	1	CAPEX, conocimiento, tecnología poco robusta, valor poco significativo de parte de la industria
	Entrenamiento y ejecución de mantenimiento	2	No se aprecia valor significativo de parte de la industria
Dewatering	Modelamiento hidrogeológico	3	Conocimiento
Servicios mina	Monitoreo condición (predictivo)	2	Conocimiento, no se considera como <i>core</i> del negocio
	Biocementación	3	OPEX
Seguridad	Monitoreo sísmico	3	No aporta valor en todas las faenas
	Control activo asociado a los sistemas de collision avoidance	2	Cultura organizacional
	Smartcap	3	Cultura organizacional
	Chalecos inteligentes	3	Poco atractivo en minería a rajo abierto (salvo minería subterránea)
Relaves	Monitoreo en línea de estabilidad de tranques	3	Distinta criticidad dependiendo de la faena
Cierre / Remediación	Monitoreo de acidez de agua	1	No se vislumbran cierres masivos de minas en este periodo

## Implementación: Casi cierto

En la etapa de Servicios se identifican tres tecnologías que es muy probable que se implementen en tres años. En el proceso de Logística, se encuentra la solución SAP / ERP, una tecnología madura, implementada en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Incremental. Tomando esto en consideración, se puede decir que es el mercado el que sigue su curso natural en cuanto a su masificación.

En el mismo proceso se encuentra el Uso de energías renovables, una tecnología bastante madura, que se ha implementado en varias faenas, y cuya Mejora Esperada es Marginal. Al igual que con la solución SAP/ERP, se puede decir que será el Mercado el encargado de su masificación.

Por último, en el proceso de Permiso, se identifica la tecnología Monitoreo en línea y operación asistida (fundiciones y polvo de minas), una solución que, si bien es considerada Marginal, está bastante madura y se ha implementado en diversas faenas.

## Implementación: Probable

En Logística se encuentra la solución Transporte de personal en vehículos eléctricos. Si bien es una tecnología inmadura que se ha implementado solo en una faena, se ha considerado como Probable dados los

incentivos que distintos gobiernos están implementando para promover su masificación en otros mercados (China, Estados Unidos), por lo que se puede considerar con un cierto grado de certeza que más faenas incorporarán su uso. Como Causa de fracaso, se encuentra su Masificación en cuanto a la falta de más líneas eléctricas que permitan recargar los vehículos.

En el proceso de Mantenimiento, se encuentra la tecnología Monitoreo de condición (predictivo), que es una solución inmadura y que ha sido probada en una faena. Se trata de una Mejora Esperada Sustantiva, por lo que ese valor ayudaría a su masificación. Como Causa de fracaso, se considera que la falta de Conocimiento respecto a su uso podría influir en que no se concrete.

---

# 26

tecnologías fueron identificadas en la etapa de Servicios, siendo la que mayor soluciones de la Cuarta Revolución Industrial concentra.

---

Por otro lado, en el proceso de Dewatering, se encuentra la solución de Modelamiento hidrológico. Se trata de una tecnología relativamente madura, implementada en varias faenas, y de una Mejora Esperada Marginal. Al ya ser utilizada en diversas minas, se puede decir que es una solución ya probada, por lo que su implementación en un mayor número de faenas es inminente. Sin embargo, la falta de Conocimiento del sector respecto a esta solución puede ser la Causa de su fracaso.

En Servicios mina se encuentra la Biocementación, una tecnología inmadura, que se ha implementado muy poco, y cuya Mejora Esperada es Marginal. Como principal Causa de fracaso se considera el OPEX.

En materia de Seguridad, se encuentran tres tecnologías consideradas como Probable para su implementación a corto plazo: Monitoreo sísmico, Smartcap y Chalecos inteligentes. La primera es una solución madura que se ha implementado en varias faenas. Se considera que su Mejora Esperada es Sustantiva, pero sólo podría servir para algunas faenas. La segunda también es una tecnología madura e implementada en varias faenas, pero su Mejora Esperada es Marginal. Se considera que la Cultura organizacional podría ser su Causa de fracaso. Por último, los Chalecos inteligentes, son una tecnología madura, pero

que está en estudio. Su Mejora Esperada es marginal, y el ser Poco atractivo en minería a rajo abierto podría ser su Causa de fracaso.

Por último, en materia de Relaves, el Monitoreo en línea de estabilidad de tranques es una tecnología muy madura, pero que se ha incorporado a pocas faenas. Su Mejora Esperada es Incremental, y su Causa de fracaso sería una Distinta criticidad dependiendo de la faena.

### Implementación: Posible

Las tecnologías Medición online de performance y WEF para trazabilidad en el proceso de Logística, son consideradas soluciones que posiblemente se implementen en tres años. La primera, que no pudo ser graficada en el Diagnóstico por la Comisión, sí pudo ser clasificada como una tecnología cuya Mejora Esperada es Incremental. Como Causa de fracaso, se identificó que la industria no aprecia valor significativo en ella. En el caso de la segunda, se trata de una tecnología inmadura, en estudio, y cuya Mejora Esperada es Marginal. No se pudo determinar la Causa de fracaso.

En Mantenimiento, se encuentran las tecnologías Modelo de falla predictiva y Entrenamiento y ejecución de mantenimiento. La primera es una solución inmadura, probada en una faena, pero se considera que su Mejora Esperada

sea Sustancial. Como Causa de fracaso se consideraron el desconocimiento sobre ella y la necesidad de tecnologías previas para su implementación como las brechas. En el caso de la segunda, es una tecnología inmadura, en estudio y su Mejora Esperada es Marginal. Como Causa de fracaso se identificó que no se aprecia valor significativo por parte de la industria.

El Monitoreo condición en Servicios mina, es una tecnología inmadura, poco implementada, pero con una Mejora Esperada Sustancial. Como brechas para su desarrollo están la falta de Conocimiento sobre ésta, y que no se considera como *core* del negocio.

En Seguridad, la solución Control activo asociado a los sistemas de collision avoidance, es una tecnología inmadura, en estudio y cuya Mejora Esperada es Marginal. Como Causa de fracaso estaría identificada la Cultura organizacional.

### Implementación: Improbable

En el proceso de Logística se encuentran tres tecnologías cuya implementación a corto plazo parece Improbable: Centro de distribución automatizada (picking automático), Monitoreo remoto y diagnóstico (sensores) y MineHub.

La primera es una tecnología inmadura, probada en una faena y con una Mejora

Esperada Marginal. Su Causa de fracaso sería que No se considera como core del negocio. La segunda solución no pudo ser clasificada por la Comisión, sin embargo, se identificó que su Mejora Esperada era Marginal, y su Causa de fracaso sería la Cultura organizacional. Por último, la solución Minehub es inmadura, en estudio y Marginal. No se identifica la Causa de fracaso.

En materia de Proyectos, se identifica la solución Impresión de elementos para la construcción modular. Se trata de una tecnología inmadura y en estudio, cuya Mejora Esperada es Sustancial. Pese a esto, se considera que sus Causas de fracaso serían sus altos costos (CAPEX), la falta de Conocimiento en cuanto a su uso, y la Cultura organizacional.

En Mantención se encuentran dos tecnologías en esta categoría: Uso de drones para envío de repuestos e Impresión 3D metálica de repuestos. Ambas son consideradas inmaduras y en estudio. Sin embargo, la primera tiene una Mejora Esperada Marginal, y la segunda una Mejora Esperada Sustancial. Del Uso de drones se pueden identificar como Causas de fracaso el que se trata de una Tecnología poco robusta, y no se aprecia valor significativo de parte de la industria. En el caso de la Impresión 3D, se considera que su alto costo (CAPEX), la falta de conocimiento, ser una tecnología

poco robusta y tener valor poco significativo de parte de la industria, son Causas de fracaso.

Por último, en materia de Cierre / Remediación, se encuentra la tecnología Monitoreo de acidez de agua. Esta solución no fue clasificada por la Comisión, y al no existir faenas que cierren en el corto plazo, no se considera como una prioridad.

### Principales hallazgos

De acuerdo a la probabilidad de éxito en la implementación en el transcurso de 3 años (2020-2022) de las tecnologías detectadas por la Comisión, y considerando las brechas que podrían dificultar que éstas sean incorporadas en una faena, se puede ver que en la etapa de Exploración y Geociencias hay una cantidad considerable de soluciones con una alta probabilidad de implementación, donde los mayores obstáculos para lograr su incorporación son la Cultura Organizacional, el

Conocimiento, y el hecho de que las empresas No aprecian *a priori* un valor significativo (lo que puede deberse a su vez a falta de conocimiento).

En el caso de la etapa de Extracción, las probabilidades de implementación resultan ser más bajas, y aunque se encuentran soluciones en estado de Casi cierto y Probable, hay bastantes tecnologías consideradas en Improbable. Sus principales causas se asocian al CAPEX, a la Cultura Organizacional, y Tecnología Poco Robusta.

Por último, tanto en Procesamiento como en Servicios, aquellas tecnologías que cuentan con probabilidades bajas de lograr una incorporación masiva en la industria en el transcurso de tres años, presentan como principales brechas las relacionadas al CAPEX, y a que No se aprecia un valor significativo.

Principales conclusiones y  
recomendaciones

Si bien se han identificado las brechas que pueden impedir que en el transcurso de tres años las tecnologías asociadas a la Cuarta Revolución Industrial permeen la minería, también es necesario tener claridad sobre el papel que juega cada uno de los actores involucrados en la cadena de valor del negocio minero.

Si bien la adopción de las nuevas tecnologías asociadas a las tres primeras revoluciones industriales llegó rezagada al sector minero, hoy estamos frente a una situación relativamente distinta, dada la naturaleza de la Cuarta Revolución Industrial, donde los cambios tecnológicos han sido vertiginosos y donde todos los días se están creando nuevas soluciones.

En este caso, se vislumbra que varias de las tecnologías asociadas a esta revolución, han permeado algunas etapas de la cadena de valor minero. Sin embargo, se está frente a un escenario heterogéneo, donde otras soluciones aún tienen mucho que avanzar, por lo que no existen certezas de que vayan a ser incorporadas en el corto plazo, dado que existen brechas bastante significativas.

Cabe destacar que, en las etapas de Procesamiento y Servicio, cuando las tecnologías han logrado un nivel de madurez suficiente, se han adoptado rápidamente,

pero aún quedan varias soluciones que se encuentran en un estadio inmaduro que generarán valor a la industria. Esto se extrapola a las otras etapas de la cadena de valor minero, donde existen muchos desafíos para lograr la implementación de las soluciones. Muchas de estas tecnologías por sí solas pueden ser consideradas marginales, pero en su conjunto pueden ser transformacionales para la industria.

Pero para cerrar las brechas que han impedido una implementación expedita de soluciones asociadas a la Cuarta Revolución, no es solo el sector minero el llamado a enfrentar el desafío, sino que también hay otros actores que juegan un rol fundamental para lograr esta meta.

La Comisión ha identificado, de acuerdo a las brechas anteriormente presentadas, quiénes son aquellos que tienen una participación en estos desafíos, los que son presentados a continuación.

Brecha	Responsables principales			
	Empresa minera	Empresa proveedora	Academia	Estado
Cultura organizacional	X			
Conocimiento	X	X	X	X
CAPEX	X	X		
No se considera como core del negocio	X			
Tecnología poco robusta		X		
Información propietaria de fabricante		X		
Conectividad insuficiente	X			X
Requiere otras tecnologías (monitoreo)	X			
OPEX	X	X		
Masificación de la tecnología	X			

Fuente: elaboración propia

Entre las brechas que más se repiten, están las de Cultura Organizacional, de Conocimiento, Tecnología poco robusta y el CAPEX. Por un lado, la primera depende absolutamente de la empresa minera, mientras que, en el caso de la segunda, no basta con que la compañía minera invierta en capacitar a sus trabajadores. En esta brecha en particular, se necesita también que la Academia, las empresas proveedoras y el Estado participen de forma activa en acortar los obstáculos de implementación de las soluciones.

En el caso de la Academia y las empresas proveedoras, su rol radica en la difusión del conocimiento, para que éste sea adoptado

por la empresa minera. En cuanto al Estado, éste puede impulsar medidas que potencien el clúster del conocimiento, y propiciar el diálogo entre los otros actores, que han tenido ciertas dificultades en el pasado para generar un espacio de conversación fluido.

Y no solo eso. El Estado también puede generar instrumentos de financiamiento a la innovación enfocados en facilitar la maduración de las tecnologías anteriormente identificadas, y transformar a Chile en un líder tecnológico para la minería.

De la mano del Conocimiento, está la brecha de la Tecnología poco madura. En este sentido, es necesario invertir en innovación y desarrollo

(I+D) para mejorar el desempeño de las soluciones. Esto no sólo potencia a la industria minera, sino que también a los proveedores de la minería, que es la segunda mayor industria del país, y en la que hay mucho espacio para generar valor.

En cuanto al CAPEX, se han identificado como responsables tanto la empresa minera como a la empresa proveedora. Esto, porque si bien es la empresa minera la que debe decidir hacer o no la inversión, es la empresa proveedora la que debe buscar nuevas formas de demostrar por qué la inversión es necesaria.

Por último, vale la pena destacar la brecha de Conectividad insuficiente. Pese a ser una brecha poco mencionada, todas las soluciones identificadas requieren de datos y conectividad para funcionar. En esta área, la planificación por parte del Estado es esencial, y así asegurar a la industria el acceso necesario para el correcto funcionamiento de las tecnologías, especialmente ad portas de la incorporación de las redes de quinta generación (5G), las que facilitarán aún más la incorporación de estas soluciones.

## Recomendaciones

En base al análisis desarrollado por la Comisión de Minería 4.0, se pueden recomendar las siguientes acciones:

- En cuanto a la industria, y tomando en consideración que las brechas que más se repiten en este análisis son las asociadas a la Cultura organizacional y al CAPEX, es necesario cambiar el método de evaluación que ha estado realizando la compañía para decidir si se realiza o no una inversión para incorporar estas soluciones. Es necesario también ver el potencial de las tecnologías en su conjunto, y como ha sido mencionado con anterioridad, la implementación de cada una de estas tecnologías por sí sola muchas veces puede ser marginal o incremental, lo que puede llevar a las empresas a no ver el valor en ellas. Lo cierto es que la integración de estas tecnologías, es transformacional. Y el mundo está caminando hacia esa dirección.

El sector minero no puede quedarse rezagada, porque entonces sus productos, los minerales, se volverán poco competitivos. Para muestra un botón: el cobre está compitiendo con el grafeno, una innovación en la que se están implementando varias de las soluciones mencionadas para abaratar los costos de producción, y a largo plazo podría ser un serio contendor para la minería del cobre.

La industria tiene la responsabilidad de asegurar un futuro con minerales a un

precio competitivo, y eso significa seguir manteniendo una visión de bajar costos con una mayor eficiencia, lo que se facilita a través de la incorporación de tecnologías, y avanzar hacia una cultura de “minería inteligente”.

- Por otro lado, la industria de proveedores debe subirse al carro de las nuevas tecnologías, y la relevancia que pueden tener en los próximos 10 años, para empezar a hacer las inversiones acordes para avanzar en esa dirección. El sector de los proveedores tiene una gran responsabilidad no solo en seguir avanzando hacia tecnologías más robustas, confiables y de menor costo para que el CAPEX sea más bajo, sino que también tienen un rol en el conocimiento y en la generación de su propio cambio cultural. Esto, con el fin de incorporar tecnología en sus propios servicios, aunque el cliente no lo requiera de forma explícita.

Se está frente a dos realidades que se contraponen. Por un lado, Chile cuenta con empresas proveedoras con una cultura de innovación muy alta, mientras que hay otras que tienen una cultura de innovación muy baja. En este último caso existe un espacio para impulsarlas hacia la dirección correcta y de forma veloz, porque las

capacidades tecnológicas de esta Cuarta Revolución Industrial avanzan mucho más rápido que las capacidades tecnológicas de las revoluciones anteriores.

- En cuanto al rol que juega la Academia, es importante recalcar que ésta sigue siendo el motor intelectual de la sociedad. Y siendo así, es importante que busque las mejoras y desarrollo de nuevas tecnologías, especialmente aquellas que pueden resolver los problemas que tiene, y tendrá en el futuro, la industria.

Cabe mencionar que la lista de tecnologías identificadas por la Comisión, llevadas todas al Cuadrante II, no serán la solución definitiva para la industria. No cabe duda de que seguirán apareciendo nuevas problemáticas que requerirán nuevas soluciones, y es aquí donde la Academia debe participar de forma activa, escuchando de forma temprana a la industria.

Un mayor diálogo en este ámbito debiese enfocarse en desarrollar las innovaciones técnicas que permitan hacer madurar las tecnologías identificadas, que en algunos casos son desafíos que exceden a la industria, y deben ser vistos en la Academia.

Por otro lado, este actor debe contribuir a la difusión y el conocimiento de estas soluciones entre los alumnos de carreras

asociadas a la industria, para que al entrar al mundo laboral estén a la vanguardia de la tecnología, con miradas e ideas frescas que contribuyan a avanzar hacia una minería inteligente.

- Por último, el Estado, a través de los distintos mecanismos de financiamiento de los que dispone, puede generar instrumentos que permitan potenciar el conocimiento de este tipo de tecnologías en la industria, y desarrollar las capacidades

y habilidades asociadas al conocimiento. Esto puede ser a través de capacitación, y como se mencionó con anterioridad, con la creación de programas de financiamiento para hacer I+D en aquellas tecnologías cuyo estado se considera inmaduro.

Otro rol que debiese asumir el Estado, es el de ser un facilitador del diálogo entre la Academia, empresas proveedoras y empresas mineras, papel que puede ser asumido por el Ministerio de Minería.



# Hacia una minería 4.0

Recomendaciones para impulsar una  
industria nacional inteligente