



Universidad de Concepción

# MINERIA 4.0

Fernando Concha / Marcelo Vergara / Pedro G. Toledo

Serie Comunicacional CRHIAM

## **SERIE COMUNICACIONAL CRHIAM**

Versión impresa ISSN 0718-6460

Versión en línea ISSN 0719-3009

### **Directora:**

Gladys Vidal Sáez

### **Comité editorial:**

Sujey Hormazábal Méndez

María Belén Bascur Ruiz

### **Serie:**

Minería 4.0.

Fernando Concha, Marcelo Vergara y Pedro G. Toledo.

Enero 2022.

### **Agradecimientos:**

Centro de Recursos Hídricos  
para la Agricultura y la Minería  
(CRHIAM)

ANID/FONDAP/15130015

Victoria 1295, Barrio Universitario,

Concepción, Chile

Teléfono +56-41-2661570

[www.crhiam.cl](http://www.crhiam.cl)



Universidad de Concepción

# MINERIA 4.0

Fernando Concha / Marcelo Vergara / Pedro G. Toledo

## MINERIA 4.0

### PRESENTACIÓN

El Centro de Recursos Hídricos para la Agricultura y la Minería -Centro Fondap CRHIAM- está trabajando en el tema de "Seguridad Hídrica", entendida como la "capacidad de una población para resguardar el acceso sostenible a cantidades adecuadas de agua de calidad aceptable para el sustento, bienestar y desarrollo socioeconómico sostenibles; para asegurar la protección contra la contaminación transmitida por el agua y los desastres relacionados con ella, y para preservar los ecosistemas, en un clima de paz y estabilidad política" (ONU- Agua, 2013).

La "Serie Comunicacional CRHIAM" tiene como objetivo potenciar temas desde una mirada interdisciplinaria, con la finalidad de difundirlos a los tomadores de decisiones públicos, privados y a la comunidad general. Estos textos surgen como un espacio de colaboración colectiva entre diversos investigadores ligados al CRHIAM como un medio para informar y transmitir las evidencias de la investigación relacionada a la gestión del recurso hídrico.

Con palabras sencillas, esta serie busca ser un relato entendible por todos y todas, en el que se exponen los estudios, conocimiento y experiencias más recientes para aportar a la seguridad hídrica de los ecosistemas, comunidades y sectores productivos. Agradecemos el esfuerzo realizado por nuestras y nuestros investigadores, quienes han trabajado de forma mancomunada y han puesto al servicio de la comunidad sus investigaciones para aportar de forma activa en la búsqueda de soluciones para contribuir a la generación de una política hídrica acorde a las necesidades del país.

Dra. Gladys Vidal  
Directora de CRHIAM

## DATOS DE INVESTIGADORES



### **Fernando Concha**

Ingeniero Químico.  
Doctor en Ingeniería Metalúrgica,  
Universidad de Minnessota, EEUU.  
Profesor Emérito de la  
Universidad de Concepción.  
Investigador Asociado CRHIAM.



### **Marcelo Vergara**

Ingeniero Comercial.  
Consultor en innovación tecnológica.  
Colaborador CRHIAM.



### **Pedro G. Toledo**

Ingeniero Civil Químico, Universidad de Concepción.  
Doctor of Philosophy in Chemical Engineering,  
University of Minnesota, EEUU.  
Profesor Titular del Departamento de  
Ingeniería Química,  
Universidad de Concepción.  
Investigador Principal y Sub-Director CRHIAM.

---

## RESUMEN

La Industria 4.0, Cuarta Revolución Industrial o Transformación Digital, es el prototipo actual de los sistemas productivos que involucra a la informática y automatización del pasado, la integración de una serie de capacidades adicionales asociadas a gestión de grandes volúmenes de datos, comunicación generalizada entre dispositivos y sensores de múltiples variables, algoritmos de análisis complejos y auto aprendizaje de las máquinas. Estas tecnologías transforman totalmente la manera en la que los individuos crean y producen bienes y servicios, y cómo los sistemas productivos se controlan, se reparan o se desarrollan así mismos, con niveles de autonomía que abren enormes oportunidades para la sociedad en su conjunto.

Esta revolución impacta en industrias como la minería, en la que Chile tiene un rol preponderante a nivel mundial, que actualmente lo obliga a enfrentar desafíos muy importantes. Entre estos se cuentan la baja ley de los yacimientos, la escasez de agua, costo de la energía y los impactos ambientales que afectan su competitividad, los que pueden ser abordados con la utilización de las ventajas que ofrece la Industria 4.0 en el marco de una Minería 4.0. La integración de estas tecnologías en el entorno minero local, origina nuevas realidades en la generación de soluciones que conllevan la transición de un sector inicialmente consumidor de los desarrollos tecnológicos, hacia un escenario de colaboración con la investigación, desarrollo e innovación que permite generar nuevas fuentes de impacto económico y social, siguiendo el camino de países como Australia, que se ha convertido en exportador de clase mundial de conocimiento tecnológico en minería.

---

## INTRODUCCIÓN

Los desafíos que enfrenta la minería en los tiempos actuales son diversos destacando la baja ley de los yacimientos minerales; los mercados que, valoran, premian y castigan a los productores según el impacto que generen en la sociedad y el medio ambiente; y la criticalidad de los costos para una misma producción, todo en un escenario de la economía altamente cambiante.

Por otra parte, los desarrollos tecnológicos muestran un fuerte dinamismo que influye en la producción de los bienes y servicios. Sin embargo, la cultura de cambio en la industria minera es más conservadora y resistente a la incorporación de nuevas tecnologías en los procesos productivos, lo que provoca que la adopción tecnológica sea relativamente baja en comparación con otras industrias. De esta forma, la incorporación de nuevas tecnologías debe mostrar una justificación robusta, basada en una validación previa en alguna industria y tener un alto impacto, lo que es difícil en la mayoría de los casos si se trata de innovación, especialmente si lo que se busca es diferenciación de la competencia. Esta dicotomía se ve neutralizada con la creciente presión de adopción de las empresas, cuando se ha logrado traspasar la barrera de la confianza en que la solución propuesta es un aporte efectivo a la competitividad de la industria minera.

Este fenómeno se observa con la irrupción de muchas tecnologías en el mercado, que Geoffrey A. Moore describe como el Ciclo Vital de Adopción de Tecnología en su libro «Cruzando el abismo» (Moore, 2015), que incluye a un grupo de entusiastas y visionarios que adoptan nuevas tecnologías rápidamente, y otro grupo más conservador que espera a que las tecnologías maduren.

La Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 es una manifestación de convergencia de distintas tecnologías que permite expandir las posibilidades de nuevas soluciones para enfrentar múltiples problemas de las industrias, donde la necesidad por competir efectivamente en el mercado y prevalecer como empresa obliga a tener un comportamiento menos conservador. La oferta tecnológica es demasiado dinámica y las empresas clientes están obligadas a contar con capacidades para capturar las oportunidades que ofrece el mercado tecnológico sin mucho espacio para el conservadurismo. Esto lo están entendiendo de a poco las empresas mineras y están incorporando las soluciones de la Industria 4.0, llevando a configurar una Minería 4.0. como un fenómeno de nivelación estratégica para mejorar la posición que tiene Chile, como jugador relevante a nivel mundial en minería. El desafío es abrazar esta corriente de forma rápida para mejorar los estándares de la propia industria minera y transitar hacia un ecosistema de innovación en minería.

## INDUSTRIA 4.0

Los conceptos de Industria 4.0, *big data* y *machine learning* son expresiones que escuchamos frecuentemente y que, intuitivamente, relacionamos con un importante cambio en el mundo minero. Pero, ¿qué significan en realidad y cómo se relacionan con nuestra actividad académica y profesional? En esta Serie Comunicacional pretendemos aclarar estas interrogantes.

El mundo ya ha visto tres cambios de paradigma, más conocidos como revoluciones industriales.

- Industria 1.0. Mecanización y masificación del uso de energía en base a vapor
- Industria 2.0. Producción en masa y masificación del uso de energía eléctrica
- Industria 3.0. Sistemas de tecnologías de información y producción automatizada
- Industria 4.0. Sistemas ciber-físicos

La Industria 4.0, Cuarta Revolución Industrial o Transformación Digital (TI), se manifiesta en la masificación de los sistemas ciber-físicos y nuevos desarrollos tecnológicos, como la automatización, internet de las cosas, análisis avanzado de datos e inteligencia artificial. Este concepto se basa en una digitalización avanzada de los procesos de producción y la combinación de tecnologías orientadas a comunicación por redes digitales, como Internet, lo que permite la conexión entre sensores inteligentes, máquinas y sistemas de TI en toda la cadena de valor.

Los beneficios incluyen aumento de la productividad por la automatización de los procesos de producción y toma de decisiones, reducción de residuos, mejor desempeño del uso de los equipos y disminución de los costos de mantención, y mejora en la calidad de vida de los trabajadores y la comunidad que habita o se ve impactada por los procesos industriales.

Para el desarrollo de la Industria 4.0, esto implica una nueva clase de aspectos organizacionales, conocimientos especializados y experiencia asociados a las nuevas tecnologías. El cambio entre la Industria 3.0 y la 4.0 supone la incorporación de inteligencia digital a los procesos, donde los componentes que utilizan lógica programable reactiva dan paso a sistemas complejos, que usan distintas tecnologías para capturar y procesar información sofisticada y tomar decisiones propias, con algoritmos de respuestas pre definidas o aprendidas en la aplicación. Estos cambios se integran con una serie de elementos físicos en procesos productivos o de

apoyo y también en sistemas más grandes relacionados con la gestión integral de procesos.

La transformación digital de las empresas no es un proceso de deshumanización, donde la actividad se transfiere a las máquinas, desplazando a las personas. Es más bien un proceso de mutación de las labores que realizan las personas, donde las capacidades y conocimientos son distintos, que incluyen nuevas formas de organización, comunicación, e interacción con las máquinas. Es un proceso desafiante para la cultura actual de la industria minera, en particular si se espera que 80% de las competencias laborales actuales en el sector minero en Chile pudieran cambiar en el mediano y largo plazo como consecuencia del progreso tecnológico, con un 40% de estas competencias con una alta probabilidad de ser reemplazadas por procesos automatizados (Consejo de Competencias Mineras, 2018).

Schwab (2017) indica que existen 12 tipos de tecnologías asociadas a la revolución de la Transformación Digital:

### FÍSICAS:

- 1. Robótica avanzada:** Uso de robots para automatización de procesos y operación remota y autónoma, con capacidades que permiten su uso en tareas de apoyo a la industria y a las personas, incluso asistiendo a las personas con funciones reducidas o potenciando las capacidades humanas para el trabajo o la vida diaria. Esto se hace integrando sensores y procesadores, mecánica y algoritmos avanzados y accesibles económicamente, para aplicaciones como trabajo industrial o servicios repetitivos (ej. preparación de comida, mantención, cirugía, cuidado de mayores, limpieza).
- 2. Vehículos autónomos:** Vehículos que pueden navegar y operar de forma autónoma o semiautónoma, como aplicación masiva de los desarrollos vistos en robótica, dotados con inteligencia artificial y visión computarizada mediante sensores como GPS (posicionamiento de objetos) y LIDAR (rastreo de objetos) fusionados en IoT (Internet de las Cosas). Las aplicaciones incluyen la industria, en transporte y trabajo con maquinaria pesada, y en vehículos para transporte general de las personas.
- 3. Impresión 3D:** También conocida como fabricación aditiva, permite crear objetos físicos a partir de modelos digitales, con la integración de hardware, software y materiales para la fabricación, resultando en

prototipos y productos para uso final directo, tales como bio-impresión de tejidos, fabricación de herramientas en lugares remotos o productos de consumo. Las tecnologías asociadas a la impresión 3D incluyen moldeo por láser (Selective laser sintering, SLS), fundición en plástico (Fused deposition modeling, FDM), estereolitografía (SLA), fundición en metales (Direct metal laser sintering, DMLS).

4. **Materiales avanzados:** Materiales con características superiores de resistencia, conductividad, memoria o auto reparación. Aquí se incluyen materiales como grafeno, nanotubos de carbono, nanopartículas, materiales piezoeléctricos. Las aplicaciones incluyen sensores, compuestos avanzados, nuevas fuentes y almacenamiento de energía, superconductores, celdas solares, químicos y medicina.
5. **Almacenamiento de energía:** La mejora de los dispositivos para almacenamiento de energía permitirá mayor eficiencia y alternativas de recuperación, lo que impactará en el uso de distintos dispositivos eléctricos y electrónicos de escala micro (implantes y dispositivos de uso personal de distinto tipo), vehículos eléctricos e híbridos, redes de distribución eléctrica, y en general operación de instalaciones industriales fuera de red (*off grid*).
6. **Petróleo y gas:** Tecnologías relacionadas con monitoreo micro sísmico, fracturación del suelo (*fracking*), excavación horizontal (pozos horizontales). Las aplicaciones incluyen exploración y técnicas de recuperación de fuentes de gas y petróleo (*shale gas*, hidratos de metano, etc.) de formas más económicas.
7. **Energía renovable:** Desarrollos en la generación de electricidad desde fuentes renovables con impacto reducido en el medio ambiente. Las tecnologías incluyen aplicaciones en celdas fotovoltaicas, viento, concentración solar, mar y geotermia.

#### **DIGITALES:**

8. **Internet móvil:** Carretera digital y potencia de procesamiento de los dispositivos que permiten transferencia de datos para múltiples propósitos en casi cualquier parte del mundo.
9. **Automatización en el trabajo asociado al conocimiento:** *Block chain*, *big data*, inteligencia artificial y *machine learning* apuntan a potenciar aplicaciones en apoyo a la educación, diagnóstico médico y descubrimiento de drogas, optimización de procesos productivos, digitalización de la economía.
10. **Internet de las cosas (IoT):** Las máquinas conectan entre sí directamente vía online utilizando dispositivos de comunicación de bajo costo (RFID,

WIFI, Bluetooth, etc.), para su interacción en procesos productivos y de uso normal de las personas, como la domótica y en sensores para monitoreo de la salud.

- 11. Nube (Cloud):** Uso de tecnologías de transmisión y almacenamiento online de la información para generar una desvinculación física entre el repositorio y el usuario, por medio de software de gestión en la nube, redes de alta velocidad, data centers y aplicaciones online (*Software as a Service*, SaaS).

### **BIOLÓGICAS:**

- 12. Genómica:** El secuenciamiento de bajo costo de genes, análisis avanzados y edición genética son tecnologías principalmente orientadas a la salud y la producción de alimentos, así como la remediación de ambientes y otras aplicaciones industriales. Ejemplos se pueden encontrar en la tecnología CRISPR-CAS9 que persigue la edición de genes "defectuosos", que puede ser causa de enfermedades, y en el desarrollo de bacterias que mejoren procesos industriales como la biolixiviación de minerales.

De las tecnologías mencionadas, por su impacto transversal a todas las industrias y la sociedad, destacan las siguientes.

### **Grandes cuerpos de datos (Big Data)**

Es un campo que aborda formas de analizar, extraer y procesar sistemáticamente grandes y complejos conjuntos de datos estructurados, semiestructurados y no estructurados para su uso como insumo por individuos y máquinas, en aprendizaje automático (inteligencia artificial y *machine learning*), modelamiento predictivo y otras aplicaciones de análisis avanzado, a partir de patrones observados.

Las principales dificultades vinculadas a la gestión de estos grandes volúmenes de datos se centran en la recolección y el almacenamiento de los mismos, en búsquedas, comparticiones, análisis y en las visualizaciones y representaciones. La capacidad de cómputo condiciona la complejidad de los análisis debido a que uno de los aspectos relevantes es la oportunidad en la que la información está disponible, como por ejemplo, en el análisis en tiempo real de procesos productivos complejos, como aquellos generados en una mina o en aplicaciones personales de realidad virtual. Los avances tecnológicos y productivos han reducido exponencialmente el costo del almacenamiento y la computación.

La inteligencia artificial, los dispositivos móviles, las redes sociales y la IoT están impulsando datos complejos a través de nuevos formatos y fuentes de datos. Por ejemplo, *big data* proviene de sensores, dispositivos, vídeo/ audio, redes, archivos de registro, aplicaciones transaccionales, web y redes sociales, gran parte de los cuales son generados en tiempo real y a gran escala.

*Big data* tiene una o más de las siguientes características: alto volumen, alta velocidad o alta variedad:

- Volumen. *Big data* en sí está relacionado con un tamaño enorme.
- Velocidad. La velocidad de generación, procesamiento y disponibilidad oportuna en el punto de consumo de los datos (etiquetas RFID (identificación por radiofrecuencia), sensores y otros dispositivos) se produce en tiempo casi real.
- Variedad. La naturaleza y fuente los datos, tanto estructurados como no estructurados, es heterogénea. Los datos pueden ser desde numéricos, en bases de datos tradicionales, hasta documentos de texto no estructurados, correo electrónico, vídeo, audio, imágenes.

### **Machine Learning**

A *big data* se suma el análisis avanzado, que dota a máquinas con la capacidad de aprender gracias a la disponibilidad de modelos de aprendizaje autónomo (*machine learning*).

El aprendizaje autónomo se centra principalmente en el desarrollo y mejora de programas informáticos que pueden enseñarse a sí mismos a crecer y cambiar cuando se exponen a nuevos datos, encontrando nuevos patrones que no es posible generar de forma eficiente como parte del trabajo humano.

El aprendizaje autónomo es un subcampo de la Inteligencia Artificial (IA). La IA se refiere a los sistemas o máquinas que imitan la inteligencia humana para realizar tareas y que tienen la capacidad de mejorar iterativamente a partir de la información que recopilan.

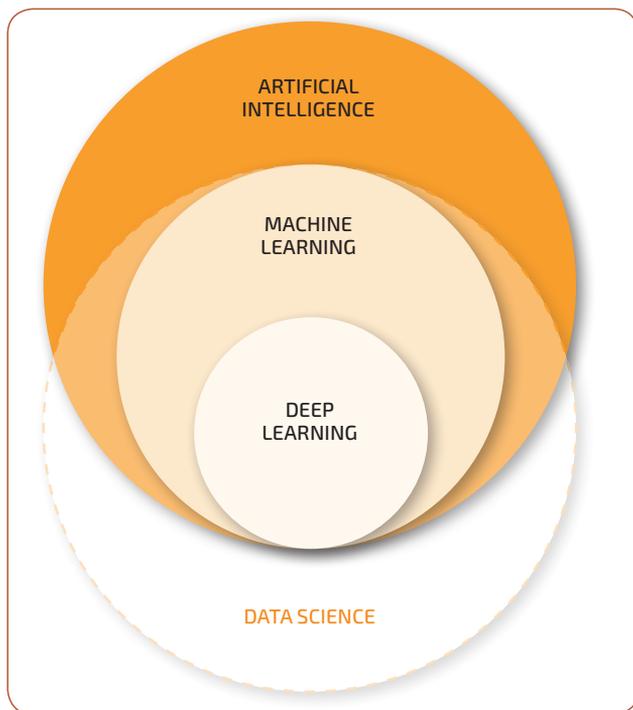


Figura 1.

Relación entre *machine learning* e Inteligencia Artificial.

Fuente: Oracle

### Tipos de *Machine Learning*:

- 1. Aprendizaje supervisado:** En este aprendizaje se usan datos marcados para entrenar algoritmos, la entrada y la salida son conocidas. Este método se utiliza habitualmente en aplicaciones en las que los datos históricos predicen los próximos eventos probables.
- 2. Aprendizaje no supervisado:** En este aprendizaje se utilizan datos no marcados para entrenar el algoritmo, los que generan patrones de forma independiente. Por ejemplo, puede identificar segmentos de clientes con atributos similares que luego pueden ser tratados de forma similar en las campañas de marketing.
- 3. Aprendizaje semi supervisado:** Este aprendizaje es un híbrido entre el aprendizaje automático supervisado y el no supervisado. El aprendizaje semi supervisado se utiliza para los mismos fines que el aprendizaje supervisado, en el que se emplean tanto datos etiquetados como no etiquetados para el entrenamiento, normalmente una pequeña cantidad de datos etiquetados con una cantidad significativa de datos no etiquetados. Este tipo de aprendizaje puede utilizarse en métodos de clasificación, regresión y predicción.

## Internet de las Cosas (*Internet of Things*, IoT)

La IoT se refiere a la capacidad de interconexión de aparatos físicos a los que se puede incorporar dispositivos con lógica programable, tanto para uso cotidiano de las personas o para fines industriales, ambientales, y de la sociedad como conjunto. Entre estos se encuentran máquinas portátiles, equipos productivos, vehículos, electrodomésticos, robots y otros que son provistos de sensores y capacidad para conectarse a internet, para intercambio de datos entre sí y otras fuentes como *big data* y analítica avanzada (*advanced analytics*), sin intervención humana. Los desafíos se encuentran en el límite de control que se entrega a la interacción de las máquinas para procesos que pueden ser críticos, y la infraestructura de comunicación o carretera digital por donde transita la enorme cantidad de datos generados.

## Robótica

La robótica seguirá teniendo una masificación justificada en la industria, como macro-tendencias que facilitan mejoras tecnológicas en automatización y control, en el rol humano, en el trabajo físico en las empresas y en particular en la repuesta ante el Covid19.

Los impactos se verán potenciados en el uso de automatización de la cadena de suministro, incluyendo la venta, logística y distribución, drones para distribución en la "última milla", uso de IA, sistemas de visión artificial, sentidos mejorados con ayuda de sensores avanzados, nuevos sistemas de motricidad (avances en mecánica, y materiales inteligentes).

Mención aparte es la electro-movilidad y almacenamiento de energía. Las mejoras en la producción de energía y la duración de las baterías hacen viable una gran gama de aplicaciones en robótica y sistemas digitales asociados.

## MINERÍA 4.0

Nada en el pasado se parece a la actual disrupción digital, producida por la automatización de procesos, inteligencia artificial, internet, modelación y velocidades de procesamiento de información, que se presentan como una oportunidad para un gran cambio tecnológico, que hoy es llamado la *Cuarta Revolución Industrial*, o también *Transformación Digital* (Bascur y O'Rourke, 2021). Minería 4.0 es la Revolución Industrial 4.0 aplicada a la minería. El futuro de la minería reside en la implementación de estas nuevas tecnologías que permiten incrementar la productividad, la seguridad y el bienestar de los trabajadores de las empresas mineras y la sociedad en su conjunto.

La oportunidad es muy grande. En 2017 el Foro Económico Mundial y Accenture estimaron un beneficio potencial de 190.000 millones de dólares durante el período 2016-2025 para la industria minera, como consecuencia de la Transformación Digital, equivalente a aproximadamente el 9% de las ganancias de la industria (World Economic Forum, 2017).

La justificación para implementar soluciones de Industria 4.0 apunta a dar respuesta a los nuevos desafíos de la minería actual, que incluye reducir costos de explotación de yacimientos, algunos con leyes muy bajas y que en condiciones normales incluso no serían económicamente viables. Las expectativas son altas respecto de los impactos a lograr, los que deben ser relevantes en productividad, seguridad y externalidades, de modo que se justifique el involucramiento de la empresa en iniciativas de innovación que todavía pueden ser muy nuevas a la vista de los tomadores de decisión en la empresa y que deben enfrentar una cultura reactiva al cambio tecnológico.

La minería es conservadora al momento de incorporar nuevas tecnologías en sus operaciones, es frecuente escuchar "¿dónde se ha aplicado?" cuando se propone algo nuevo. Una encuesta realizada a 432 empresas del sector de equipos, tecnología y servicios de minería (METS) en Australia en 2015, reveló que para el 63% de estas empresas la innovación era fundamental para su estrategia comercial, impulsada principalmente por una visión centrada en el cliente, para mantenerse por delante de la competencia, y por necesidades de soluciones directas para sus clientes (Sánchez y Hartlieb, 2020).

El sector de proveedores mineros en Chile tiene una opinión similar. Ciento cinco de estas empresas fueron encuestadas en 2019, revelando un alto

nivel de gasto orientado a la innovación. En promedio, reportaron gastos de innovación por 14.3% de los ingresos de 2018, alcanzando niveles de 28.7% y 22.3% en los proveedores de mediana y pequeña escala, respectivamente. Asimismo, sus proyectos de innovación se vieron impulsados principalmente por las necesidades de soluciones directas para sus clientes, la necesidad de mantenerse por delante de la competencia y de tener la innovación como núcleo de su estrategia empresarial (Sánchez y Hartlieb, 2020).

Además de la dinámica de desarrollo de tecnologías, ya sea por parte de las propias empresas mineras o de sus proveedores, la industria minera también ha adoptado tecnologías transversales o de otras industrias. Las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) han facilitado la introducción de importantes mejoras en las técnicas de exploración, minería y procesamiento. Algunos ejemplos son simulaciones, sistemas de sensores, automatización y operaciones controladas a distancia (Sánchez y Hartlieb, 2020).

Al analizar la cadena de valor del proceso minero es posible aplicar avances de la Industria 4.0 en los distintos eslabones, que van desde la exploración hasta la comercialización del producto final, en funciones de apoyo en la empresa, como administración, recursos humanos, seguridad, entre otros, y también en aspectos relacionados con las externalidades del proceso en el medio ambiente y la comunidad.

Las funciones propias de una empresa minera en cualquier país se pueden clasificar en Exploración y Planificación; Extracción y Procesamiento; Marketing y Ventas; y Suministro y Logística. Algunas de las tecnologías de la Industria 4.0 se pueden organizar de acuerdo a la Figura 2.

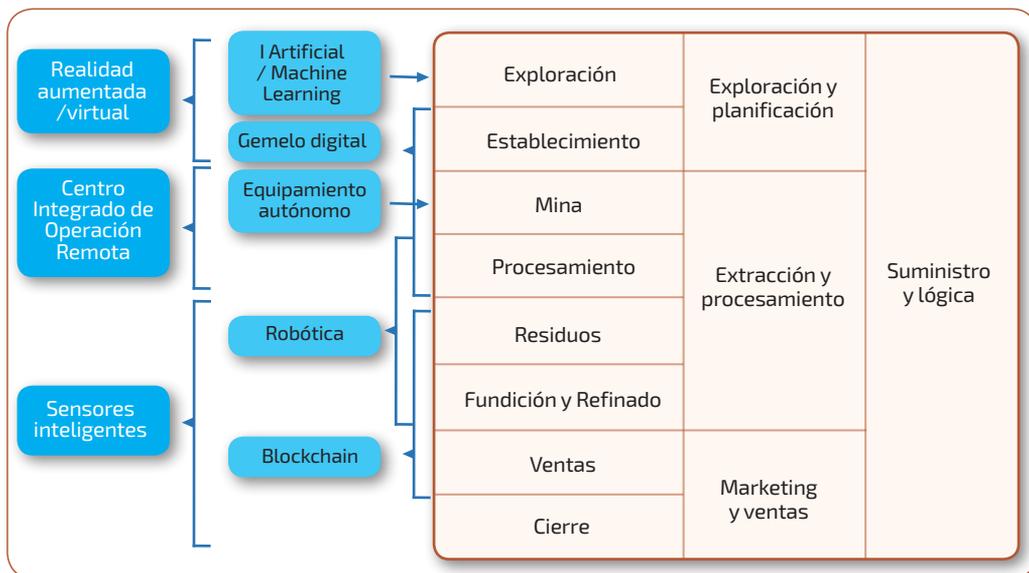


Figura 2.

Relación entre tecnologías de Industria 4.0 y actividad minera.  
Fuente: Adaptado de Meller y Salinas (2019) y Sánchez y Hartlieb (2020).

**Exploración y planificación:**

El uso de *big data* reduce costos de exploración por análisis de una gran cantidad de datos recogidos por sensores y equipos de monitoreo, lo que permite generar simulaciones y estrategias de explotación de yacimientos y tomar decisiones con mayor precisión.

**Extracción y procesamiento:**

Distintas tecnologías se pueden integrar para entregar soluciones en toda la cadena del proceso físico de la minería. Estas tecnologías ya están presentes, como sensores para alimentar con datos a equipos que funcionan en remoto, que permiten el análisis para la toma de decisiones de sistemas expertos autónomos y posteriormente la acción de equipamiento pesado de alta precisión y eficiencia. Todo esto evitando riesgos para operadores humanos.

### **Cadena de suministro y logística:**

El proceso de la mina se extiende hasta la salida del producto terminado, transporte hasta el puerto y posterior embarque y el monitoreo de estas operaciones para contar con una adecuada determinación de los volúmenes, estado de calidad del material, localización y operaciones de maniobra. Tecnologías como IoT, sensorización, *blockchain*, entre otras, tienen relevancia en este ámbito de actividad. Aquí el alcance de la digitalización involucra a otros actores externos como los responsables del transporte y la logística, por lo que una masificación y coordinación del uso de las tecnologías es clave.

### **Marketing y comercialización:**

Cubre la forma de abrir la cadena productiva a actores externos, que representan el interés del mercado en conocer de forma precisa la evolución de la producción y su trazabilidad para tomar decisiones de adquisición del producto. *Big data* y *blockchain* permiten conocer de forma transparente la información crítica de distintos parámetros sensibles para el mercado, como la huella de agua, la huella de carbono y residuos como relaves, asegurando una relación viable de largo plazo.

---

## **MINERÍA 4.0 EN CHILE**

Las menas de cobre en Chile se están volviendo extremadamente variables en su mineralogía, dureza, contenido de finos y en la declinación permanente en el contenido de metal, con un valor típico de 0,5% de cobre. Estos problemas perturban todas las operaciones de una planta concentradora, la molienda, los circuitos de flotación y la recuperación de agua en el proceso de separación sólido-líquido.

La industria minera ha reconocido la necesidad de incorporar soluciones tecnológicas que reduzcan los costos y que permitan extraer minerales de lugares más lejanos, más profundos y con menores leyes. Sin embargo, la adopción de las tecnologías ha sido lenta en comparación con los países que tienen altos indicadores en este sentido, lo cual se debe principalmente a una oposición al cambio y aversión al riesgo de los resultados de la aplicación de estas soluciones. La implementación de estas tecnologías en las distintas áreas de proceso requiere de inversiones que pueden resultar altas y su operación puede traer problemas si las soluciones tecnológicas no funcionan como se espera. Por esta razón, la decisión de incorporar

innovaciones en la minería es un problema clásico de cultura y confianza en que la promesa de la oferta tecnológica será efectiva.

Los problemas de productividad no se han abordado integralmente en el pasado, debido a los ciclos de bonanza de los precios altos de los minerales. Esto ha generado un rezago en la búsqueda de alternativas disponibles de naturaleza tecnológica para incorporar proactivamente la mejora estratégica de los estándares de la empresa en forma integral. La claridad de esta situación es palpable con un *benchmarking* (comparación) en la industria.

En general, el nivel de digitalización de la minería es bajo en comparación con otras industrias. De las 10 empresas mineras mundiales más grandes (Rio Tinto, BHP, Vale, Glencore, Anglo American, Codelco, Fortescue Metals Group, OCP Group, Freeport-McMoRan, y Nornickel), solo seis han abordado la transformación digital como una estrategia clave. Tres de ellas cuentan con beneficios cualitativos, en tanto, con aumentos cuantitativos reales, solo se encontró una empresa. (Sganzerla *et al.*, 2016).

En Chile, una encuesta realizada a 105 empresas del sector proveedor minero en 2019 mostró que en el 59% de ellas se percibió un nivel medio de interés por incorporar tecnologías relacionadas con transformación digital, y el 32% de un bajo nivel de interés. Solo en el 9% de las empresas mineras encuestadas se percibió un alto nivel de interés por incorporar estas tecnologías en sus operaciones (COCHILCO, 2019).

Sin embargo, sí existen casos de alta adopción de transformación digital. Las minas de mineral de hierro de LKAB, Kiruna y Malmberget, en Suecia, operan bajo una combinación de equipos controlados a distancia y completamente automatizados para procesos de perforación, tronadura y transporte. Además, la automatización completa y la electrificación son elementos centrales en los planes futuros para niveles más profundos, para cuyo desarrollo KLAB ha estado trabajando en estrecha colaboración con empresas de alta tecnología, como ABB, Epiroc y el grupo Volvo. En forma similar, la mina de oro subterránea Syama en Mali, propiedad de Resolute, constituye la primera mina totalmente automatizada, que incorpora un sistema de transporte automatizado, nivel de manipulación automatizado y digitalización de la mina (Sánchez y Hartlieb, 2020).

En Chile existe una creciente adopción de tecnologías tales como equipos autónomos y semiautónomos, camiones, cargadores, taladros y trenes, los que comenzaron a probarse hace más de una década. Codelco tiene un

Centro de Operación Remota (ROC) en su mina Ministro Hales y otros en desarrollo en otras tres divisiones. BHP también ha implementado un Centro de Operaciones Integradas (CIO) en Santiago, desde el cual coordinará todas sus operaciones en la región (Sánchez y Hartlieb, 2020).

Actualmente, existen sensores de importantes variables de los procesos mineros que proporcionan grandes cantidades de datos necesarios para la optimización y control del proceso. Sin embargo, todavía no es generalizado su uso en estrategias basadas en estos datos (*big data*) que permita que el personal de operaciones y mantenimiento puedan tomar medidas correctivas rápida y fácilmente cuando se producen condiciones anormales.

Una plantilla digital de la planta (Gemelo Digital) puede transformar los datos en información operativa en tiempo real para determinar tiempos de inactividad ocultos y las respectivas pérdidas. Esto permite relacionar los fenómenos de la producción con la optimización del uso de energía, el aire y el agua para mejorar la sostenibilidad de las operaciones en una concentradora. Al medir y manejar estos tiempos improductivos, se encuentran nuevas formas de evitarlos y se mejora la rentabilidad de la planta. La información creada por el análisis de datos en tiempo real permite calcular la recuperación de las especies mineralógicas y desarrollar modelos de análisis predictivos (*machine learning*) para encontrar los mejores resultados en el funcionamiento de la planta basado en el tipo de mineral extraído. También permite crear nuevos vínculos de colaboración entre la mina, la concentradora y otros procesos de la empresa, incluyendo los proveedores de materiales y servicios.

Actualmente, existe la tecnología para que el área de Operaciones Remotas pueda modelar de forma integrada las operaciones mineras, desde la perforación a la entrega del producto. Los trabajadores pueden manejar en forma virtual los procesos y manteniéndose seguros cuando las operaciones se encuentran en lugares remotos y de difícil de acceso. Empresas pequeñas especializadas y universidades pueden contribuir al aumento de la productividad de plantas mineras mediante el desarrollo de modelos predictivos para incorporar mejoras en eficiencia de las operaciones, optimizar insumos como energía y agua y minimizar impactos de residuos.

Respecto a los costos, la energía tiene una importancia relevante en la industria minera. La eficiencia energética es clave en la minería para una operación rentable por lo que la introducción de energía renovable es fundamental.

La eficiencia, al igual que en otros procesos productivos, se logra a través del uso de herramientas asociadas a la digitalización de la industria. La tecnología de sensores, equipos autónomos y la *big data* junto con fuentes de energía renovables apuntan a mejorar la eficiencia energética.

Australia ya definió que su minería será de cero emisiones en el año 2050 (Lara, 2021). El plazo es largo, y responde a una presión del mercado y la sociedad global. Hoy Chile ha avanzado a una meta similar, teniendo actualmente un 20% de la energía de estas fuentes renovables utilizada en minería.

La seguridad operacional es un ámbito que debe ser abordado permanentemente y las tecnologías asociadas a la Minería 4.0 generan una gran variedad de soluciones para mejorar los estándares de seguridad y salud de los trabajadores que están expuestos a una serie de riesgos directos en las faenas, o indirectos por enfermedades asociadas a la operación minera, como gases, polvos, químicos, ruidos, temperaturas extremas y factores individuales como el cansancio o falta de concentración.

Finalmente, otro frente de actividad para las nuevas tecnologías es el medio ambiente y comunidad, que es cada vez más sensible para los actores del entorno circundante y para el mercado global. El efecto de la actividad minera en el medio ambiente y en las comunidades, por emisiones (relaves o huella de carbono) y por consumo de agua y energía, se puede medir objetivamente en la actualidad con sistemas digitalizados, como el uso de sensores validados con tecnología *blockchain*, que hacen que el sistema sea preciso, trazable e inalterable. La postura de la empresa para transparentar el impacto generado, con una solución de este tipo, se ve influenciada por la presión de los actores involucrados en este tema, en la medida de que sean cada vez más conocidas las posibilidades que ofrecen estas tecnologías.

En base a las 12 tecnologías mencionadas anteriormente en la descripción de la Industria 4.0 o de la Cuarta Revolución Industrial, y en consideración a la estructura de la cadena de valor de la industria minera, en Chile se formó la Comisión de Minería 4.0, que identificó 77 tecnologías aplicables al negocio minero en Chile, desde la exploración, hasta el cierre y remediación de una faena, presentando recomendaciones para lograr en Chile una Minería Inteligente (Cesco, 2020). Se definió el estado de desarrollo de esas tecnologías en cada etapa de la cadena de valor del negocio minero, considerando cuatro grupos.

- Grupo I. Tecnologías que hoy se encuentran a nivel piloto, o que recién están implementándose en una faena; son maduras desde el punto de vista tecnológico, pero inmaduras desde el punto de vista de la implementación en la industria minera.
- Grupo II. Tecnologías maduras que ya han sido ampliamente incorporadas a la industria minera.
- Grupo III. Tecnologías inmaduras a nivel global con altas expectativas respecto a su uso, pero que, a su vez, en la industria minera están ampliamente incorporadas.
- Grupo IV. Tecnologías inmaduras que no han sido implementadas en la minería.

La Figura 3 muestra el estado de desarrollo tecnológico de la etapa de Procesamiento de Minerales y Metalurgia Extractiva (Cesco, 2020), que concierne a esta Serie Comunicacional. Se identifican 15 tecnologías maduras, que han logrado penetrar en la industria de una forma masiva y que corresponden al Grupo II (Figura 3, sección superior derecha). El aporte de CRHIAM incluye la aplicación de *machine learning* al diseño molecular de aditivos para la industria, como colectores, floculantes, anti-incrustantes, etc, en el marco de la química verde que excluye grupos químicos que atentan contra el ambiente (Quezada *et al.*, 2021, 2020, 2019), y, por otra parte el desarrollo y aplicación de Visión Artificial al estudio de coalescencia de burbujas en un sistema dinámico, en función del tipo de agua y espumantes, de interés en procesos de flotación (Solar, 2021).

Un análisis similar de tecnologías inteligentes en otras etapas de la cadena de valor como Exploración y Geociencias, Extracción y Servicios se encuentra disponible en el informe de Cesco (2020).

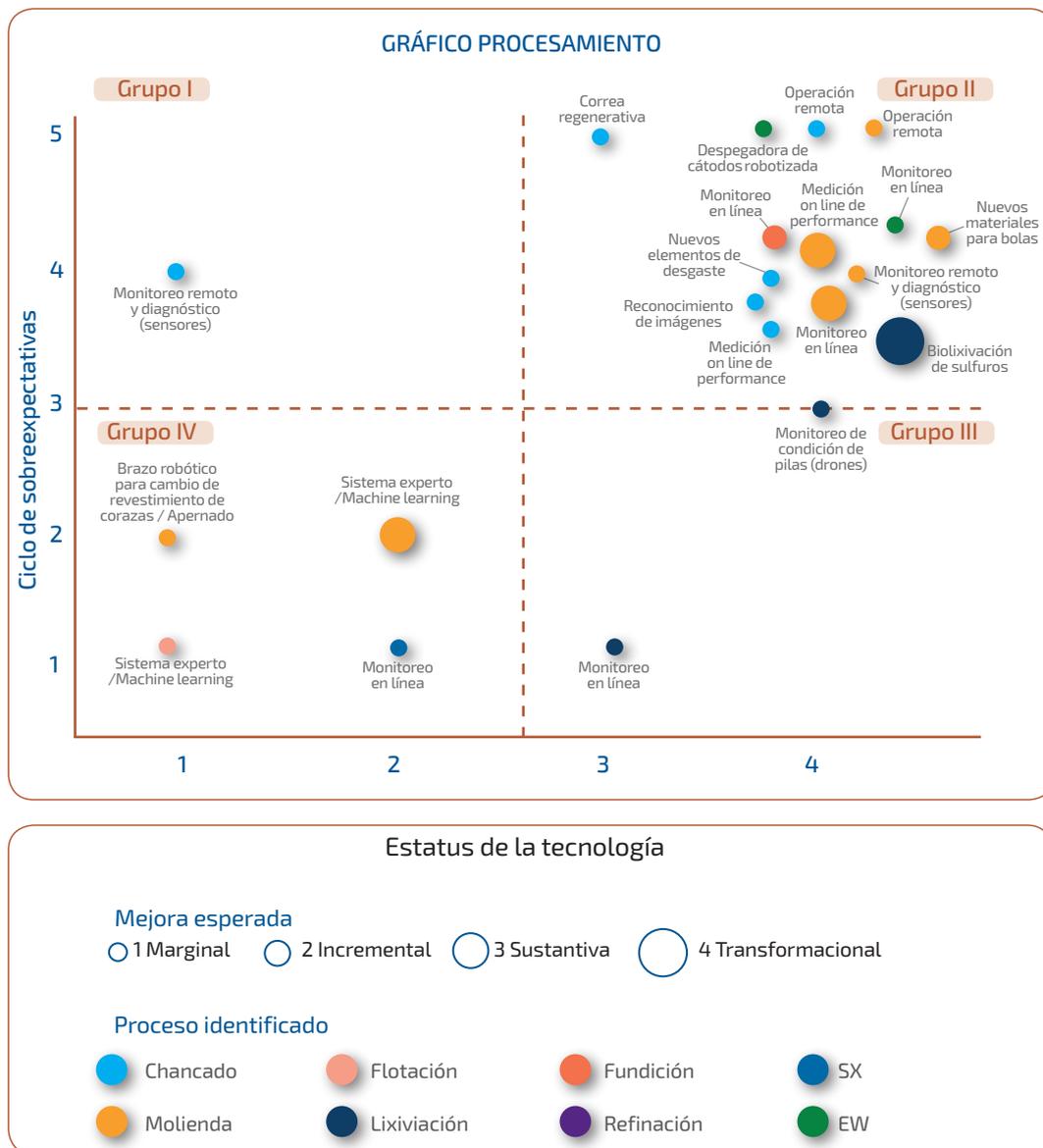


Figura 3.

Grado de madurez de tecnologías aplicadas en minería.  
Fuente: Cesco, (2020).

En general, la penetración de nuevas tecnologías en los procesos mineros enfrenta las barreras de validación de uso exitoso en la industria, con casos de negocios que refuerzan la conveniencia económica de su aplicación, más allá del nivel de mejoras marginales; conocimiento técnico de la operación y mantención de la solución tecnológica. También se contempla el requerimiento de otras tecnologías complementarias como el monitoreo, para recoger data que apoye la operación y valide el uso de la tecnología en la planta particular; y finalmente una falta de cultura organizacional proclive a la innovación como herramienta de mejoras relevantes en el desempeño general de los procesos productivos y la empresa en general.

Si bien la madurez de la propia tecnología es apropiada en cuanto a su validación como solución efectiva, muchas veces la política organizacional y actitud cultural son insuficientes para adoptar la innovación como estrategia de competitividad. La presión para que esto ocurra tendrá que venir desde el entorno, a través de comparaciones o *benchmarking* con la industria internacional, por ejemplo, desde la realidad del sector METS (*mining equipment, technology and services*) de Australia y los precios a la baja de los minerales en el mercado, que obligarán a buscar soluciones para alcanzar mayor eficiencia.

---

#### **ROADMAP: DIGITALIZACIÓN PARA UNA MINERÍA 4.0.**

El Roadmap de Digitalización para una Minería 4.0 es una iniciativa liderada por el Consejo Minero, Fundación Chile y la Corporación Alta Ley con el apoyo de Corfo y la asesoría técnica del programa Interop de Fundación Chile, que busca identificar aquellos ámbitos de la minería en que las nuevas tecnologías pueden agregar más valor en los próximos 15 años. El objetivo de esta iniciativa es aportar orientaciones a nivel sectorial, para aprovechar las oportunidades que ofrecen las tecnologías digitales. En este sentido, se identificó un amplio número de desafíos críticos, los que van desde aspectos digitales como la integración de sistemas, gobierno, gestión y análisis de datos, y ciberseguridad, desarrollo de talento, y licencia social para innovar. Además, complementando la identificación de aquellos desafíos, se consolidó un grupo de potenciales soluciones y proyectos, que permitirían acelerar y habilitar la captura de valor de las tecnologías en cuestión (Fundación Chile, Consejo Minero, y Alta Ley, 2020).

El Roadmap tiene tres Núcleos Traccionantes, propios de la actividad minera, y cuatro Núcleos Habilitantes que, sin ser exclusivos del proceso minero, condicionan la capacidad de la industria para llevar a cabo su plan de desarrollo en el corto plazo (2020/2025), mediano plazo (2025/2030) y largo plazo (2030/2035).

Los Núcleos Traccionantes y Habilitantes del Roadmap son:

- NT1-Minería Integrada e Inteligente
- NT2-Minería Verde
- NT3-Minería Segura
- NH4-Digitalización
- NH5-Ciber Seguridad
- NH6-Desarrollo de Capital Humano
- NH7-Licencia Social y Política para Innovar

Tomando en cuenta el objetivo de esta Serie Comunicacional, nos enfocamos en los Núcleos NT1, NT2, NT3 y NH4.

Para cada uno se describen los núcleos, los desafíos identificados y las soluciones adecuadas.

---

### NÚCLEO TRACCIONANTE 1 - MINERÍA INTEGRADA E INTELIGENTE

La implementación de Tecnologías 4.0 facilitan la integración horizontal del proceso minero para disminuir la variabilidad y aumentar la predicción y estabilidad, mejorando la toma de decisiones del negocio.

**Desafío 1.** Procesos predecibles, estables y controlados, acotando y disminuyendo su variabilidad (Producción y Mantenimiento)

La transición de los procesos de toma de decisiones "humanas" hacia aquellos apoyados por lógica programada, que opera a través de dispositivos de operación automática o remota, permite mejorar la estabilidad y control de los procesos, logrando mejor desempeño en los indicadores generales, elevando los niveles de seguridad para el personal y relevándolo de tareas rutinarias.

La digitalización de los procesos permite también recolectar valiosa información de los procesos que es retroalimentada a los algoritmos de aprendizaje para generar futuras estrategias de operación optimizadas, mejorando la productividad y la sustentabilidad.

Los desafíos se resumen en la falta de proveedores de los elementos para ser implementados y generar los beneficios descritos, los cuales incluyen recursos humanos capacitados y las tecnologías validadas para los procesos mineros.

#### Soluciones:

- **Control Automático de los procesos.** Integración de los componentes físicos, la programación de los dispositivos con la configuración adecuada para operar en los procesos mineros y el personal operativo calificado para su instalación, operación y mantención.
- **Uso de telemetría y tecnologías de control avanzado integrado.** Datos de sensores son analizados de forma automática para asistir a los operadores o tomar el control de los respectivos procesos o diseñar estrategias de producción. Por ejemplo, en martillos de roca remotos se usan sistemas de imágenes en tiempo real y proyecciones virtuales del punto de trabajo para asistir en la realización de la tarea.
- **Planificación operativa de la cadena de valor en tiempo real, bajo metodología BIM 7D (*Building Information Modeling*).** Incluye información 3D, tiempo, costos, impacto ambiental y mantenimiento. Al igual que la solución anterior, aporta a la toma de decisiones de diseño de estrategias operativas.
- **Modelamiento 3D de la mina.** De forma análoga al caso anterior estas herramientas permiten apoyar en las etapas de planificación, por medio del análisis 3D de múltiples variables de la mina, alimentadas a través de datos provenientes de distintos instrumentos y sensores.
- **Simulación dinámica de procesos.** Integra la cadena productiva en la mina, los procesos posteriores y los impactos externos, como son los ambientales, desarrollando un modelo de simulación que permite evaluar parámetros interrelacionados del modelo de forma dinámica y entregar configuraciones de escenarios para planificación integral de la operación productiva.
- **Procesos y equipos autónomos.** Los estándares de continuidad, estabilidad y exposición al riesgo de los trabajadores mejoran por medio de elementos de control remoto o automático, para operar a distancia o con completa autonomía de los equipos, como en el caso de los camiones de extracción sin conductor. Los efectos son una mayor tasa de utilización de los equipos; operación simultánea del operador en varios equipos remo-

tos; resultados más consistentes y predecibles debido a una mayor precisión; menor uso de recursos; menores residuos generados; y creación de nuevos puestos de trabajo más calificados.

Por ejemplo, a nivel internacional existe amplia experiencia de camiones "inteligentes" que usan LIDAR y GPS para el transporte de explosivos. CODELCO ya cuenta con 18 camiones autónomos.

### Desafío 2. Modelo de negocio inteligente

Este desafío busca implementar en los puntos críticos del proceso las soluciones tecnológicas disponibles para asegurar un óptimo desempeño, tanto de las variables del proceso productivo, como de las externalidades asociadas a temas ambientales y sociales. De esta forma se espera que se mejore los estándares de desempeño por la utilización de distintas herramientas disponibles para la captura procesamiento y análisis de información, que a su vez es utilizada para la toma de decisiones del personal operativo o que alimenta los sistemas de monitoreo y control, permitiendo la concentración del factor humano en aquellos aspectos claves del negocio.

#### Soluciones:

- **Scouting tecnológico.** Captura de información del entorno respecto de las tecnologías con el nivel de madurez suficiente para ser implementadas en el proceso minero. El análisis de la información incluye el grado de desarrollo de la tecnología (tecnologías emergentes, investigaciones, patentes, *benchmarking*, casos de negocios) y su eventual implementación en experiencias exitosas y relación de costo beneficio. La iniciativa incluye la implementación de prácticas y herramientas de captura y canalización de la información.
- **Centralización de datos y habilitación de analítica avanzada (*big data*).** Aportan a generar información para la toma de decisiones de alto nivel, como en el caso de la medición de la gestión productiva y el diseño de procesos, así como en la retroalimentación dinámica de éstos procesos desde los cuales fue generada la data, aportando al aprendizaje automático o *machine learning*, resultando en una mejora continua en la optimización de las operaciones operación y mantenimiento predictivo.
- **Modelamiento de la cadena de valor integrada.** La descomposición de la cadena de valor productiva del proceso minero en sus partes claves permite definir los puntos críticos de control y las variables que afectan a todo el proceso. El monitoreo de las funciones principales de los procesos

como el abastecimiento, logística, producción y distribución, así como las funciones de apoyo, como gestión de recursos humanos, desarrollo tecnológico y administración, aportan en la planificación, ejecución y control de los procesos y los resultados esperados.

- **Operación integrada en CIO (Centro Integrado de Operaciones).** Concentran información total de la operación minera, para monitorear procesos, manejar equipos de forma remota y tomar decisiones integradas, a partir de datos en tiempo real.
- **Gemelo Digital Global (*Global Digital Twin*).** Un modelo digitalizado del proceso físico se genera utilizando datos en tiempo real generados por los sensores conectados a través de la operación. Estos sensores acusan desviaciones en el funcionamiento, para ser corregidos de forma anticipada, evitando costosas consecuencias tales como detenciones no programadas de los procesos. Con el gemelo digital de la mina es posible realizar simulaciones y predecir posibles fallas o caídas en el rendimiento. Esta información también permite realizar simulaciones de escenarios operativos, de más alto nivel o para fines de entrenamiento y capacitación.

---

## NÚCLEO TRACCIONANTE 2: MINERÍA VERDE

Minería Verde es la adopción de Tecnologías 4.0 que posibiliten una minería sustentable, minimizando los impactos en el medioambiente y comunidades, reduciendo emisiones, gestionando los residuos, aumentando el uso de energías renovables y el uso eficiente de recursos energéticos e hídricos, promoviendo una economía circular.

**Desafío 1.** Control y monitoreo transparente, de recursos y parámetros relevantes de operación (agua, aire, polución, contaminación y otros) y entrega a la comunidad

Este desafío implica la posibilidad de poner a disposición de la empresa y la comunidad local información en tiempo real sobre el desempeño de indicadores y variables ambientales de su interés.

### Soluciones:

- **Sensores de datos operacionales en tiempo real.** Estos sensores operan en variables físicoquímicas y estabilidad del talúd en depósitos de relaves,

y monitoreo micro sísmico para conocer el estado en minería subterránea y de rajo abierto.

- **Uso de *cloud*.** Acceso de información de los datos captados de las operaciones, desde cualquier punto y dispositivo fijo o móvil.
- **Sistemas de gestión de variables críticas.** Aborda energía, agua y emisión, utilizando herramientas digitales de captura y análisis de información.
- **Plataforma abierta y pública de información.** Administra y comparte la información con captura y monitoreo de datos operacionales en tiempo real y tecnología de almacenamiento de datos (*cloud*).

### **Desafío 2.** Incluir eficiencia energética y de agua en los proyectos

Realizar estimación, simulación y proyección futura del consumo de agua y energía asociada a los proyectos mineros, lo que tiene importantes impactos en los costos y el medio ambiente y comunidad.

#### **Soluciones:**

- **Uso de Ciencia de Datos (*data science*).** Análisis avanzado de datos y simulación de escenarios con modelos como Gemelo Digital, *Building Information Modeling* (BIM) y Modelamiento Predictivo.
- **Disminución consumo de agua.** Profundiza la investigación en evaporación en piscinas de agua, relaves secos de bajo costo, conminución y separación seca de mineral, procesamiento no acuoso de mineral usando polímeros específicos para separar el mineral de la roca. Aquí se incluye el uso de tecnologías de monitoreo y control para optimizar el uso de agua en los procesos actuales de flotación, filtración y espesamiento.

### **Desafío 3.** Mejorar la trazabilidad en el consumo de energía a lo largo del proceso

Busca conocer y monitorear el flujo y consumo de energía desde su origen, en toda la cadena de suministro energética y mejorar su uso eficiente.

#### **Soluciones:**

- **Sensores de consumo energético en tiempo real.** Dispositivos para medir y comunicar el consumo, para apoyar la toma de decisiones en tiempo real, a fin de optimizar la disponibilidad y costos de la energía en el proceso.
- **Medición de huella de carbono.** Medición de la eficiencia energética y el impacto de fuentes de energías renovables. Las tecnologías aplicables

en este ámbito incluyen sensores, plataformas para identificar fuente/origen de la energía, y *blockchain* para un registro transparente.

#### Desafío 4. Eficiencia energética y de agua en la operación

##### Soluciones:

- Captura de datos con sensorización masiva y análisis de datos de consumo energético y de agua. Uso de *data science* para análisis avanzado de datos y simulación de escenarios con modelos matemáticos de recursos, para gestionar de manera eficiente el gasto energético y de agua.
- Interoperabilidad y coordinación de equipos móviles (aljibes autónomos, sensores *dispatch*) gestionados por sistemas en tiempo real asistidos por sensores y otros dispositivos que realizan el seguimiento del proceso.

---

### NÚCLEO TRACCIONANTE 3: MINERÍA SEGURA

Tecnologías 4.0, tales como la teleoperación, automatización y robótica, juegan un rol fundamental en la disminución de la exposición de las personas a los riesgos. Asimismo, estas tecnologías facilitan la detección en tiempo real de estos peligros.

#### Desafío 1. Comunicación efectiva de los riesgos en tiempo real

Implica la posibilidad de mejorar la medición y comunicación oportuna de los riesgos de exposición para las personas y equipos actuando en la operación minera.

##### Soluciones:

- Captura y transmisión en tiempo real de los parámetros de seguridad personales con sensores. Uso en elementos como ropa, equipo y otros accesorios que incorporan computadoras y equipos electrónicos avanzados para monitoreo de condiciones biométricas en los operadores o de las condiciones ambientales en el lugar de trabajo. Entre estos se cuentan sensores IoT, etiquetas RFID, dispositivos de realidad aumentada y realidad virtual para mostrar en las gafas datos esenciales de seguridad y mantenimiento (por ejemplo, datos de equipos, alertas, listas de verificación de procedimientos), sensores y detectores para rastrear métricas clave (por ejemplo, niveles de oxígeno, calor y gases peligrosos) y cámaras

de alta definición para registrar procedimientos y proporcionar instrucciones en tiempo real (por ejemplo, al realizar tareas de mantenimiento bajo tierra), dispositivos de monitoreo biométrico que contienen sensores usados por la fuerza laboral para capturar información sobre el estado de salud de los empleados (por ejemplo, frecuencia cardíaca, concentración y niveles de fatiga, movimientos biométricos repetitivos, pesos de carga), seguimiento de personal: Uso de sensores de proximidad (por ejemplo) para ubicar a los trabajadores de primera línea en la operación.

- **Implementación de IoT con estándares confiables y trazables.** Apunta a modelos de referencia y mejores prácticas que aseguren la calidad y seguridad de los datos.

### **Desafío 2.** Minimizar exposición al riesgo, manteniendo la productividad y costos

Implica las posibilidades de minimizar y hasta eliminar por completo los riesgos de accidentes en las personas a través del reemplazo de funciones operativas/manuales, mediante el uso de tecnologías.

#### **Soluciones:**

- **Elementos de protección personal (EPP) inteligentes.** Por ejemplo, cascos, pulseras y chalecos inteligentes que miden parámetros fisiológicos de la persona equipado con análisis de datos, sensores de geolocalización y medición de temperatura, presencia de gases, iluminación y ruido.
- **Big data para prevención.** Permite análisis predictivo de datos para identificar causas de accidentes e incidentes y construir modelos de predicción más efectivos, posibilitando un mejor control y eliminación de riesgos de accidentes y enfermedades profesionales.

Robotización, automatización, teleoperación y equipos autónomos disminuyen la exposición de las personas a las zonas y condiciones de riesgo de accidentes y de amenaza a la salud de los trabajadores. Se trata de la integración de varias tecnologías para realizar tareas a distancia, a través de imágenes de video e interfaces de software y hardware que replican los comandos y estados del proceso, tales como perforadoras, palas, camiones, cargadores, correas, chancadores, molinos, entre otros.

### **Desafío 3.** Simulación de riesgos en planes mineros

Implica la posibilidad de proyectar, generar escenarios alternativos y dimensionar los riesgos asociados a proyectos en forma más flexible y precisa, de manera de optimizar decisiones de diseño.

#### Soluciones:

- Interoperabilidad entre plataformas *machine learning* y el analítica de datos (*data analytics*). Permite cruzar y analizar datos con el fin de predecir posibles riesgos, reducirlos y/o eliminarlos.
- Representaciones digitales de sistemas físicos (*Digital Twin*) y realidad virtual. Permiten simular la eficiencia operativa de equipos bajo supuestos de entorno y condiciones de operación, así como entrenar operadores en gestión de riesgos y conducta segura.

#### Desafío 4. Integrar la gestión de seguridad a las plataformas 4.0

Implica la posibilidad de sistematizar e integrar la información histórica relacionada a la gestión de la seguridad y explotar los datos de manera de potenciar el conocimiento y rescatar los aprendizajes para reducir riesgos futuros.

#### Soluciones:

- Interoperabilidad y plataformas únicas para construir modelos predictivos. Integran las variables de seguridad a las variables operacionales y sus efectos interactivos.
- *Safety cloud* (incidentes - accidentes). Contiene la información respecto de seguridad de la empresa. Incidentes, accidentes, entrenamientos, auditorías, y certificaciones se concentran en una plataforma integrada en un solo sitio, *hub on-line*, que permite analizar y comparar los datos y predecir tendencias.

#### Desafío 5. Controlar fuentes de emisión que producen enfermedades profesionales actuales y futuras

Implica la posibilidad de identificar, medir y controlar las fuentes que inciden en la generación de enfermedades profesionales por exposición prolongada, para reducir riesgos y evitar generar la condición de enfermedad.

#### Soluciones:

- Monitoreo en línea, analítica avanzada, *big data* y sistema experto. Uso en determinación y medición de variables y condiciones que intervienen en la salud del trabajador; y en la creación de modelos predictivos para evitar o mitigar riesgos de afectación a la salud y enfermedades profesionales.

### NÚCLEO HABILITANTE 4

Cubre el aspecto más transversal de la generación y procesamiento de la información con sistemas digitales.

Comprende la infraestructura de Tecnologías de la Información (IT), Tecnologías Operacionales (OT), captura, gestión e integración de los datos provenientes de la operación minera y su entorno, permitiendo la gestión integral de la cadena de valor en todas sus dimensiones.

#### Soluciones:

- **Conocer el nivel de madurez de la digitalización en la minería chilena.** Definir la situación base, a partir de análisis del estado de la digitalización en otras industrias a nivel internacional y desde la cual proyectar su creciente adopción en los procesos productivos mineros.
- **Asegurar la captura confiable de los datos con precisión y oportunidad para alimentar el modelo de negocio.** Implementar buenas prácticas para la generación, procesamiento y utilización de datos para fortalecer el proceso productivo y comercial del negocio minero.
- **Gestión de datos para la incorporación de nuevas técnicas de analítica avanzada.** Trabajar sobre identificación de soluciones y captación de talento para generar e implementar soluciones de analítica avanzada.
- **Pasar de ecosistemas aislados a interoperables en la cadena de valor (mediano plazo).** La interoperabilidad es el intercambio y uso de información digital sin barreras entre las personas, softwares y máquinas en el proceso productivo y comercial, para producir sinergias en la integración de todos estos elementos. Las soluciones incluyen adopción de estándares, organización multinivel de la información a obtener y utilizar según los usuarios, arquitecturas para integración e impacto en los componentes de la cadena de valor del proceso minero.

## FUENTES DE TECNOLOGÍA Y DESARROLLO DE ECOSISTEMA

La fuente de las nuevas tecnologías en la minería de Chile se origina desde los proveedores, que representan muchas veces marcas internacionales, y que pueden dar cuenta de antecedentes para responder a la pregunta de “¿dónde se ha probado antes?”, que surge recurrentemente en la industria minera.

Sin embargo, el escenario de la minería en Chile presenta condiciones para explotar nuevas tecnologías con alto impacto en el ahorro de costos y disminución de externalidades negativas, debido a la importancia que tiene el sector a nivel mundial y las oportunidades de mejora existentes. En las últimas décadas, se ha podido percibir también que el esfuerzo que se realiza desde la academia y el emprendimiento han logrado algunos éxitos locales en el desarrollo de soluciones y su transferencia de tecnología para la minería.

Los ecosistemas de innovación en países desarrollados se nutren de la colaboración de distintos actores que incluyen empresas, universidades y sector público, manifestando en la práctica la teoría de Etzkowitz y su Triple Hélice de la innovación (Etzkowitz, 1995). Sin embargo, estas realidades muchas veces se hacen viables por un conjunto de necesidades restrictivas del entorno.

En el caso de Chile, la necesidad de la industria minera de elevar estándares de competitividad por medio de la transformación digital presenta una oportunidad para el fomento de la colaboración y el desarrollo de resultados de innovación local. En este sentido, las universidades en Chile cuentan con un alto estándar en su producción científica en diversas áreas de conocimiento relacionadas con la industria minera, pero enfrentan el desafío de llevar sus resultados de investigación al mercado por la vía de la transferencia de tecnología de forma efectiva.

En comparación con otros países desarrollados, como Australia y su consorcio METS, los esfuerzos en Chile son todavía incipientes, pero se están viendo cada vez más casos donde nuevas tecnologías disruptivas, con patentes de invención licenciadas desde la universidad, son llevadas al mercado por empresas existentes o nuevas en la forma de *spin-offs*, que diseñan sus equipos y venden los productos o servicios. Ejemplos de esto son las empresas Cettem Instruments y Kona-Tec, *spin-offs* de la Universidad de Concepción, las que a través de su actividad académica y

de investigación, afines a la actividad minera, generan un vínculo a través de la movilidad de recursos humanos que se traduce en un diálogo directo para la exposición de soluciones tecnológicas de alto nivel de sofisticación.

Es interesante hacer notar que una vez que las soluciones tecnológicas generadas en Chile para la industria local son aplicadas con éxito, se genera una carta de presentación muy atractiva para la exploración de la comercialización en el mercado internacional, partiendo por el mercado peruano, que junto a Chile es muy relevante en el concierto internacional de la producción minera, y posteriormente en otros mercados como México, Brasil y otros dentro de Latinoamérica, pudiendo alcanzar igualmente otros mercados más lejanos, eventualmente a través de representantes, como son los mercados de Norteamérica o África.

Sin embargo, el desarrollo de soluciones tecnológicas desde la academia difícilmente es aceptado por el mercado minero local. A medida que aumenta la complejidad y sofisticación de las soluciones basadas en tecnologías digitales, que incluyen acciones para operar o intervenir activos que pueden superar millones de dólares de inversión, existe una natural barrera de confianza de la empresa en entregar el control de sus procesos a sistemas que funcionan de forma autónoma. Contar con una validación adecuada a los estándares aplicables choca con la dicotomía de la cultura minera conservadora. Nadie quiere ser el primero ni el último en sumarse a la tendencia de adopción de soluciones innovadoras en la industria.

En este sentido, el cambio cultural debe ser transversal, desde etapas tempranas de la formación de capital humano y en los proyectos de investigación y desarrollo en las universidades. Se debe apuntar a las necesidades de mayor impacto en la industria y con un adecuado plan de implementación o avance en la conocida escala de madurez de la tecnología o TRL (*Technology Readiness Level*), que aborda desde las etapas de conceptualización de las nuevas teorías del conocimiento científico, avanzando hacia resultados de investigación aplicada, y posteriormente pasando por etapas de validación empírica en laboratorio, piloto y campo, hasta llegar a un producto, proceso o servicio comercializable.

El desarrollo sistemático e iterativo de las tecnologías en esta "ruta lógica", junto con la colaboración de otras empresas proveedoras de componentes desde otros ámbitos de la Industria 4.0 y otros actores del ecosistema como centros de pilotaje, para integración de soluciones finales, es la clave para crear un ambiente de confianza en la industria minera, para que pase de una

producción de minería de primer estándar a un ecosistema de innovación de clase mundial a la par de realidades de *benchmark* como METS en Australia.

---

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los desafíos que enfrenta la minería chilena en la actualidad son extraordinariamente importantes en comparación con los de décadas pasadas. Estos involucran la disminución de la ley de yacimientos, que obliga a aumentar los volúmenes de mineral tratados, los costos operacionales grabados por el cambio climático con la desertificación de las zonas mineras, escasez de agua y alto precio de la energía, que fuerza a realizar costosas inversiones, tales como ampliación de las plantas procesadoras, instalación de plantas desaladoras de agua de mar y energía renovable y la necesidad de proteger el medio ambiente para lograr una minería sustentable. Además, la industria enfrenta problemas de productividad que están asociados a problemas culturales que se reflejan en prácticas laborales que se arrastran del pasado y la resistencia al cambio para la incorporación de nuevas tecnologías.

La respuesta a estos problemas está en parte en la Industria 4.0, con la incorporación de soluciones tecnológicas para elevar la productividad y disminuir los impactos de las externalidades negativas de la actividad minera. Estas soluciones son la integración de tecnologías transversales existentes en el mercado o son ad-hoc a la actividad minera avaladas por la procedencia desde empresas de clase mundial y centros de desarrollo tecnológico minero, como el sector METS en Australia.

Sin embargo, la penetración de estas tecnologías todavía es baja en Chile, lo que se manifiesta por el aspecto cultural propio del sector minero y la decisión a nivel estratégico, pues incorporar transformaciones digitales conlleva inversiones y riesgos en la implementación y la operación de las soluciones tecnológicas.

La presión de los estándares de la propia industria llevará a las empresas en la dirección de optimizar los indicadores de desempeño clave con la ayuda tecnológica, puesto que los resultados tienen los niveles de validación suficientes, demostrados en otras realidades de países más industrializados. La pregunta que subyace es si la respuesta ante esta

presión será proactiva o reactiva en Chile. La acción proactiva tiene la ventaja que permite gestionar mejor la temporalidad y los montos de inversión, sacando provecho de períodos de bonanza en el mercado. La respuesta reactiva implica un riesgo de costo de oportunidad de no explotar todo el potencial disponible, dado por la demanda del mercado y perder competitividad con respecto a otros países productores, y la pérdida de oportunidad de crear fortalezas como polo mundial de I+D+i en tecnología minera, dado que el escenario local es de referencia global y las capacidades existentes en la academia y la voluntad y recursos del sector público para apostar por la colaboración.

Es recomendable que se visualicen los casos de éxito en el impacto de la aplicación de las tecnologías en la minería, ya sean importadas o generadas en el país, para crear conciencia de las ventajas de una visión estratégica en la incorporación de la Industria 4.0. Igualmente, es de esperar que la colaboración entre la empresa, la universidad y el sector público se fortalezca, pues los beneficios de esto no solo impactan en la industria minera, sino en otras industrias, como las usuarias de tecnologías de la Industria 4.0 de forma transversal, y en ámbitos centrales como el ambiental y social.

## REFERENCIAS

- Bascur, O., O'Rourke, J. 2021. Digital transformation for the process industry: A Roadmap. CCR Press.
- Cesco. 2020. Hacia una minería 4.0 Recomendaciones para impulsar una industria nacional inteligente. Disponible en: <https://www.cesco.cl/wp-content/uploads/2020/06/Hacia-una-miner%C3%ADa-4.0.-Recomendaciones-para-impulsar-una-industria-nacional-inteligente-1-2.pdf>
- COCHILCO. 2019. Encuesta de innovación en empresas proveedoras de la gran minería. Santiago, Chile.
- Consejo de Competencias Mineras. 2018. Impacto de las nuevas tecnologías en las competencias requeridas por la industria minera. Santiago, Chile. Disponible en: <https://www.ccm.cl/wp-content/uploads/2018/04/impacto-de-las-nuevas-tecnologias.pdf>
- Etzkowitz, H. 2008. The Triple Helix University-Industry-Government Relations: A Laboratory for Knowledge Based Economic Development, 1995.
- Fundación Chile, Consejo Minero y Alta Ley. 2020. RoadMap: Digitalización para una Minería 4.0. Disponible en: <https://fch.cl/wp-content/uploads/2020/08/roadmap-digitalizacion.pdf>
- Lara, E. 2021. Sector minero australiano pone presión sobre Gobierno respaldando objetivo de cero emisiones a 2050. Biobío Chile, 1 octubre 2021. Disponible en: <https://www.biobiochile.cl/especial/aqui-tierra/noticias/2021/10/01/sector-minero-australiano-pone-presion-sobre-gobierno-respaldando-objetivo-de-cero-emisiones-a-2050.shtml>
- Meller, P. Salinas, B. 2019. Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano. Una mirada desde la minería. Síntesis – INTERMIN, Beauchef Minería.
- NASA, Technology Readiness Level (TRL). Disponible en: [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level/](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level/)
- Moore, G.A. 2015. Cruzando el abismo. Ediciones Gestión 2000.

- Oracle. ¿Qué es la inteligencia artificial-IA? Disponible en: <https://www.oracle.com/mx/artificial-intelligence/what-is-ai/>
- Quezada, G.R., Rozas, R.E., Toledo, P.G. 2021. Polyacrylamide adsorption on (101) quartz surfaces in saltwater for a range of pH values by molecular dynamics simulations. *Minerals Engineering*, 162, 106741.
- Quezada, G.R., Toledo, P.G. 2021. Complexation of alkali and alkaline-earth metal cations at spodumene-saltwater interfaces by molecular simulation: Impact on oleate adsorption. *Minerals*, 11 (1), 12.
- Quezada, G.R., Toledo, P.G. 2020. Structure of the interface between lithium-rich spodumene and saltwater by density functional theory calculations and molecular dynamics simulations. *Journal of Physical Chemistry C*, 124, 1446–1457.
- Quezada, G.R., Rozas, R.E., Toledo, P.G. 2019. Ab initio calculations of partial charges at kaolinite edge sites and molecular dynamics simulations of cation adsorption in saline solutions at and above the pH of zero charge. *Journal of Physical Chemistry C*, 123(37) 22971–22980.
- Sánchez, F., Hartlieb, P. 2020. Innovation in the mining industry: Technological trends and a case study of the challenges of disruptive innovation.
- Schwab, K. 2017. La Cuarta Revolución Industrial. Editorial Debate.
- Sganzerla, C., Seixas, C., Conti, A. 2016. Disruptive innovation in digital mining. *Procedia Engineering* 138, 64–71
- Solar, C. 2021. Determinación de tiempos de coalescencia de burbujas en un sistema dinámico de burbujeo mediante técnicas computacionales de procesamiento de imágenes y visión artificial. Tesis en curso (Guiada por J.H. Saavedra y P.G. Toledo). Ingeniería Química, Universidad del Bío Bío.
- World Economic Forum, In collaboration with Accenture. 2017. Digital Transformation Initiative: Mining and Metals Industry. Disponible en: <http://reports.weforum.org/digital-transformation/wp-content/blogs.dir/94/mp/files/pages/files/wef-dti-mining-and-metals-white-paper.pdf>



Universidad de Concepción

# MINERIA 4.0

Fernando Concha / Marcelo Vergara / Pedro G. Toledo

Serie Comunicacional CRHIAM

