



Fundación Tecnológica
SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA



TRANSFORMACIÓN DIGITAL EN LA MEDIANA Y PEQUEÑA MINERÍA CHILENA

“Caracterización de la mediana y pequeña minería, nivel de conocimiento en transformación digital y propuesta de matriz de madurez tecnológica”

Octubre, 2021

CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	3
INTRODUCCIÓN	5
PARTE 1: CARACTERIZACIÓN DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA MINERÍA	8
I. Definiciones de mediana y pequeña minería	9
II. Principales características de la mediana minería.....	10
II.1. Producción de cobre en la mediana minería	11
II.2. Producción de otros minerales en la mediana minería	13
III. Principales características de la pequeña minería	18
III.1. Producción de cobre en la pequeña minería.....	20
III.2. Producción otros minerales en la pequeña minería	23
IV. Fuerza laboral y participación en el empleo en mediana y pequeña minería..	26
V. Inversión minera y cartera de proyectos en mediana minería	29
PARTE 2: ANÁLISIS DE RESULTADOS SOBRE TRANSFORMACIÓN DIGITAL	31
VI. Producción mineral	32
VII. Faenas	33
VIII. Conocimiento en transformación digital	35
IX. Infraestructura de red de datos y conectividad	41
X. Aproximaciones preliminares de los resultados.....	46
PARTE 3: MATRIZ DE MADUREZ TECNOLÓGICA Y ACCIONES DE MEJORA	48
XI. Elaboración de la matriz genérica	49
XII. Matrices cuantitativas por proceso de la cadena de valor	53
XIII. Propuestas de mejora tecnológica	59
CONCLUSIONES	76
Equipo de Trabajo	79
ANEXOS.....	80
A.1. Información de las empresas mineras encuestadas	80
A.2. Estructura del cuestionario	81
REFERENCIAS	85

RESUMEN EJECUTIVO

El estudio **“Transformación digital en la mediana y pequeña minería chilena”**, desarrollado por el Advanced Mining Technology Center (AMTC), tiene como propósito identificar oportunidades de mejora en los procesos productivos de estos segmentos de la industria, mediante la incorporación de tecnologías o soluciones digitales.

Este proyecto forma parte de las acciones propuestas en el marco de un acuerdo de colaboración suscrito por la Fundación Tecnológica de la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI) y el Centro de Tecnología Avanzada de CISCO Systems Chile. El trabajo fue apoyado y desarrollado por el AMTC, perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

La primera parte del estudio se focaliza en un análisis de caracterización del sector, basado en antecedentes bibliográficos para conocer de manera general el estado actual de las medianas y pequeñas mineras en términos de un conjunto de indicadores relacionados con producción mineral, fuerza laboral, inversión minera y cartera de proyectos en los últimos años. La información fue obtenida principalmente a través de reportes previos elaborados por SERNAGEOMIN, COCHILCO y otras entidades vinculadas a la minería.

La segunda parte del trabajo, corresponde al análisis de los resultados obtenidos por medio de la aplicación de una encuesta a una muestra de 11 empresas de mediana minería acerca de su conocimiento en temas de transformación digital (TD). Respecto a su representatividad, en términos de producción de concentrados y cátodos de cobre, la muestra corresponde al 61,5% y 42,9% del sector, respectivamente (con un universo analizado de 42 compañías), dando cuenta de lo significativo de la información. Uno de los principales hallazgos del estudio se relaciona con el bajo conocimiento de las empresas sobre procesos de transformación digital. En efecto, cerca del 70% de las empresas que respondieron el cuestionario señalan poseer un nivel bajo de implementación de tecnologías digitales en sus organizaciones y/o no desarrollan proyectos en la materia. En cuanto a la recolección y/o manejo de datos y posterior tratamiento, la información es diversa, encontrándose desde empresas que no realizan ningún procedimiento, hasta compañías que ya han implementado *softwares* de gestión que permiten integrar áreas internas y externas para que el flujo de información sea más ágil.

La tercera parte de este estudio consiste en la generación de una propuesta de desarrollo de transformación digital por medio de etapas, acompañadas de propuestas ordenadas por nivel de avance.

Esta propuesta le permitirá a cada empresa evidenciar su actual estado de madurez respecto de la transformación digital a lo largo de la cadena productiva de la mediana y pequeña minería, mediante la elaboración de matrices que van desde la exploración minera hasta los relaves, incluyendo caracterización mineral, diseño y planificación, operaciones y planta de tratamiento. Cada una de estas matrices está compuesta por cuatro etapas que clasifican, de forma creciente, el nivel de madurez en transformación digital de cada empresa (preparación, adopción, implementación y mejora continua) evaluadas en tres dimensiones (humana, procesos, tecnología), que se elaboraron en base a objetivos estratégicos en el negocio minero. Las etapas fueron definidas desde un bajo o nulo conocimiento en materia de TD hasta procedimientos avanzados de mejora continua, a su vez que las dimensiones se plantearon como espacios transversales del negocio en donde las empresas puedan autoevaluarse y localizarse en un cuadrante y con ello diseñar un plan de transformación digital que les permita ir avanzando de etapa, en virtud de ciertas acciones y/o protocolos. De esta forma, la "matriz genérica" es la que establece los criterios para pertenecer a cada cuadrante, mientras que las "matrices cuantitativas" establecen y/o recomiendan acciones concretas para ir subiendo de etapa en cada dimensión.

A partir del estudio, es posible posicionar a la mediana y pequeña minería como actores importantes de la economía nacional, principalmente en las regiones I, II, III, IV y V. La participación relativa de estos sectores en términos productivos ha venido disminuyendo los últimos años, por lo cual la transformación digital puede contribuir a mejorar sus procesos mineros y con ello su competitividad.

El sector posee una alta heterogeneidad respecto al conocimiento, capacidades y grado de adopción de herramientas y tecnologías de transformación digital. Los resultados analizados permitieron generar una primera aproximación respecto al conocimiento y desempeño sobre transformación digital en el sector, información que sirvió de base para elaborar propuestas más concretas que permitan integrar las áreas internas y externas de las compañías

La matriz de madurez tecnológica propuesta en el estudio permite a cada empresa poder autoevaluarse respecto de la etapa de madurez de TD en que se encuentra y generar una estrategia de mejora, conociendo cuales son los recursos que debe disponer. La ejecución de estas propuestas en una o varias áreas de la cadena de valor minero dependerá del interés de cada empresa en la implementación de la TD, permitiendo generar proyectos y/o iniciativas colaborativas de mejora en el corto, mediano y largo plazo. Tras la elaboración de esta metodología, se espera mejorar el desempeño y/o rentabilidad de las empresas del pequeño y mediano sector, optimizar sus procesos, incentivar la creación de nuevos productos o servicios, fortalecer la toma de decisiones utilizando la información disponible, y lograr ser ágil para adaptarse a los cambios.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio denominado “**Transformación digital en la mediana y pequeña minería chilena**” tiene por objetivo identificar las brechas y oportunidades que surgen a partir de la incorporación de tecnologías digitales a los procesos productivos de la industria minera, especialmente en la mediana y pequeña minería, con el propósito de orientar los esfuerzos de transferencia tecnológica, implementación de soluciones y desarrollo de competencias.

Este proyecto forma parte de las acciones propuestas en el marco de un acuerdo de colaboración suscrito por la Fundación Tecnológica de la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI) y el Centro de Tecnología Avanzada de CISCO Systems Chile. En esta oportunidad, el trabajo fue apoyado y desarrollado por el Advanced Mining Technology Center (AMTC), perteneciente a la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile.

Dentro de los objetivos específicos de este estudio, están el comprender y caracterizar los problemas y desafíos, actuales y futuros, que enfrentan la mediana y pequeña minería chilena en el ámbito de la transformación digital; identificar adecuadamente las capacidades y soluciones digitales disponibles y con potencial de ser implementadas en la industria minera; identificar los requerimientos y riesgos asociados al proceso de inserción de soluciones; y, proponer líneas de trabajo y proyectos con factibilidad de ser desarrollados a partir de pruebas de concepto o pilotos con potencial de ser llevados a escala industrial.

En el mes de octubre de 2020, se elaboró un cuestionario (ver Anexos) que fue revisado tanto por el grupo de investigadores del AMTC que participaron en el estudio, como también por el mandante y la contraparte técnica de la empresa Cisco. Una vez definida y validada la herramienta de levantamiento de información, se envió vía correo electrónico una invitación a las 42 operaciones vinculadas a las empresas que componen el Comité de Mediana Minería de la SONAMI. Este llamado fue dirigido al o la representante de cada empresa en el Comité, quien usualmente es el gerente/a general. Luego del primer envío del cuestionario, sólo se obtuvieron tres respuestas; dado el bajo número se acordaron una serie de acciones para aumentar el porcentaje de respuesta por parte de las empresas: i) se realizaron llamadas telefónicas y reenvíos de invitación, ii) se extendió el plazo para que las entidades contestaran las encuestas y, iii) se redireccionaron las invitaciones a los encargados de la unidad de producción y tecnologías de la información de cada compañía. Estas acciones permitieron que al mes de abril de 2021 un total de 11 empresas completaran el cuestionario.

El total de la muestra de empresas de la mediana minería representa el 61,2% del total de producción de concentrados de cobre y el 42,9% de producción de cátodos de cobre de la mediana minería nacional. Las 11 empresas que han brindado su apoyo al estudio señalándonos el estado actual en que se encuentran en esta temática, y cuáles son los principales desafíos a abordar en proyectos de transformación digital, son las siguientes:

- i) Inversiones Alxar S.A.
- ii) Sociedad Contractual Minera Atacama Kozan
- iii) Compañía Minera Carmen Bajo Ltda.
- iv) Sociedad Contractual Minera Carola
- v) CEMIN Holding Minero
- vi) Compañía Minera Cerro Negro S.A.
- vii) Minera Cruz Ltda.
- viii) Haldeman Mining Company S.A.
- ix) Minera Valle Central S.A.
- x) Sociedad Punta del Cobre S.A.
- xi) Compañía Explotadora Minera San Andrés Ltda.

Adicionalmente, una vez contestada la encuesta se invitaron a los representantes de las empresas a sostener una entrevista por videoconferencia con el equipo AMTC. Lo anterior, con el objetivo de indagar con más detalle la situación que enfrentan respecto de la transformación digital. De ello, se sostuvieron tres entrevistas que también fueron utilizadas como parte del diagnóstico que se presenta a continuación. De este modo, los resultados preliminares corresponden a las respuestas enviadas vía cuestionario a empresas de la mediana minería. Cabe destacar que la encuesta se agrupó en cinco categorías: información de las empresas mineras encuestadas; producción de cobre, plata, hierro y oro; faenas; transformación digital; e, infraestructura de redes de datos y conectividad.

Uno de los hallazgos más relevantes del estudio se refiere al bajo conocimiento de la temática de transformación digital que evidenciaron los representantes de las empresas que contestaron el cuestionario, de los cuales un 73% reconoce un bajo nivel de conocimiento en el tema. Este resultado podría tener relación con el porcentaje de empresas que aceptaron participar de este estudio (26% del total de empresas de mediana minería) y coincidente con otros estudios que señalan el bajo nivel de transformación digital en la industria minera respecto de otros sectores industriales, tales como: área financiera y seguros, comercio, entre otras.

Si bien hay un conocimiento bajo en materias de transformación digital y digitalización, algunas empresas de mediana escala ya han comenzado a implementar medidas al respecto, partiendo por áreas de gestión (SAP Business One), mina/planta, y algunas desarrollando procesos de automatización en

perforación. En su mayoría concuerdan que el no desarrollo de este tipo de proyectos se debe a razones de presupuesto y a la falta de personal calificado, pero tienen identificadas las áreas críticas de mina, planta y servicios de apoyo para su implementación. Así quedó de manifiesto por uno de los entrevistados, quien señaló que veía la transformación digital como un factor clave en la mediana minería, especialmente en término de manejo de datos, pero que aún existían falencias y deficiencias en la arquitectura y tecnología utilizada en áreas de procesamiento. En relación a la red de datos, la mayoría emplea fibra óptica y red inalámbrica, aunque otras aún ocupan cable coaxial como sistema de conexión. Asimismo, un porcentaje importante todavía realiza la captura de datos por medio de bitácoras escritas, y no procesa los datos luego de capturados.

La pandemia ha significado un desafío mayor para la mediana minería, que ha tenido que adaptar sus procesos de gestión y administrativos para asegurar una continuidad operacional, mediante la utilización de sistemas de comunicación remotos como VPN y gestión de soporte técnico, los que han permitido optimizar los recursos que están disponibles en transformación digital; sin embargo, aún persisten brechas tecnológicas en infraestructura de comunicaciones que impiden acelerar los procesos de transformación digital en este sector. Entre las impresiones detectadas en las entrevistas que realizó el equipo del AMTC podemos identificar aspectos claves en temas de infraestructura, tales como 5G, interior mina, fibra para poder tomar o realizar gestiones de forma más automatizada respecto a las rutas de extracción o maquinaria de perforación, estado de salud de los equipos, etc. A pesar de tener identificados estos problemas, se requiere de altos costos asociados para su ejecución.

A partir de las respuestas a las preguntas del cuestionario, fue posible elaborar matrices de madurez en torno a cuatro etapas (preparación – adopción – implementación – mejora continua) en tres dimensiones transversales (humana – procesos – tecnología), proponiendo mejoras en seis áreas de la cadena de valor (exploración – caracterización – planificación – operaciones - planta – relaves). Adicionalmente para cada una de estas etapas en las cuales se puede situar una empresa de la mediana y pequeña minería, se desarrollaron propuestas en las tres dimensiones transversales, proponiendo mejoras tanto en mina como en planta. Cada matriz corresponde a un punto inicial donde las empresas pueden auto-diagnosticarse y realizar procesos de mejora en transformación digital que pueden significar optimización tanto en sus áreas productivas como procesos internos.

Esperamos que los resultados que arroja este estudio no solo aporten una mirada objetiva y orientaciones claras en este ámbito, sino también puedan contribuir a estimular el desarrollo de iniciativas vinculadas a facilitar los procesos de incorporación de tecnologías digitales a los procesos productivos de la mediana y pequeña minería.

PARTE 1: CARACTERIZACIÓN DE LA PEQUEÑA Y MEDIANA MINERÍA

La primera sección del estudio corresponde a una revisión bibliográfica sobre producción mineral, fuerza laboral, participación en el mercado e inversión minera desarrollada por empresas de pequeña y mediana escala en los últimos 10 años. La fuente de información principal fue el anuario histórico de SERNAGEOMIN, complementado con informes de COCHILCO y el Ministerio de Minería.

En términos de producción, el enfoque se realizó en minerales de cobre, oro, plata, hierro, plomo y zinc, tanto para el mediano como pequeño sector. En relación a la fuerza laboral del sector, se dio hincapié en la dotación de personal y su proyección para la próxima década en función de procesos tales como perforación, tronadura, carguío, transporte, ventilación, concentrado y lixiviación. Para el caso de la inversión y cartera de proyectos en el sector minero, se indica que, de un total de 35 iniciativas futuras, tan solo 5 corresponden a mediana minería, abordando cada una de ellas.

La información proporcionada a partir de esta revisión da una idea general acerca del impacto de la mediana y pequeña minería en la economía nacional, junto con tener un precedente en términos presupuestarios y productivos para la incorporación de procesos de transformación digital como rol clave.

I. Definiciones de mediana y pequeña minería

Las definiciones tanto de mediana minería como de pequeña minería no se encuentran normadas de forma clara en Chile, existiendo diferentes criterios provenientes de entidades públicas y privadas, como lo son el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), el Instituto de Ingenieros de Minas de Chile (IIMCh) o las definiciones contenidas en el Código de Minería. Todas estas acepciones se basan en aspectos como el número de trabajadores o la producción anual.

En las tablas 1 y 2 se pueden identificar las distintas definiciones según sea el caso.

Tabla 1. Definiciones de mediana minería

SERNAGEOMIN	Instituto Ingenieros de Minas de Chile	ENAMI
Definición en base a trabajadores y horas trabajadas	Definición en base a producción	Definición en base a producción
Entre 80 y 400 trabajadores.	Explotación entre 300 y 8.000 toneladas de mineral al día (menos de 50.000 toneladas de cobre fino por año aproximadamente).	Aquel sector de productores, actuales o potenciales, que en forma individual venden o benefician mensualmente más de 10.000 toneladas de minerales o su equivalente en productos mineros.
Entre 200.000 horas y 1.000.000 de horas trabajadas.		

(Fuente: elaboración propia)

Tabla 2. Definiciones de pequeña minería

SERNAGEOMIN	Código de Minería	Ley de Impuesto a la Renta	ENAMI
Definición en base a trabajadores y horas trabajadas	Definición en base a trabajadores	(Minería artesanal) Definición en base a trabajadores	Definición en base a producción
Menor a 80 trabajadores.	Menor a 12 trabajadores.	Menor a 5 trabajadores.	Son los productores que en forma individual venden o benefician mensualmente hasta 10.000 toneladas de minerales o su equivalente en productos mineros.
Menor a 200.000 horas trabajadas.			

(Fuente: elaboración propia)

II. Principales características de la mediana minería

La mediana minería de Chile ha dado muestras de ser un sector importante de la industria y también dentro de la economía nacional, aportando a la producción de concentrados y cátodos de cobre y generando una gran cantidad de empleos directos e indirectos. En la actualidad, este sector está compuesto por más de 30 compañías, principalmente con operaciones en la zona centro-norte del país, y presenta un alto potencial de desarrollo y crecimiento.

Según la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO), durante el año 2020 las medianas empresas mineras produjeron 142,8 mil toneladas de cobre fino, lo que representó el 2,5% de la producción nacional total de cobre entregado en dicho año. La participación en la producción de cobre de este sector ha ido disminuyendo en los últimos años. A modo de ejemplo, en 2013 representaba un 6% del total con 306,5 mil toneladas de cobre fino (más del doble de la producción actual de este sector). En tanto, en la minería del oro aportaron una producción de 4.042 kilogramos en el mismo año, alcanzando una contribución del 11,9% del total nacional. Asimismo, produjeron 3,78 millones de toneladas de hierro, alcanzando una participación del 28,8% a nivel nacional.

En cuanto a la cartera de iniciativas mineras, proyectada por COCHILCO, del total de proyectos para el periodo 2020-2029, y que alcanza a US\$74.047 millones, la mediana minería participa con US\$2.241 millones en inversiones, representando el 3% del total de la cartera.

Dentro de los principales proyectos de este sector se puede mencionar a: Diego de Almagro (Compañía Minera Sierra Norte S.A.), Productora (Sociedad Minera El Águila Ltda.), El Espino (Sociedad Punta del Cobre S.A.), Arqueros Cobre (Compañía Minera Arqueros S.A.) y Playa Verde (Copper Bay Chile Limitada).

Entre algunas de las dificultades a las que se ha visto enfrentado este segmento de la industria minera, donde la propiedad de las empresas pertenece principalmente a capitales nacionales, podemos mencionar una serie de restricciones para acceder a financiamiento de la banca. Asimismo, los ciclos de precios bajos de los minerales, sin duda, afectan significativamente más a este sector que a la gran minería debido a su estructura de costos. Otro aspecto complejo que enfrenta es la disponibilidad de mano de obra calificada, la cual es atraída por las mejores oportunidades laborales que presenta la gran minería, principalmente en materia laboral. Las mayores exigencias medioambientales también han sido un aspecto relevante, las cuales conllevan muchas veces a importantes volúmenes de inversión, y el acceso de nuevas tecnologías.

II.1. Producción de cobre en la mediana minería

En la actualidad la mediana minería se encuentra compuesta por un total de 42 operaciones activas, las cuales producen principalmente cobre, oro y hierro.

La producción de la mediana minería alcanzó un total de 142.768 toneladas métricas de cobre fino en 2020 (56.222 tmf de cátodos, 84.482 tmf de concentrados y 2.064 tmf de minerales de concentración), lo que representa una caída del 2% respecto del año anterior y de un 53% respecto de 2013, periodo de precios altos en el valor del cobre a nivel internacional, según se observa en las Figuras 1 y 2.

Figura 1. Producción de Cu total (tmf) en la mediana minería



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

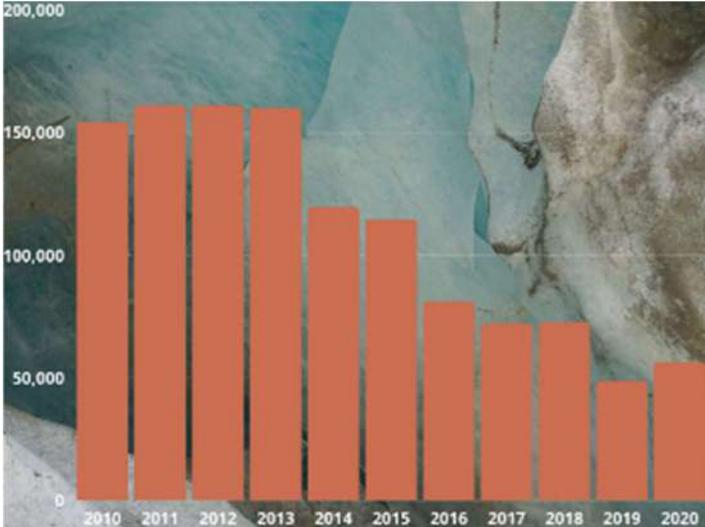
Figura 2. Producción de Cu en la mediana minería por producto



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

En cuanto a la producción anual de cátodos de cobre en la mediana minería, se observa una caída sostenida a partir del año 2014, pero con leve aumento en el 2020; sin embargo, existe una reducción de cerca del 70% en el último año respecto de 2013. Esta baja podría explicarse por la caída en los precios de cobre y la reducción progresiva de las leyes y el agotamiento de los minerales de óxido de cobre, según se puede ver en la Figura 3.

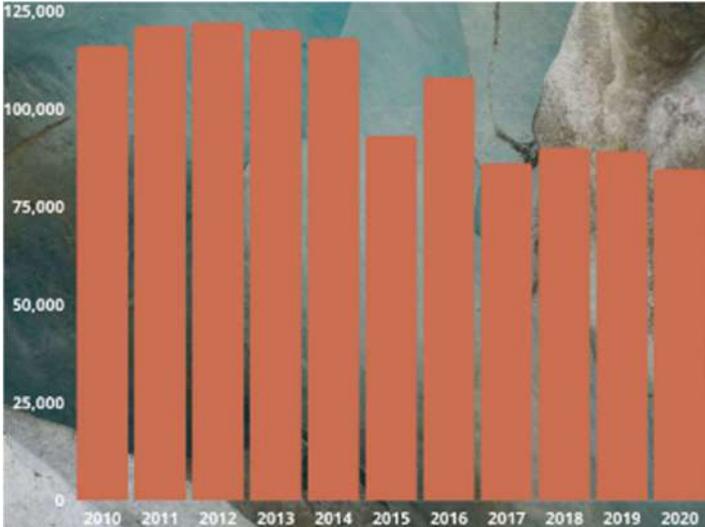
Figura 3. Producción de cátodos de Cu (tmf) en mediana minería



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

Si se analiza la producción de concentrados de cobre en este sector, la caída en comparación a los índices de cátodos es mucho menor, siendo la mayor baja la observada en 2015, de un 18% respecto al año anterior. Posterior a ello, los valores han sido oscilantes, presentando una mayor caída en 2019 (ver Figura 4).

Figura 4. Producción de concentrados de Cu (tmf) en mediana minería

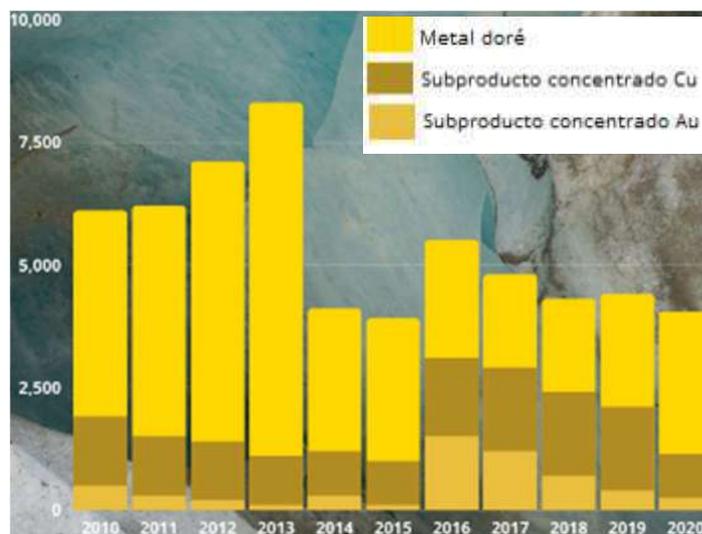


(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

II.2. Producción de otros minerales en la mediana minería

Sin duda que la mediana minería no solo es un sector relevante a la hora de referirse a la producción de cobre, ya que también lo es en la producción de oro. Este sector produjo un total de 4.042 kg de oro en el año 2020, en donde las empresas mineras de oro aportaron un 63,4% de la producción (2.889 kg de metal doré y 1.153 kg de concentrados), mientras que las empresas polimetálicas produjeron 9.587 kg del mineral (ver Figura 5).

Figura 5. Producción de Au (kg) en la mediana minería



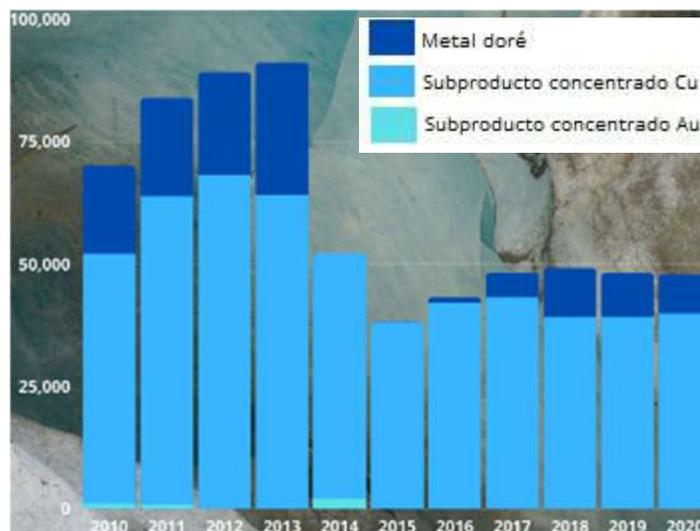
(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

A partir del año 2014 se observa una importante caída en la producción de oro metal doré. Una de las razones que la explica es el cierre de las operaciones de la mina de oro La Coipa, operada por la Minera Mantos de Oro en la Región de Atacama. Esta mina, que entró en operaciones a fines de la década de los 80 y que originalmente tenía una vida útil contemplada hasta el año 2004, se logró sostener hasta 2013.

Asimismo, este sector produjo 7.872 kg de metal doré de plata en el año 2020 (lo que representa un 4,6% de la producción nacional) y 91 kg de concentrado de plata (lo que representa un 7,5% del total nacional), ambos provenientes de la minería del oro. Adicionalmente, se produjeron 1.624 kg en concentrados provenientes de la minería del cobre.

Dado que la plata se obtiene como subproducto tanto de la minería del cobre como la del oro, sus niveles de producción están directamente relacionados. En la Figura 6 se observa una disminución similar en la producción de plata, en sintonía con las caídas de producción de cobre y oro del sector.

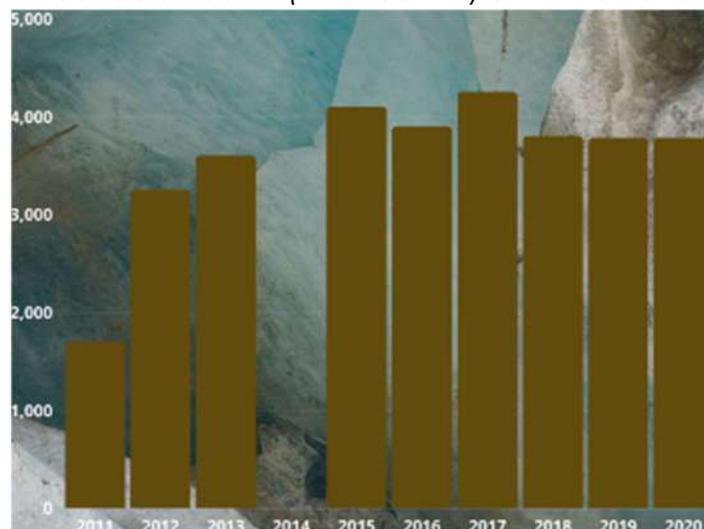
Figura 6. Producción de Ag (kg) en la mediana minería



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

La mediana minería también es un importante productor de hierro con un total de 3,78 millones de toneladas en 2020, lo que equivale al 28,8% del total nacional, concentrando su producción en la Cordillera de la Costa de las regiones de Atacama y Coquimbo. También se produce en las regiones de Valparaíso y O'Higgins. El resumen se observa en la Figura 7.

Figura 7. Producción de Fe (miles de tmf) en la mediana minería*



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuarios del 2010 al 2020)

* No se cuenta con información para el año 2014

Tanto en Chile como a nivel mundial, la producción de plomo ha sido extremadamente variable en el periodo comprendido entre 2010 y 2020. Si bien su

producción a nivel nacional ha provenido históricamente de la mediana minería de la Región de Aysén, en 2017 se incorporó la Región de Coquimbo, que fue la única que produjo plomo el año 2019, correspondiendo a finos contenidos en concentrados de zinc, oro y plomo. Para 2020, la producción se efectuó exclusivamente en la Región de Aysén, alcanzando una producción de 1.386 tmf (ver Figura 8).

Figura 8. Producción de Pb (tmf) en la mediana minería*



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

* No se cuenta con información para el año 2014

Al igual que el plomo, la producción de zinc ha sido variable en el tiempo, concentrándose mayoritariamente en la Región de Aysén durante el quinquenio 2011-2015. En 2016, Minera El Toqui, ubicada en dicha localidad, pasó a ser parte de la compañía australiana Laguna Gold, por lo que no se registra producción de zinc en la mediana minería ese año. En 2017, se incorpora en la producción la Región de Coquimbo, siendo desde ese año la única región que produce zinc a nivel nacional en el sector. Sin embargo, en 2020 se alcanzó una producción de 22.600 tmf de producción del mineral, representando un 78,9% a nivel nacional, siendo en su totalidad correspondiente a la Región de Aysén (ver Figura 9).

Figura 9. Producción de Zn (tmf) en la mediana minería*

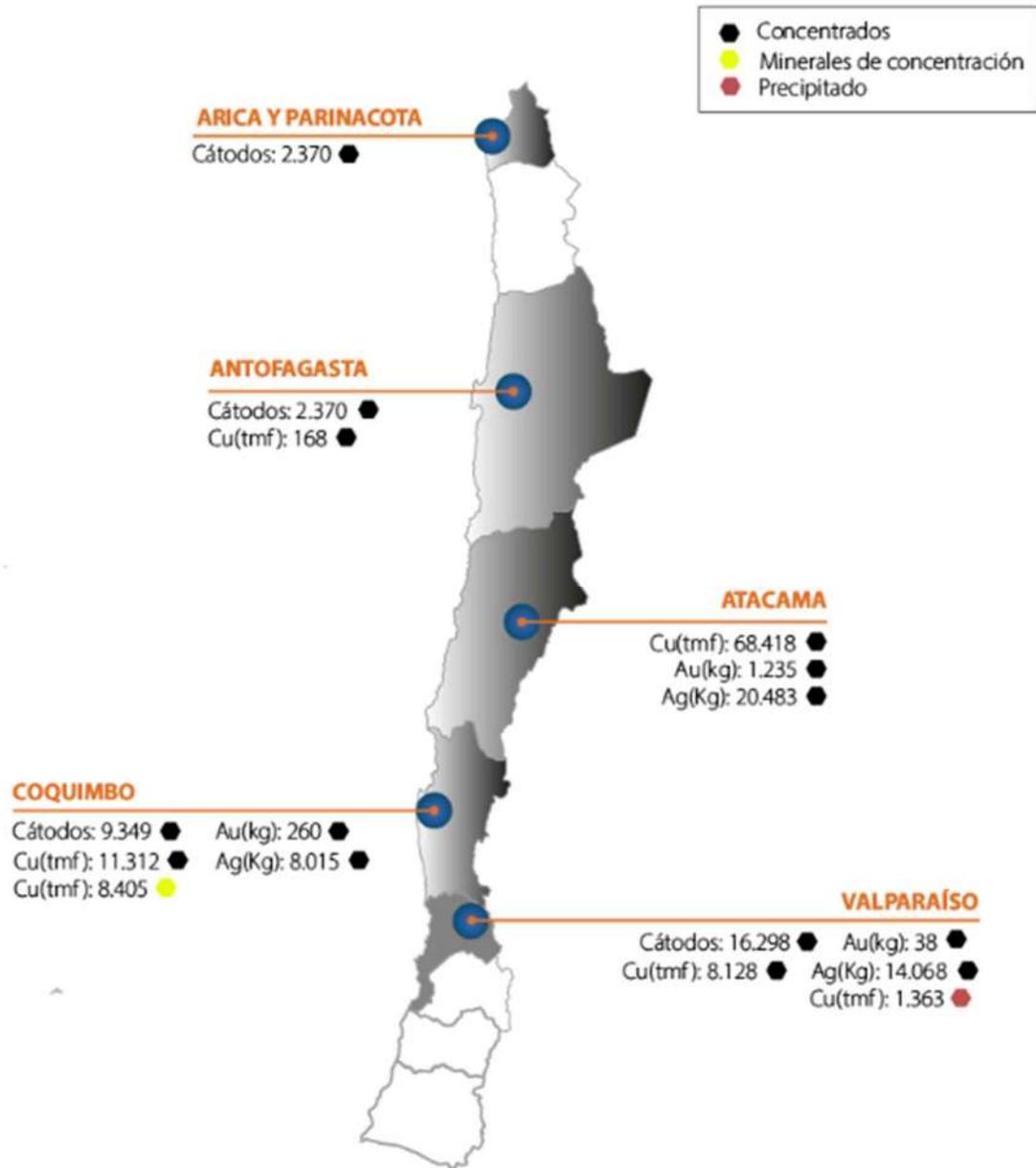


(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

* No se cuenta con información para el año 2014

El principal distrito minero de la mediana minería se ubica entre las regiones de Atacama y Coquimbo, en el sector occidental de la Cordillera de los Andes, donde se produce cobre y también se obtienen oro y plata. La Región de Valparaíso también ocupa un lugar destacado en la producción mineral de la mediana minería, los que están contenidos en secuencias estratificadas volcánicas y sedimentarias. Más al norte se encuentra presencia de la mediana minería en las regiones de Antofagasta, y Arica y Parinacota, pero con mejor participación en la producción total de la mediana minería y en este caso su producción es exclusiva de cobre, según se presenta en la Figura 10.

Figura 10: Producción de cobre, oro y plata en mediana minería por región



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

III. Principales características de la pequeña minería

La pequeña minería nacional es un sector productivo con tradición en la historia cultural y económica del país, cuya producción ha sido variable en el tiempo, debido principalmente a su alta sensibilidad al precio de los metales que producen. El estudio encargado por el Ministerio de Minería (2017) realizó una caracterización de este sector, el que determinó que el 82% de quienes explotan las faenas son personas naturales y sólo el 13,8% son empresas constituidas (el otro 4,2% son asociaciones de hecho o informales). Asimismo, el estudio arrojó que el 51% de las faenas en este segmento son explotadas por sus propios dueños y un 42% son arrendadas por personas o empresas para extraer el mineral.

El Ministerio de Minería ha definido a este sector como el de una operación pequeña de faena minera, que en promedio utiliza tres trabajadores, quienes operan con una gestión técnica y administrativa limitada, que dificulta el aprovechamiento de economías de escala. Este sector se caracteriza por manejar baja información de campañas de sondaje que les permitan obtener datos fidedignos de los recursos mineros con que se cuenta, lo que limita una planificación de mediano y largo plazo. Adicionalmente limita los planes de inversión para operación con proyección a mayor plazo y reduce la disponibilidad crediticia para la adquisición de equipos mineros que pudieran mejorar la competitividad de este sector.

Según la Empresa Nacional de Minería (ENAMI), los pequeños mineros son aquellos que explotan individualmente hasta 10.000 TMS de mineral al mes, que cuentan con propiedad minera, propia o arrendada y venden su producción a ENAMI a través de un sistema de tarifas único a nivel nacional, basado en parámetros de mercado. Dada la heterogeneidad en los niveles de producción anuales y la respuesta de la producción al precio del mineral, se hace complejo estimar el número total de faenas de la pequeña minería metálica y no metálica que se encuentran en operación. En la evaluación de los programas de fomento de ENAMI por parte de la empresa INGEMINA (2017), el estudio encargado por la DIPRES estimó, en base a información obtenida de SERNAGEOMIN, un total de 3.649 faenas mineras medidas de acuerdo al número de trabajadores en faena (menor a 200.000 horas trabajadas al año).

Como parte de su misión, ENAMI apoya a la pequeña y mediana minería del país mediante una política de fomento con impacto a través del financiamiento de herramientas de apoyo productivo, tales como:

- **Estudios distritales:** el objetivo de este instrumento es poder contar con información geológica básica de los distritos mineros. Para ello se determinan modelos metalogénicos que permiten la futura exploración y consecuentes acciones de reconocimiento y desarrollo de nuevos proyectos mineros. Desde el año 2007 al 2018 se han ejecutado un total de

156 proyectos con una inversión de US\$7,8 millones, los que lograron determinar recursos por 148 millones de toneladas de minerales metálicos como el cobre, oro y plata, y en menor medida otros no metálicos como sílice y zeolitas. Estos proyectos se han ejecutado desde la región de Arica hasta el Maule, concentrándose en las regiones de Atacama y Coquimbo (ambas con un 60% de los proyectos).

- **Programa de reconocimiento de recursos y/o reservas y planificación minera:** este instrumento está orientado a la disminución del riesgo en el negocio minero mediante el financiamiento de labores mineras y/o sondajes. Se encuentra vigente desde el año 2000 con una inversión total de parte de ENAMI por US\$40,7 millones y con un retorno del 43% de la inversión por parte del sector. Este instrumento en el año 2019 ejecutó un presupuesto de US\$1,7 millones, el cual benefició a un total de 60 proyectos que ejecutaron iniciativas de diseño y planificación de proyectos de explotación.
- **Asesoría técnica:** instrumento que tiene por objetivo apoyar el desarrollo de proyectos de los pequeños mineros por medio de consultorías/asesorías especializadas que permitan mejorar la ejecución de los proyectos mediante el mejoramiento de su productividad. Las asesorías se implementan en las distintas etapas del negocio minero desde materias relacionadas a la propiedad minera, asesorías geológicas, topográficas, estudios de métodos de explotación, operación tales como fortificación, perforación, tronadura, carguío, transporte, extracción, ventilación, entre otros, hasta temas de mejoramiento de gestión por medio de la comercialización de los productos y el incremento en el valor agregado de los productos y mejoras en seguridad.
- **Apoyo a la producción segura:** con el objeto de mejorar los estándares de seguridad, calidad de vida y medio ambiente en faenas mineras, permite asesorar en el cumplimiento de la normativa vigente a este respecto. Este instrumento comenzó su ejecución en 2013 y al 2018 ha financiado 119 proyectos con una inversión de US\$2,2 millones, concentrado en su mayoría (85%) a resolver temas de seguridad y en menor medida (15%) a mejorar la calidad de vida de los trabajadores.
- **Programa desarrollo de capacidades competitivas:** con orientación al fomento de la innovación y transferencia tecnológica mediante el apoyo en la búsqueda de financiamiento y el establecimiento de alianzas estratégicas con otras instituciones públicas y privadas de fomento, investigación y desarrollo tanto de proyectos individuales como de proyectos asociativos. El objetivo es apoyar a los pequeños mineros en la

adopción de prácticas en la operación y gestión del negocio minero, mediante la implementación y cumplimiento de estándares y/o normas nacionales e internacionales. Las capacitaciones están orientadas a mejorar las competencias de los pequeños mineros en áreas técnicas de operación, administración y gestión. Desde el año 2007 al 2018 se han capacitado a 4.993 mineros con una inversión del orden de US\$3,6 millones.

- **Programa PAMMA del Ministerio de Minería y ENAMI:** el Programa de Capacitación y Transferencia Tecnológica para la Pequeña Minería Artesanal, PAMMA, busca dar soporte a los productores de menor escala a lo largo de Chile. El PAMMA va en directo beneficio de este sector productivo, relevante en la generación de empleo en 44 localidades del país. Asimismo, busca potenciar y regularizar, por medio de instrumentos de fomento, el desarrollo de la pequeña minería, apoyando económicamente su actividad. El programa consiste en la evaluación de planes de exploración y desarrollo productivo. Desde 2002 a la fecha es administrado por ENAMI, que entrega cada año aproximadamente \$2.000 millones.
- **El rol de las asociaciones mineras y los encadenamientos productivos:** Según datos de la ENAMI, actualmente existen 1.029 productores de menor escala empadronados a la estatal. La gran mayoría de ellos pertenece a alguna de las 38 asociaciones gremiales agrupadas en la Sociedad Nacional de Minería (SONAMI) y que se encuentran ubicadas en distintas localidades mineras del país. Es importante destacar el rol que cumplen estas organizaciones dentro del territorio, ya que facilitan y promueven los encadenamientos productivos locales, los que impulsan la movilidad social y económica en donde se insertan las operaciones de minería de menor escala.

III.1. Producción de cobre en la pequeña minería

La pequeña minería nacional ha jugado un rol relevante en cuanto a la generación de empleos en zonas importantes del país, particularmente en las regiones de Atacama y Coquimbo. Si bien, desde el punto de vista productivo su contribución a la producción nacional es de baja incidencia, representando solo un 0,9% de esta, en el año 2020 fue de 49.682 tmf de cobre, como se muestra en la Figura 11.

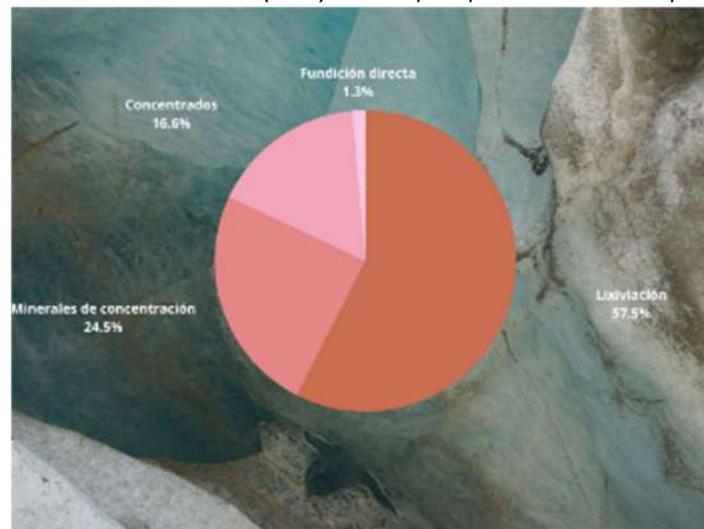
Figura 11. Producción de Cu (tmf) en la pequeña minería



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

Para la pequeña minería, su principal producto es el mineral de cobre oxidado que se procesa mediante lixiviación (57%); le siguen en nivel de importancia la extracción de minerales para el proceso de concentración (25%), en menor medida producen concentrados (17%) y una mínima parte de minerales de fundición directa (1%), según se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Producción de Cu (tmf) en la pequeña minería por producto*



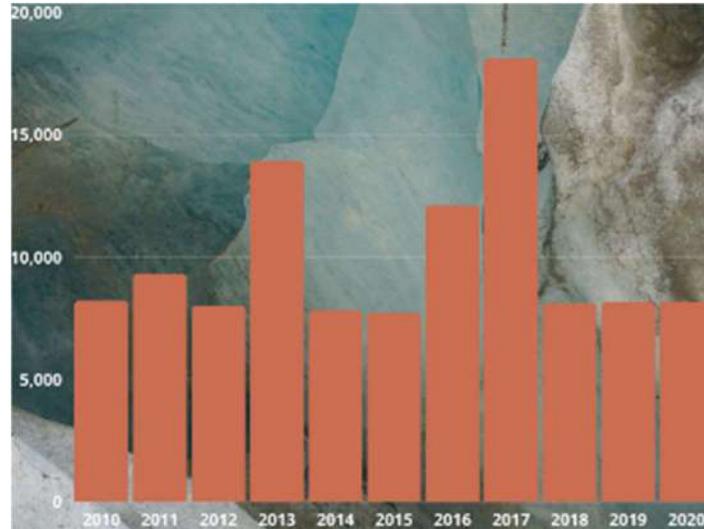
(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

* La producción de Cu por precipitado fue de un 0,1%

Respecto de la producción de concentrados de Cu, la pequeña minería ha sido variable durante la última década: mientras en 2010 se producían 8.200 toneladas, en 2013 se incrementó a 13.800 toneladas para luego decaer, con excepción de

2017 donde se observó un *peak* de producción de 18.000 toneladas, que nuevamente disminuye en los dos años consecutivos para situarse en 8.143 en 2020 (ver Figura 13).

Figura 13. Producción de concentrados de Cu (tmf) en pequeña minería



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

La principal fuente de compra de la producción de minerales de la pequeña minería en Chile es realizada por ENAMI. Para que los pequeños productores mineros puedan vender sus productos a ENAMI, deben estar debidamente empadronados. En el año 2019, el padrón vigente alcanzó un total de 1.029 productores (ENAMI, 2020); de ellos, el 64% registró actividad minera mediante la recepción de minerales en sus cuatro plantas (Taltal, Salado, Vallenar y Delta). Dichas plantas sumaron un total de compra para la pequeña minería de 2,36 millones de toneladas con un valor de importe de US\$193 millones, alcanzando un total de 1.076.572 toneladas de beneficio óxidos y un total de 835.423 toneladas de beneficio sulfuros de cobre y oro recepcionadas en sus plantas Vallenar y Delta durante el 2019. Esto permitió obtener un resultado de producción de cátodos de 12.165 toneladas métricas finas de cobre y un total de 35.402 toneladas secas de concentrados de cobre y oro (ver Figura 14).

Figura 14. Evolución comercialización de minerales de ENAMI a la pequeña minería



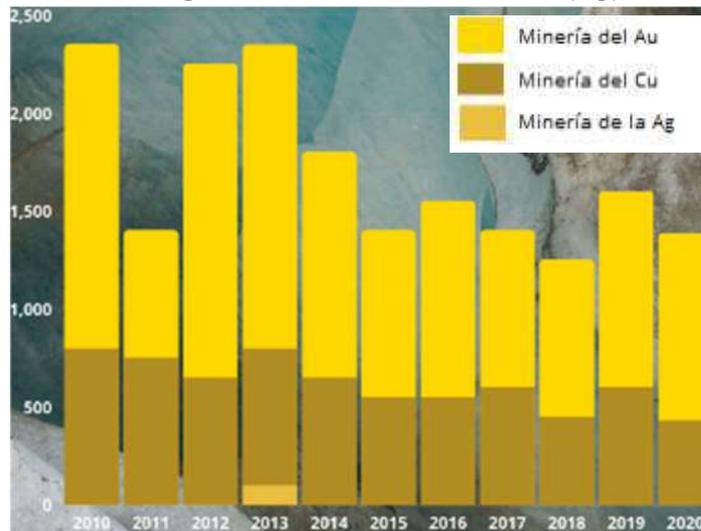
(Fuente: ENAMI. Anuario 2019)

ENAMI también obtuvo un beneficio de fusión de una carga de 336.266 toneladas en 2019, logrando una producción de cobre anódico de 65.017 toneladas obtenidas desde la Fundición Hernán Videla Lira en la Región de Atacama.

III.2. Producción otros minerales en la pequeña minería

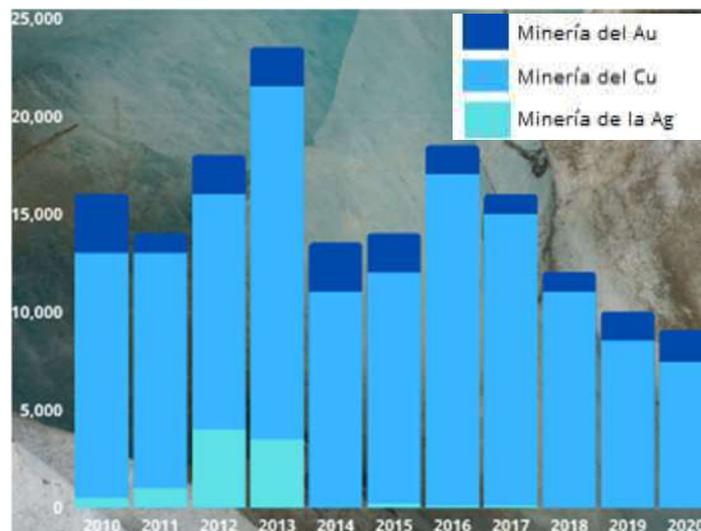
Los productores de la pequeña minería también se dedican a la explotación de minas de oro, ubicadas principalmente en las regiones de Coquimbo y Valparaíso. Su producción en el año 2020 fue de 1.407 kg de oro y 9.084 kg de plata (con un 4,2% y un 0,6% de participación de la producción nacional de oro y plata, respectivamente), tal como se observa en las Figuras 15, 16 y 17.

Figura 15: Producción de Au (kg)



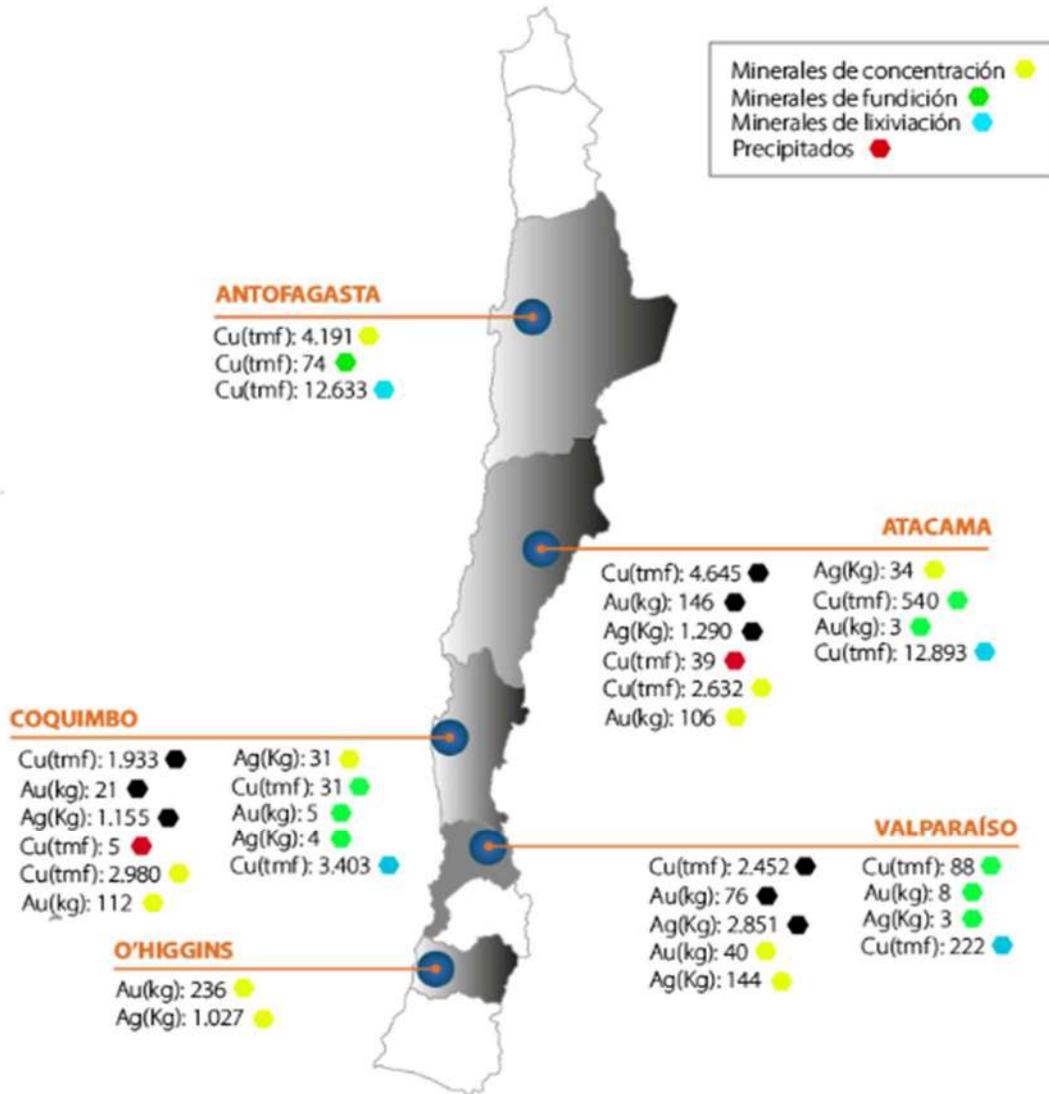
(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

Figura 16: Producción de Ag (kg)



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

Figura 17: Producción de cobre, oro y plata en pequeña minería por región



(Fuente: SERNAGEOMIN. Anuario 2020)

IV. Fuerza laboral y participación en el empleo en mediana y pequeña minería

Sin duda, uno de los desafíos más complejos en la industria minera, independiente de su escala, es satisfacer adecuadamente sus necesidades de capital humano. En efecto, según los análisis realizados por la Comisión Chilena del Cobre (COCHILCO) en el documento "Productividad en la Gran Minería del Cobre en Chile – Periodo 2000 – 2014", una preocupación que ha tenido un importante crecimiento en la agenda minera, tras el fin del superciclo de los *commodities*, ha sido el logro de mejoras de productividad.

Es por esto que la formación de una oferta de capital humano capaz de ajustarse a los requerimientos de la minería es una variable fundamental para el desarrollo de la industria.

Lo anterior cobra especial relevancia al considerar las posibilidades de sustitución entre capital físico y humano. Es decir, cómo el número y especialización de los trabajadores dentro de una operación minera puede ser reemplazado por innovaciones tecnológicas y de procesos capaces de proveer el servicio con niveles de eficiencia similares o incluso mayores.

A través de la Encuesta de Capital Humano y Gastos en la Mediana Minería, realizada por COCHILCO en 2018, se consultó por las dotaciones de trabajadores propios y externos de las empresas de mediana minería del cobre, así como los perfiles técnicos y profesionales más requeridos en la actualidad y la proyección a 2028. A nivel agregado, los resultados muestran un aumento de 20% en el número total de trabajadores en las operaciones consideradas entre los años 2018 y 2028.

Adicionalmente, la encuesta exhibe los datos por nivel educacional, en donde se aprecian importantes diferencias. En particular, la proporción de trabajadores propios con educación universitaria o superior es de 20,5%, más del doble de los trabajadores externos, con un 9,9%. Sin embargo, a nivel de educación técnica ocurre lo inverso. En esta categoría son los trabajadores externos los que representan una mayor proporción que las dotaciones propias (27,1% versus 14,3%).

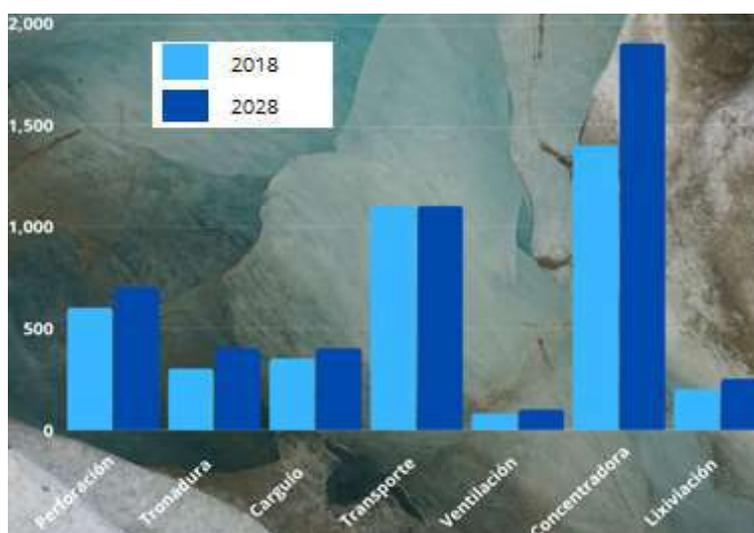
Tabla 3. Perfil educativo de capital humano de empresas de mediana minería, 2018

Perfil educacional	Dotación propia		Dotación externa	
	Nro.	%	Nro.	%
Educación universitaria o más	1.094	20,5	549	9,9
Educación técnica	761	14,3	1.496	27,7
Educación básica o media	3.472	65,2	3.069	55,5
Otros (sin educación formal)	2	0,0	417	7,5
Total	5.329	100	5.530	100

(Fuente: elaboración propia)

Para 2028, se aprecia que los procesos con mayores aumentos son concentradora (+12% en dotación propia y +89% en externa) y perforación (+35% en dotación propia y +18% en externa), seguido a distancia de tronadura (+67% en dotación propia y -20% en externa). Para el resto de los procesos, en cambio, no se estiman variaciones significativas en los periodos considerados.

Figura 18. Dotación de trabajadores propios y externos por operación



(Fuente: COCHILCO)

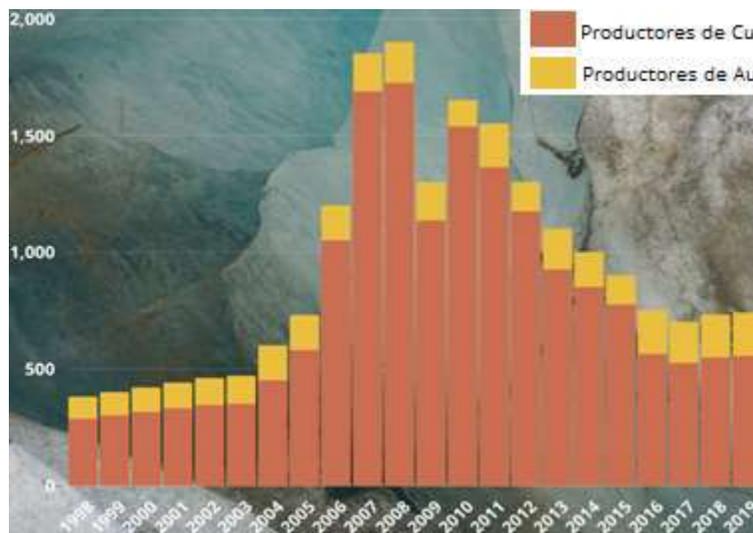
En cuanto a nivel de automatización, considerando todas las operaciones, COCHILCO estima que el trabajo mecanizado concentra el mayor uso dentro de las operaciones de mediana minería, alcanzando un 70% de preponderancia. Sin embargo, la entidad proyecta una disminución a 57% para 2028, que se explica principalmente por el eventual impacto de los procesos de automatización en el sector. En paralelo, se aprecia un aumento significativo del trabajo tecnologizado, desde un 7% en 2018 a un 19% en 2028. Por último, el trabajo manual tendría un aumento desde un 15% de preponderancia en la actualidad hasta un 20% al 2028.

Respecto a la participación femenina en la mediana minería, ésta alcanza un 8,1% del sector, mientras que, en la pequeña minería, alcanza un 4,6%.

En términos de empleo directo, según fuentes de SERNAGEOMIN, en 2013 la mediana minería del cobre empleó a 6.556 trabajadores, la del hierro a 330 y la del oro y plata a 1.952 personas. En cuanto al empleo total del sector (directos e indirectos), la mediana minería registró 63.637 trabajadores, representando el 28% de la participación en el empleo de toda la industria.

En cuanto a la fuerza laboral de la pequeña minería de Chile, se puede identificar un universo cercano a 800 productores, de los cuales un 80% aproximadamente corresponde a productores de cobre, mientras que el resto se desempeña en la minería del oro. Asimismo, es importante destacar que por cada pequeña faena minera se estima un número de entre tres a cinco trabajadores.

Figura 19. Número de productores de Cu y Au en la pequeña minería



(Fuente: SONAMI)

V. Inversión minera y cartera de proyectos en mediana minería

COCHILCO recientemente publicó su Informe de inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2020-2029, el cual muestra que, del total de 35 iniciativas proyectadas para este periodo, un 89,4% de la inversión total corresponde a minería del cobre. De esta cartera, tan solo 5 corresponden a mediana minería.

El proyecto Arqueros de Nittetsu Mining que actualmente opera en Chile en la faena de Atacama Kozan en Tierra Amarilla, tiene un presupuesto estimado de US\$200 millones. Se encuentra ubicado en la provincia del Elqui, a unos 60 kilómetros de la ciudad de La Serena en la Región de Coquimbo. Es un proyecto polimetálico, principalmente de cobre, cuyos propietarios son el *joint venture* entre capitales japoneses y chilenos. Este proyecto contempla tanto la extracción como el procesamiento de mineral para la producción de concentrados de cobre como producto final.

El segundo proyecto en carpeta es el de la compañía Sierra Norte S.A. ubicado en la Región de Atacama, con fecha probable de puesta en marcha para el año 2023. Contempla una inversión de US\$597 millones y estima la contratación de 567 trabajadores cuando comience su operación. El proyecto bautizado Diego de Almagro tiene proyectada la extracción de mineral desde dos rajes: Esther y Carmen-Paulina. El mineral tipo sulfuro será procesado en una planta concentradora que estima producir 24 mil toneladas por día. El mineral de óxido será procesado en planta de lixiviación para luego procesar mediante extracción por solventes y electro-obtención, con una producción estimada de 2.000 toneladas al día. Este proyecto espera alcanzar una producción promedio de 35 mil toneladas anuales de cobre fino, tanto de concentrado como de cátodos de cobre de alta pureza.

Un tercer proyecto potencial es el de la Sociedad Minera el Águila Ltda., denominado Productora, propiedad de la minera australiana Hot Chilli (82,5%) y la chilena Compañía Minera del Pacífico CAP (17,5%) a través de la Sociedad Minera el Corazón Ltda. La fecha de puesta en marcha de este proyecto está programada para el año 2023, con una inversión estimada en US\$725 millones para la producción en una mina de rajo abierto y con una planta concentradora con capacidad de producir concentrado de cobre de 66 mil toneladas y de 42 koz de oro anualmente, con una vida útil estimada en 20 años.

El cuarto proyecto de mediana minería posible de entrar en operación, en el año 2024, es El Espino de la minera Pucobre, con un total de US\$624 millones de inversión y una dotación estimada de 600 personas cuando entre en operación. Ubicado en la Región de Coquimbo, comuna de Illapel, estima producir concentrados de

cobre por aproximadamente 42.000 toneladas de cobre fino y 20.000 onzas de oro al año con una vida útil de 16 años.

Finalmente, el quinto proyecto probable de puesta en marcha, en 2024, es Playa Verde de la minera Copper Bay, con una inversión de US\$95 millones, que tiene como objetivo extraer mineral desde relaves antiguos depositados en la playa grande de Chañaral, los cuales provenían de la fundición Potrerillos y la mina Salvador de Codelco. Se estima que podría contar con cerca de 250 millones de toneladas de relaves conformados por depósitos de arenas metalíferas con potenciales de recuperación de 35 Mt con 0,24% de cobre y con potencial de producir 8.640 toneladas al año en un periodo de siete años.

El informe de COCHILCO adicionalmente menciona una serie de proyectos que se encuentran en etapa de factibilidad que podrían entrar en operación en el mediano plazo, compuesta por ocho proyectos mineros tanto de expansión como reposición, por una inversión total estimada en US\$69,5 millones. Estos proyectos han fijado su puesta en marcha entre los años 2021-2022 según se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4. Listado de proyectos de cartera de inversiones con estudio de impacto ambiental en calificación

Puesta en marcha	Proyecto	Operador	Región	Tipo de proyecto	Inversión (MMUS\$)	Tipo de producto	Producción máxima estimada
2021	Proyecto Minero Diego de Almeyda	Cía. Minera Cruz	Atacama	Expansión	32.6	Cu fino en concentrado	3.850 ton
2021	Modificación Plan Minero Mina Los Colorados	Cía. Minera del Pacífico	Atacama	Reposición	2.0	Pellet feed	n/a
2021	Modificación Proyecto Delirio	Santiago Metals Proyecto Dos Ltda.	Atacama	Reposición	1.5	Cátodos SxEw	7.344 ton
2021	Proyecto Minero San Cayetano	Cía. Minera Cruz	Coquimbo	Expansión	20.6	Mineral de Cu	55.100 tpm
2022	Optimización Operacional Mina Uva Subterránea	CEMIN	Valparaíso	Reposición	5.0	Mineral de Cu	70.000 tpm
2022	Optimización Operacional Planta Catemu	CEMIN	Valparaíso	Reposición	2.0	Cátodos SxEw	18.000 ton
2022	Ampliación Proyecto de Explotación Mantos Cobrizos	Cía. Minera Carmen Bajo	Atacama	Expansión	0.8	Mineral de Cu	15.000 tpm
2022	Modificación IV Planta de Óxidos Taltal	Minera Las Cenizas	Antofagasta	Expansión	5.0	Cátodos SxEw	3.600 ton

(Fuente: COCHILCO)

PARTE 2: ANÁLISIS DE RESULTADOS SOBRE TRANSFORMACIÓN DIGITAL

Los capítulos que se presentan a continuación corresponden a los análisis de resultados obtenidos a través de un cuestionario destinado a empresas de mediana minería, en relación a su conocimiento sobre transformación digital y/o desarrollo tecnológico que han efectuado en el último tiempo. El esquema del cuestionario se encuentra detallado en la sección Anexos, y recopiló información cuantitativa de las empresas en términos de producción mineral y caracterización de sus faenas, así como el conocimiento en transformación digital y la infraestructura de red de datos utilizada. Además, estos resultados fueron robustecidos por medio de entrevistas personalizadas a algunos representantes de las mismas compañías, sirviendo de base cualitativa a la hora de interpretar los datos.

El cuestionario fue contestado por 11 empresas del sector, de las cuales 3 nos brindaron su apoyo mediante entrevistas. Si bien la muestra solo representa un 26% del total de empresas de mediana minería existentes, tiene una importante injerencia en términos productivos, lo que podría servir de forma representativa al momento de presentar propuestas de desarrollo tecnológico al sector.

Para efectos de este estudio y luego de analizar diferentes definiciones para el concepto de transformación digital, se ha elaborado la siguiente: "La transformación digital es el uso de tecnologías computacionales o de la información en todas las áreas de una organización, provocando un cambio en su forma de funcionar. De esta manera, la cultura organizacional, los procesos de negocio, la relación con el cliente y la interacción con la sociedad se optimizan y se vuelven más ágiles ante los cambios". Así, el concepto de transformación digital es único y transversal, es decir, no hay definiciones específicas para los distintos sectores productivos, y la diferencia radica en la forma en que se implementa. Por tanto, la hoja de ruta (*roadmap*) que cualquier organización establezca para incorporar la transformación digital, deberá integrar a todas sus áreas.

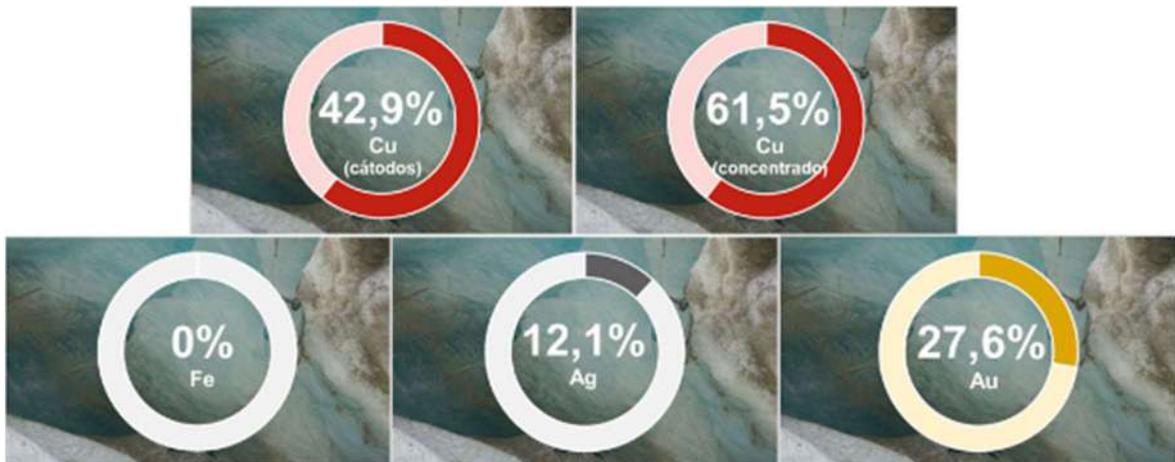
VI. Producción mineral

A partir de los resultados obtenidos de las 11 empresas encuestadas, la producción de cátodos de cobre de la muestra corresponde a un 42,9% del total de mediana minería. En cuanto a los concentrados del mismo mineral, estos alcanzaron un 61,5% del sector; en ambos casos se consideró adicionar la producción de una faena en el extranjero.

En relación a la producción de otros metales como oro, hierro y plata, la representatividad de la muestra fue de 27,6%, 0% y 12,1%, respectivamente, en relación a la producción anual de los mismos.

El resumen se observa en la Figura 20.

Figura 20: Porcentaje de producción de Cu, Ag, Fe y Au de la muestra encuestada en relación a la producción anual en mediana minería



(Fuente: elaboración propia)

VII. Faenas

Del total de la muestra, actualmente se encuentran activas 27 faenas de mediana minería. De ellas, 14 se localizan en la Región de Atacama, 5 en la Región de Coquimbo, 5 en la Región de Valparaíso, y el resto en las regiones de Antofagasta, O'Higgins y en el extranjero, tal como se presenta en la Figura 21.

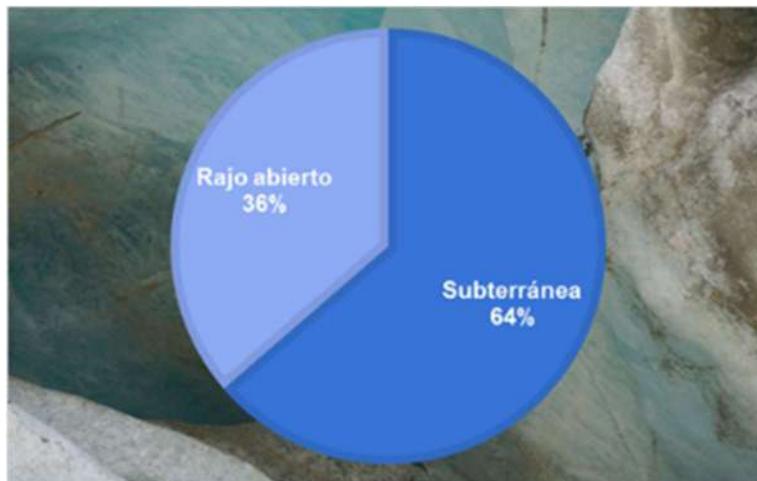
El tipo de faena es predominantemente subterránea, abarcando un 64% de la muestra (Figura 22), y en su mayoría (45,4%) cuentan en simultáneo tanto con procesos de electro-obtención como de flotación, aunque un porcentaje importante (36,4%) solo cuenta con proceso de flotación, tal como se observa en el diagrama de Venn (Figura 23).

Figura 21: Ubicación geográfica de faenas mineras



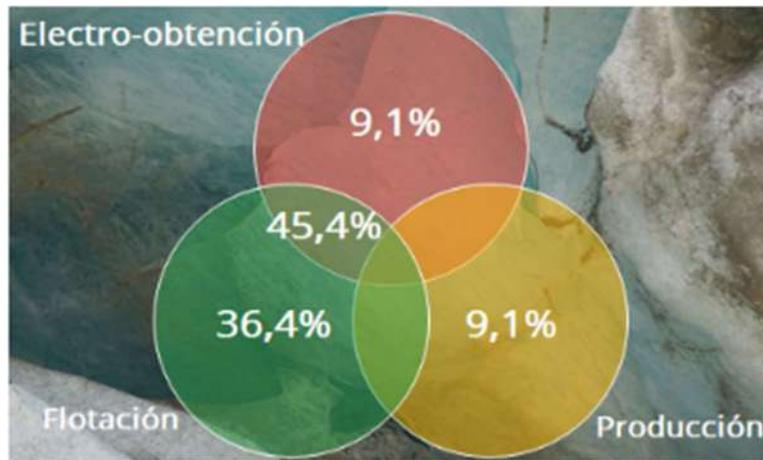
(Fuente: elaboración propia)

Figura 22: Tipo de faena



(Fuente: elaboración propia)

Figura 23: Principal proceso productivo desarrollado



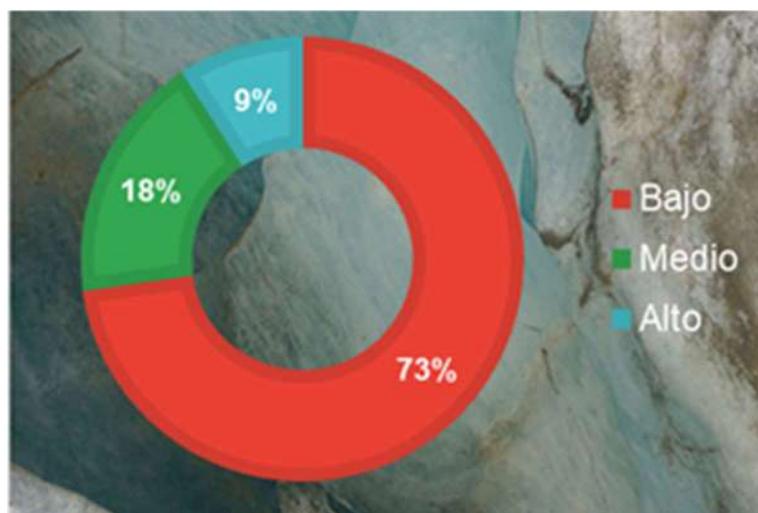
(Fuente: elaboración propia)

VIII. Conocimiento en transformación digital

Respecto al nivel de conocimiento en transformación digital, un 73% de la muestra posee un nivel bajo (Figura 24), principalmente ligado al desconocimiento en desarrollo tecnológico y a la separación que existe en la automatización y control de procesos en mina y planta. Tal como lo señaló uno de los entrevistados, si bien entienden la relación entre tecnología y un ambiente de tecnologías de la información (TI), la automatización y control son espacios diferentes, por tanto, todo lo relacionado al mundo digital para poder capturar datos y realizar estadísticas, por ejemplo, se analiza aparte. Asimismo, señalan que, si bien funcionan, son como "cajas negras"; en ese sentido, la transformación digital debiese ser vista como bloques, de manera de ir desarrollando un trabajo por partes de forma transversal e integrada a las distintas etapas de producción mineral.

A pesar de este bajo conocimiento, consideran necesario implementar iniciativas ligadas a la digitalización en el mediano plazo, y ya han comenzado a desarrollar algunos proyectos en ello, principalmente al área de gestión y administración. Una de las empresas entrevistadas señala que desarrollaron un plan estratégico para los próximos tres años, en cuyo foco se encuentra llevar a cabo un proceso de transformación digital, cuya iniciativa surgió de un análisis interno de brechas que ha permitido levantar otros proyectos más urgentes, los cuales son priorizados en base del aporte al negocio y sus costos de implementación. Sin embargo, estas prácticas todavía son parte de la minoría de las empresas del sector.

Figura 24: Nivel de conocimiento en minería 4.0 y transformación digital



(Fuente: elaboración propia)

Mientras la gran minería posee una cartera de proyectos priorizados, con disposición de capital para ir evaluándolos y generando implementación

escalonada, en la mediana minería, aún no existe, en general, un ordenamiento interno para iniciar procesos de transformación digital. Tal como lo señala un entrevistado: “La producción actual en la mediana minería se enfrenta a riesgos de operación, en la utilización adecuada del equipamiento. Por ende, se hace necesario buscar tecnologías aplicadas que hoy se encuentran disponibles en el mercado, pero para ello a la mediana minería le falta ser un poquito arriesgada en el sentido de buscar tecnología que se aplique a otro rubro y aplicarla acá, para poder dar soluciones”.

Dado lo anterior, en términos de aspectos internos (Tabla 5), la prioridad está enfocada principalmente en disponer de recursos financieros (45% lo señala como la primera prioridad), como segunda prioridad se establece la necesidad de contar con los recursos humanos adecuados para implementar proyectos de transformación digital, y así continuar con tecnologías del negocio y, finalmente, barreras culturales, entendiéndose además que la gran brecha que existe actualmente en transformación digital entre mediana y gran minería responde a los presupuestos más holgados con los que la gran minería puede desarrollar proyectos de esta índole u otros.

Tabla 5: Nivel de importancia de aspectos internos a incorporar por minera (1 más importante, 4 menos importante)

Prioridad	Aspecto interno	% Prioridad
1	Recursos financieros	22,7
2	Recursos humanos	22,7
3	Tecnología del negocio	18,2
4	Barreras culturales	36,4

(Fuente: elaboración propia)

Entre los aspectos externos detectados (Tabla 6), el panorama es muy similar al anterior, donde la prioridad está orientada a soluciones competitivas en costos de implementación (soluciones a costos), en segundo término de importancia las soluciones escalables y en tercera prioridad la vinculación con universidades y centros de I+D; en este sentido y considerando que la mayoría de las faenas de mediana minería se encuentran localizadas en regiones donde existen universidades locales con las que podrían colaborar para facilitar los procesos de transformación digital, se reconoce una baja vinculación. En el cuarto nivel de prioridad se encuentran los programas de Gobierno y subsidios, y, por último, el

conocimiento de los proveedores en la materia; en este aspecto existen dificultades expresadas en la falta de interés de los proveedores que usualmente desarrollan proyectos para la minería de gran escala, en apoyar los procesos de transformación digital de la mediana y pequeña.

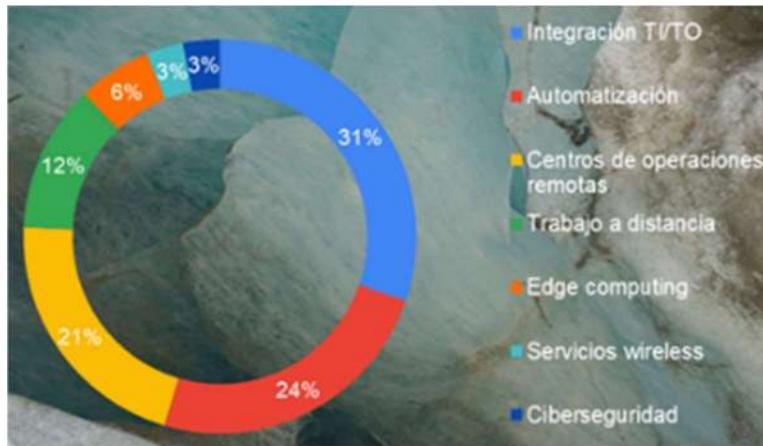
Tabla 6: Nivel de importancia de aspectos externos a incorporar por minera (1 más importante, 6 menos importante)

Prioridad	Aspecto externo	% Prioridad
1	Soluciones a costos	25,0
2	Soluciones escalables	16,7
3	Universidades y Centro I+D	16,7
4	Programas de Gobierno	8,2
5	Subsidios	16,7
6	Conocimiento proveedores	16,7

(Fuente: elaboración propia)

En relación a qué ámbitos tecnológicos consideraron relevantes para abordar mediante proyectos de transformación digital (Figura 25), un 31% de la muestra cree que es la integración del área de tecnologías de la información con la parte operativa, lo cual no sucede hoy en día; asimismo, la automatización de procesos (24%) y los centros de operaciones remotas (21%) son otros puntos importantes a abordar. Aquí se puede agregar que ya existen iniciativas al respecto, como algunos proyectos de automatización para desarrollar procesos de malla-perforación, aunque no existe todavía la operación remota para la perforación.

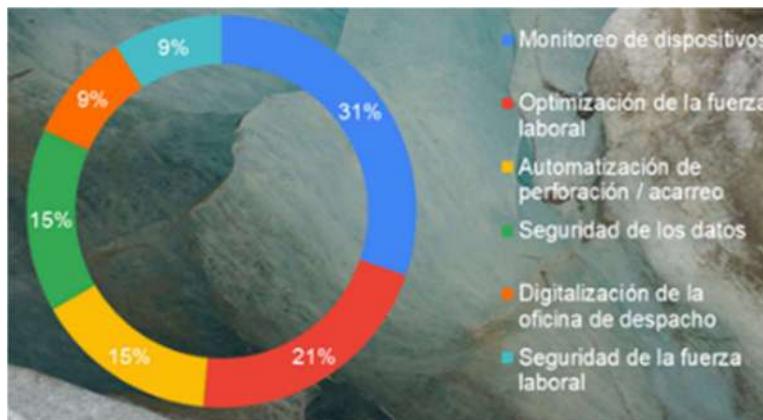
Figura 25: Ámbitos tecnológicos relevantes a abordar mediante proyectos de transformación digital



(Fuente: elaboración propia)

Con respecto a las áreas de trabajo relevantes a abordar mediante proyectos de digitalización (Figura 26), un 31% de los encuestados considera el área de "monitoreo de dispositivos" y un 21% la "optimización de la fuerza laboral". Esta última es sin duda un punto de inflexión dentro del desarrollo de este tipo de proyectos, puesto que la disposición de personal adecuado es clave para la optimización de otras áreas de trabajo.

Figura 26: Áreas de trabajo relevantes a abordar mediante proyectos de digitalización

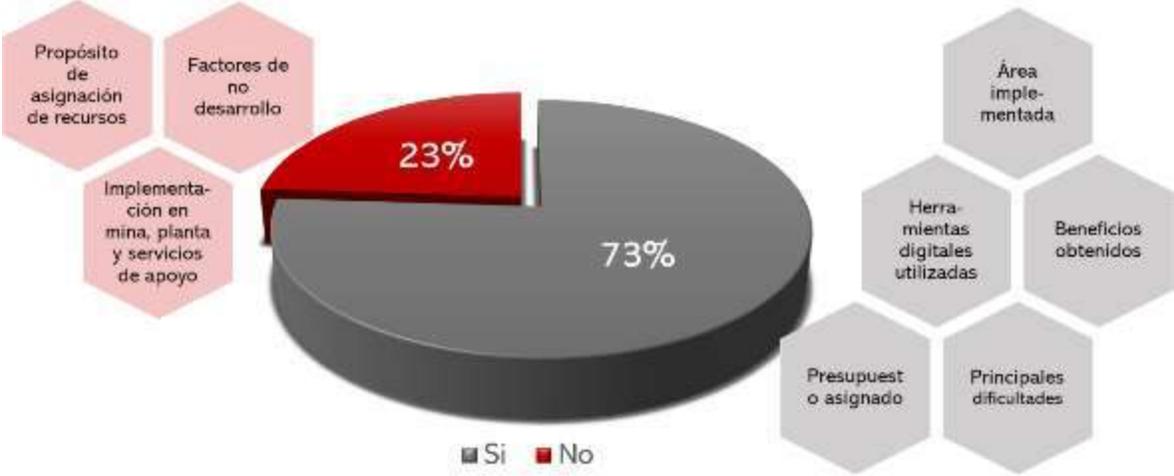


(Fuente: elaboración propia)

Por otra parte, un 73% de los encuestados ha desarrollado procesos de transformación digital en los últimos dos años (Figura 27), principalmente vinculados a áreas de gestión mediante la implementación de SAP Business One, y algunos en automatización en perforación. De este grupo, la mayoría solo destinó entre un 1%

y un 5% de su presupuesto para la implementación de dichos proyectos, utilizando principalmente herramientas de sensado y/o internet de las cosas para su desarrollo, obteniendo como principal beneficio un aumento en su productividad, e identificando como principales dificultades la falta de conocimiento de las tecnologías y el hecho de contar con recurso humano no calificado. Asimismo, las principales áreas donde se implementaron las propuestas fueron planta, tronadura, logística, recursos humanos, mina y gestión de la seguridad (Tabla 7).

Figura 27: Desarrollo de proyectos de transformación digital en los últimos dos años y factores que determinan su respuesta



(Fuente: elaboración propia)

Tabla 7: Resultados complementarios para quienes desarrollaron proyectos de transformación digital en los últimos dos años

Factor	Resultado	% Impacto
Presupuesto asignado	Entre un 1% y 5%	17,7
Área implementada	Planta, logística	14,0
Herramientas digitales	Sensado, internet de las cosas	33,2
Beneficios obtenidos	Aumento de productividad	16,4
Principales dificultades	Falta de conocimiento de las tecnologías, recurso humano no calificado	18,7

(Fuente: elaboración propia)

En tanto, el 27% que aún no ha implementado propuestas de digitalización en sus procesos se justifica principalmente por la poca disponibilidad de capital humano adecuado, así como por la asignación de recursos orientada en general a mejorar la productividad y/o reducir costos mediante procesos tradicionales. Además, identifican áreas críticas en mina (geología), planta (flotación, lixiviación, relaves) y servicio de apoyo a faenas (gestión de abastecimiento), donde los proyectos de transformación digital podrían jugar un rol clave (Tabla 8).

Tabla 8: Resultados complementarios para quienes no desarrollaron proyectos de transformación digital en los últimos dos años

Factor	Resultado	% Impacto
Factores de no desarrollo	Disponibilidad de capital humano	11,7
Implementación en mina	Geología	20,0
Implementación en planta	Flotación, lixiviación y relaves	24,1
Implementación en servicios de apoyo	Gestión de abastecimiento	17,3
Propósito de asignación de recursos	Mejorar productividad Reducir costos	26,9

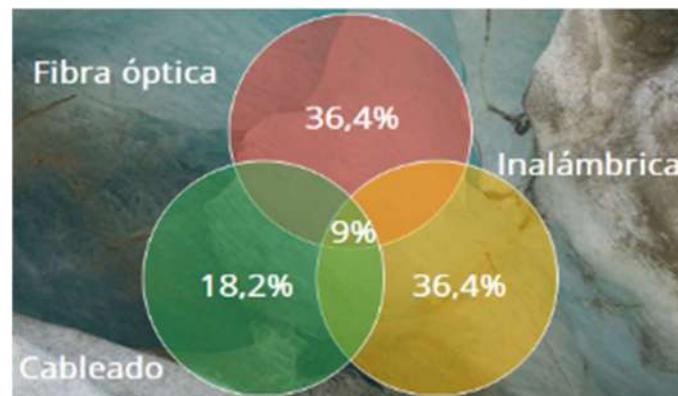
(Fuente: elaboración propia)

IX. Infraestructura de red de datos y conectividad

En relación al tipo de red de datos utilizada en faena y operaciones, la fibra óptica e inalámbrica lideran el listado, pero se deben realizar observaciones con respecto a la Figura 28, puesto que existen minas en las que sus faenas poseen fibra óptica, pero la conexión de estas con el mundo es por vías significativamente más lentas. Hay otros casos en que el área de administración está conectada al mundo con fibra óptica de alta velocidad, pero las faenas ni siquiera cuentan con conexión a Internet. Esto último se debe a que la mayoría de las faenas se ubica en zonas cordilleranas donde no existen proveedores de fibra óptica, o donde instalar fibra óptica tiene un costo muy alto versus los beneficios que otorgaría la conectividad.

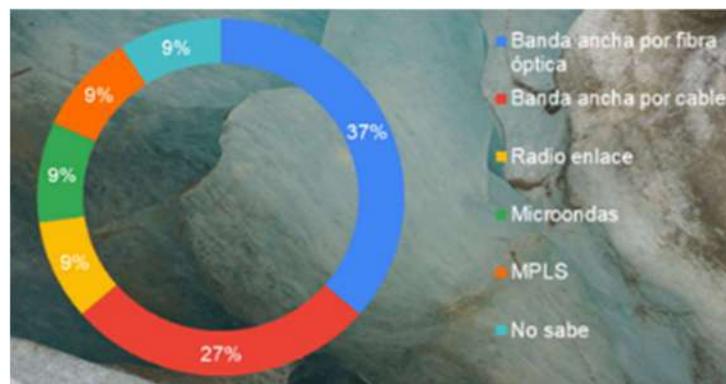
Solo un 37% posee un tipo de conexión de banda ancha con fibra óptica entre la faena y la oficina administrativa principal y un 27% lo hace por medio de banda ancha por cable; sin embargo, aún existen casos que utilizan radioenlace, microondas o MPLS, tal como se observa en la Figura 29.

Figura 28: Tipo de red de datos utilizada en faena



(Fuente: elaboración propia)

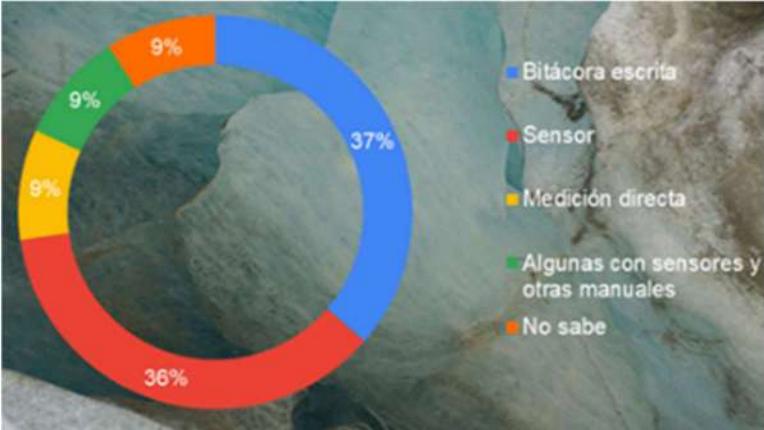
Figura 29: Tipo de enlace entre las faenas y la oficina administrativa principal



(Fuente: elaboración propia)

Entre otros aspectos, la Figura 30 señala que aún un 37% de los encuestados utiliza bitácoras escritas para la captura de datos en operaciones y solo un 36% lo hace vía sensores, lo que en muchas ocasiones produce la demora en la captura, tratamiento y procesamiento de datos.

Figura 30: Captura de datos en operaciones

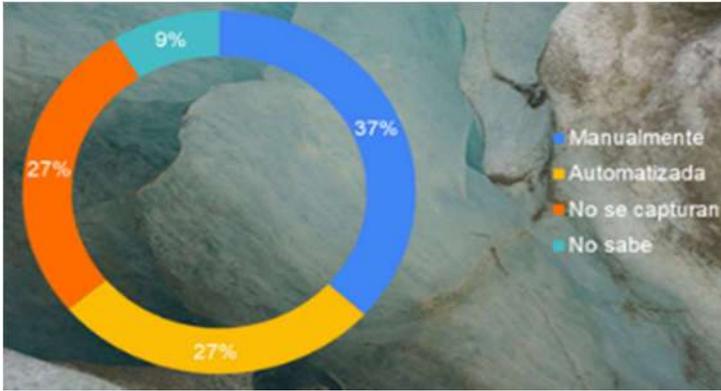


(Fuente: elaboración propia)

En relación a la recolección de datos, un 36,4% de los encuestados aún lo hace de forma manual, mediante un capturador de datos inalámbrico para posterior descarga, o de forma remota, y solo un 27,3% lo hace de forma automatizada. De estos últimos, solo un 66,7% procesa posteriormente la información. Además, un 27,3% de la muestra señaló que no captura datos (Figura 31).

En relación a la disposición de la información generada, un 37% genera acciones concretas de mejora, un 18% genera modelos predictivos de procesos y otro 18% realiza análisis en línea. Por el contrario, un 9% no genera acciones ni análisis con los datos extraídos (Figura 32).

Figura 31: Forma de recolección de datos y procesamiento



(Fuente: elaboración propia)

Figura 32: Disposición de los datos generados

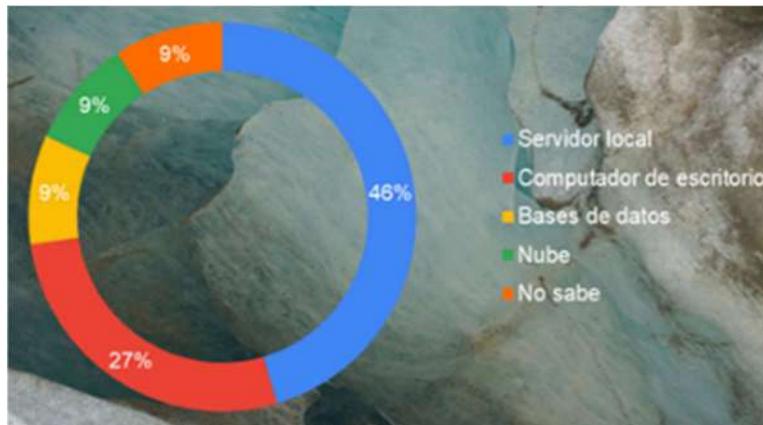


(Fuente: elaboración propia)

En la Figura 33 se muestra un gráfico con el mecanismo para almacenar los datos que se capturan. La mayoría lo realiza localmente (82%), utilizando un computador especializado para ese propósito, que comúnmente se denomina servidor; en el 56% de los casos el servidor es de propiedad de la minera y en un 11% corresponde a un servidor de una empresa externa pero que se encuentra en el lugar (local). También se observa que un 33% usa un computador de escritorio para almacenar los datos, abriendo un riesgo en seguridad y privacidad de los datos, ya que un computador de escritorio está más expuesto a los ataques informáticos y además a fallas de *hardware*; solo un 9% almacena los datos remotamente utilizando el sistema de nube. Esta información es almacenada en su mayoría (73%) por años, como se aprecia en la Figura 34. Considerando que quienes dijeron almacenar en un computador de escritorio en un 100% también almacenaban información por años, cabe preguntarse si esos datos fueron intervenidos por terceros o no, ya que el ataque informático más peligroso es el que ingresa a robar o manipular información y una vez efectuado el hecho se va sin dejar ningún rastro.

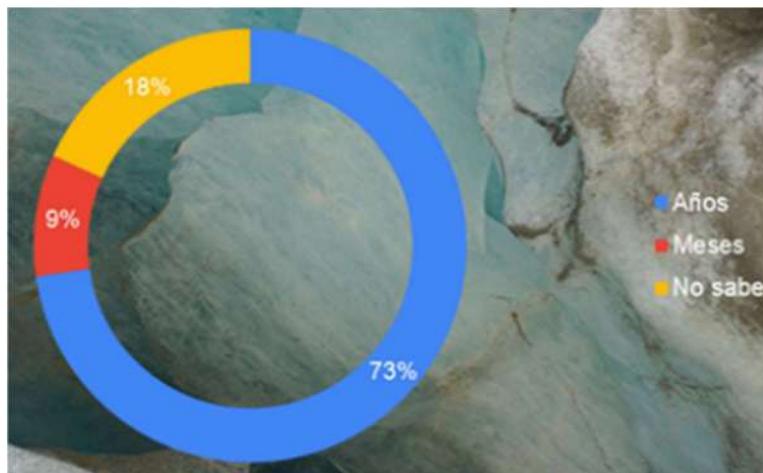
Si bien la información entregada es disímil, hay algunas empresas que no tienen nada y otras que tienen todo automatizado. Se observa que los *softwares* de ingeniería conforman "islas" dentro de la infraestructura de Tecnología de la Información (TI) de las mineras: no queda claro si los datos que manejan los *softwares* de ingeniería son gestionados o no, ni si los análisis y conclusiones hechos con estos *softwares* son almacenados o no para uso posterior.

Figura 33: Servidor/equipo utilizado para almacenamiento de datos históricos



(Fuente: elaboración propia)

Figura 34: Tiempo de almacenamiento de datos



(Fuente: elaboración propia)

En cuanto a los softwares de gestión más utilizados por las compañías encuestadas, lideran SAP Business One, Softland ERP y Flexline, mientras que otras compañías llevan a cabo esta tarea solo mediante el uso de Microsoft Excel. El software minero en 3D Maptek Vulcan es utilizado por diversos encuestados, tanto en evaluación de yacimientos como en diseño y planificación minera; Gemcom Gems, otro software minero, destaca en evaluación de yacimientos y diseño minero. Por otro lado, DATAMINE, conocido software de la empresa del mismo nombre, es un proveedor conocido mundialmente de tecnología y servicios necesarios para planificar y gestionar operaciones mineras. Otros softwares utilizados se pueden ver en la Figura 35.

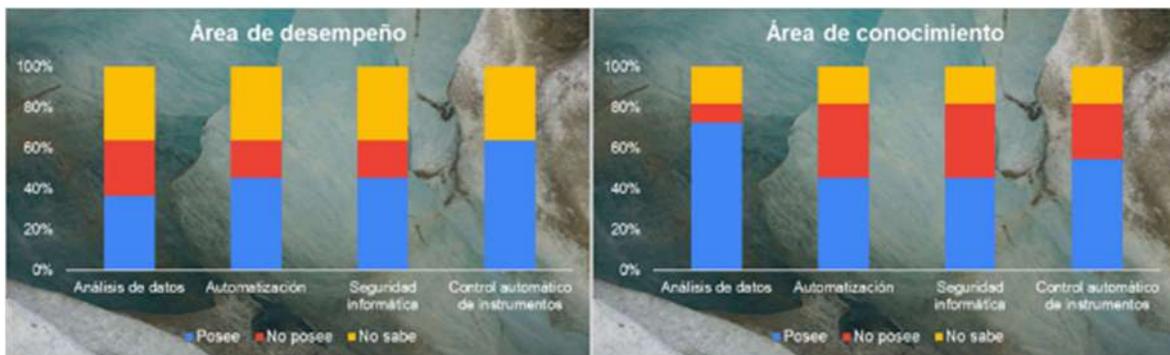
Figura 35: Programas computacionales utilizados en gestión, evaluación de yacimientos, diseño minero, planificación minera y otros



(Fuente: elaboración propia)

Respecto a si las empresas cuentan con profesionales con conocimiento en la materia o se desempeñan en áreas de análisis de datos, automatización, seguridad informática y control automático de instrumentos, un 64% de la muestra tiene en su staff a profesionales que trabajan en Instrumentación y control automático, y un 73% cuenta con profesionales con conocimientos en análisis de datos, tal como se observa en la Figura 36.

Figura 36: Conocimiento vs. desempeño de profesionales en transformación digital



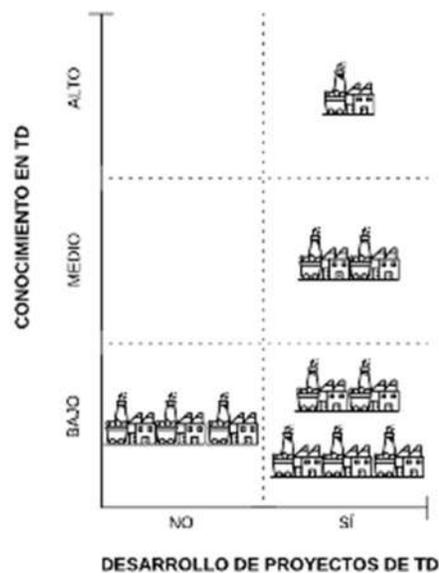
(Fuente: elaboración propia)

X. Aproximaciones preliminares de los resultados

En relación a los resultados expuestos en los capítulos anteriores es posible esbozar, de forma preliminar, un estado actual de las empresas en términos de capacidades humanas e infraestructura de datos.

Por un lado, en base a su grado de conocimiento en transformación digital y al desarrollo de proyectos en la materia, se puede elaborar una matriz genérica sobre el posicionamiento de las empresas en materia de capacidades humanas, pudiendo apuntar a acciones concretas en relación al cuadrante en que se ubican, tal como se muestra en la Figura 37. Así, los mayores esfuerzos debiesen concentrarse en las empresas que poseen bajo nivel de conocimiento en TD y que no han desarrollado algún tipo de proyecto relacionado en el último tiempo, siguiendo por las que sí han desarrollado proyectos, diferenciando en función de su conocimiento en materia tecnológica

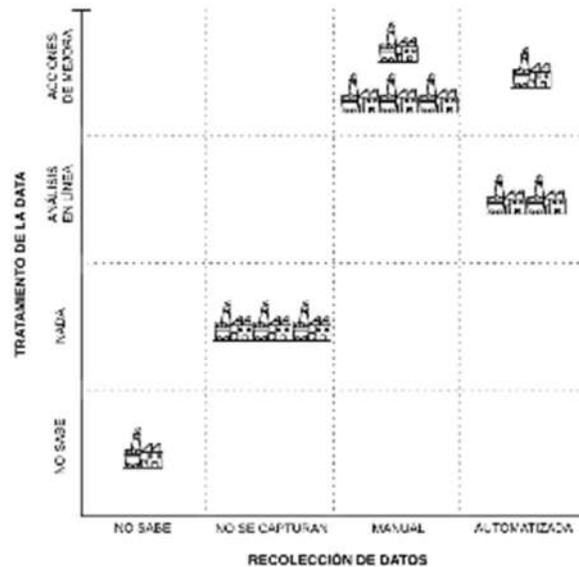
Figura 37: Posicionamiento de la muestra en capacidad humana



(Fuente: elaboración propia)

Por otra parte, en función de la recolección de datos que realizan las empresas y el tratamiento de los mismos, es posible elaborar una matriz genérica en términos de infraestructura de datos o desarrollo tecnológico, tal como se muestra en la Figura 38. En este caso, es de vital importancia conocer la situación actual de las empresas que desconocen la recolección y/o tratamiento de datos, o no hacen nada con ellos, además de incentivar el trabajo hacia un desarrollo tecnológico por parte de las empresas que ya realizan acciones de mejora en base a la información generada, o generan modelos para mejorar procesos.

Figura 38: Posicionamiento de la muestra en infraestructura de datos



(Fuente: elaboración propia)

Esta información cruzada sirve como línea base en la elaboración de propuestas más genéricas y por áreas de procesos en materia de transformación digital, información que se detalla en extenso en la sección siguiente. Junto con esto, la implementación de acciones de mejora es clave para lograr proyectos exitosos, y para ello es necesario tomar como punto de partida el estado actual de la empresa a partir de una dimensión del negocio. Así, la combinatoria entre la autoevaluación y el conocimiento del estado actual obtenido a través del cuestionario, puede generar medidas más efectivas.

PARTE 3: MATRIZ DE MADUREZ TECNOLÓGICA Y ACCIONES DE MEJORA

La incorporación de tecnologías digitales es una prioridad para mejorar la productividad y sustentabilidad en la minería, permitiendo minimizar la variabilidad y aumentar la resiliencia de los procesos, viabilizar la minería técnicamente más compleja y con menores leyes de mineral, aumentar aún más la seguridad de las operaciones, y proveer soluciones a los desafíos ambientales que enfrenta el sector. En ese sentido, la elaboración de una propuesta concreta que permita acelerar la incorporación de herramientas digitales en el sector, puede tener impactos positivos importantes en el corto, mediano y largo plazo, y los esfuerzos deben ser abordados a la brevedad, para que las acciones que realicen las empresas obtengan beneficios al menor tiempo.

La tercera parte de este estudio corresponde a la propuesta de matriz de madurez tecnológica elaborada en conjunto por un grupo de investigadores y profesionales de AMTC, que tomó como base la información brindada por los resultados cuantitativos y cualitativos de la sección anterior, así como los principales problemas con que cuentan hoy en día las empresas de pequeña y mediana escala. La matriz, que se explica en detalle en los capítulos siguientes, consiste en una combinación de 4 etapas y 3 dimensiones donde las empresas podrán autoevaluarse en algún cuadrante, en relación a su propia situación, de forma de avanzar de etapa por medio de acciones concretas para cada una de las dimensiones propuestas. Asimismo, tanto la matriz genérica como las acciones de mejora, fueron abordadas para toda la cadena de valor minero, desde exploración a relaves, incluyendo la automatización como un espacio transversal entre las áreas.

XI. Elaboración de la matriz genérica

Un aspecto importante de la transformación digital es que se fundamenta o apoya fuertemente en los datos, en el flujo de estos a lo largo de toda la organización (conectividad) y en su procesamiento para obtener información utilizando técnicas avanzadas como, por ejemplo, el uso de Inteligencia Artificial (IA). Esto permite usar esta información de forma rápida y expedita de manera de tomar decisiones ágilmente.

A partir de los resultados cualitativos y cuantitativos obtenidos del cuestionario realizado a la mediana minería, se dispuso la elaboración de una matriz de madurez de transformación digital, con el fin de caracterizar por medio de etapas y dimensiones un diagnóstico sobre transformación digital en este sector y como también en la minería de pequeña escala, junto con iniciativas concretas que permitan ir mejorando en las distintas etapas y en las distintas dimensiones. Mediante la elaboración y aplicación de esta metodología se busca contribuir a:

- i) Fomentar la innovación.
- ii) Optimizar y mejorar los procesos.
- iii) Mejorar la toma de decisiones utilizando la información disponible.
- iv) Ser ágil para adaptarse a cambios.
- v) Mejorar la experiencia con los clientes.
- vi) Incentivar la creación de nuevos productos o negocios.
- vii) Mejorar la interacción con la sociedad.
- viii) Mejorar el desempeño/rentabilidad de la organización/empresa.

Las etapas corresponden a la trayectoria que realiza la empresa para mejorar las dimensiones del negocio en transformación digital, que parten en un punto con bajo conocimiento, y a través de actividades clave es posible transitar a puntos avanzados o de mejora continua. En relación a las etapas de desarrollo y ejecución, estas se definen a continuación:

- i) Preparación: Existe conciencia sobre el problema y un conocimiento mínimo en base a transformación digital.
- ii) Adopción: Se decide tomar acciones para solucionar los problemas, o se define un plan de trabajo para solucionarlos.
- iii) Implementación: Se desarrollan acciones concretas de soluciones de transformación digital.
- iv) Mejora continua: Se define a nivel corporativo la incorporación continua de herramientas de transformación digital a las diversas dimensiones.

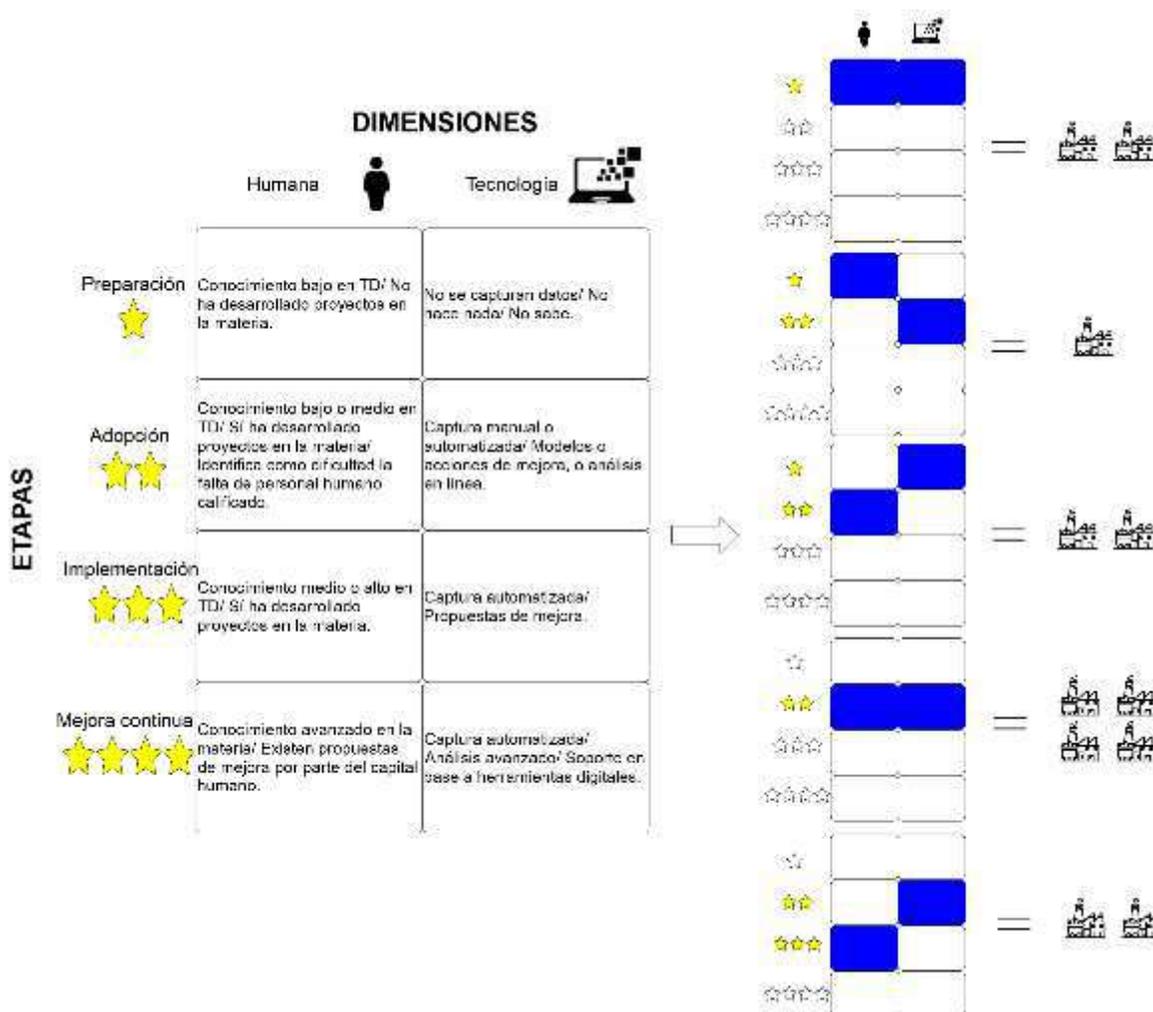
Las dimensiones corresponden a espacios transversales del negocio, donde es posible elaborar propuestas de mejora relacionadas con transformación digital desde etapas tempranas a maduras, a fin de agilizar ciertos procedimientos internos. Las tres dimensiones transversales propuestas son:

- i) Humana: Involucra los aspectos sociales del ser humano en la organización que conforman la cultura organizacional, las capacidades y el nivel de conocimiento de sus miembros, los datos que tienen origen humano dentro de la organización, los datos que se originan del entorno y conforman la interacción con la sociedad y los datos que se originan en los clientes.
- ii) Procesos: La conforman todos los procesos que existen dentro de la organización ya sean informales o formales, desde el más simple hasta los procesos más complejos que permiten tomar decisiones estratégicas y/o de negocio. Entendemos como proceso algo que recibe datos en una entrada y entrega una salida con información o valor para la organización. Los procesos pueden formar cadenas de transformación y/o interactuar con otros procesos que están en otras cadenas de transformación, así, de esta interacción pueden aparecer nuevos datos que a simple vista estaban ocultos y que pueden generar información muy valiosa.
- iii) Tecnología: Involucra a las tecnologías digitales, tales como la captura y generación de datos, la conectividad, la gestión de datos, las políticas de acceso a los datos, las herramientas de *software* y *hardware* para transformar los datos en información, monitoreo y tableros de mando con indicadores de rendimiento y las herramientas de Inteligencia Artificial (IA) que además de ayudar a obtener información no visible ayudan a que la organización sea más ágil ante los cambios y tomar mejores decisiones de negocio.

Se espera que a medida que avancen de etapa, existan ciertos protocolos y/o acciones por medio de herramientas digitales que permita a las empresas mejorar su estado actual en términos de desarrollo tecnológico.

Si la información anterior la adoptamos de forma proximal a los resultados de las Figuras 37 y 38 expuestas en la sección anterior, sería posible esbozar una idea de matriz genérico para las dimensiones humana y tecnología; asimismo, se podrían ubicar las empresas en las combinatorias de esta matriz, en relación a conceptos generales de etapas y dimensiones, tal como se aprecia en la Figura 39.

Figura 39. Aproximación de matriz genérica para empresas encuestadas



(Fuente: elaboración propia)

A partir de la Figura 39, es posible establecer una idea muy genérica acerca del estado actual de las empresas de mediana minería en términos combinatorios de dimensiones humana y tecnología, para las cuatro etapas definidas. Así, las propuestas que se sugieren en la sección XIII, irán en relación directa con las relaciones ya establecidas entre estas dos dimensiones, adicionando además un nuevo elemento de estudio como es la dimensión de procesos. Esta última requiere de mayor información para establecer un proxy de la muestra, lo que se traduce en la elaboración de un nuevo cuestionario que apunte a preguntas específicas de los procesos interoperaciones de cada empresa, así como trabajo en terreno.

De esta forma, matriz genérica propuesta se observa en la Figura 40.

Figura 40: Matriz de madurez genérica

		DIMENSIÓN		
		Humana 	Procesos 	Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	No hay conciencia de que las fuentes humanas (miembros de la organización, el entorno y los clientes) generan datos que pueden ser procesados obteniendo información útil.	Existen procesos informales, y los formales utilizan muy poco la infraestructura digital de la empresa.	No hay conciencia de la importancia de la convergencia de las áreas de las Tecnologías de la Información (TI) y del área encargada de los equipos que monitorean y controlan dispositivos (TO). Tampoco existe una infraestructura digital integrada a lo largo de toda la organización.
	★★ Adopción	Se recolectan datos generados por fuentes humanas pero no de manera integrada a lo largo de toda la empresa.	Se busca que no existan procesos informales, y los procesos formales utilizan o se apoyan en una infraestructura digital.	Se tiene una infraestructura digital que intenta integrar toda la organización.
	★★★ Implementación	Los datos provenientes de fuentes humanas fluyen a lo largo de toda la empresa y son procesados para obtener métricas de rendimiento/amenazas.	Los procesos utilizan o se apoyan en una infraestructura digital integrada a lo largo de organización, se genera monitoreo, alertas y métricas de rendimiento.	Las áreas de TI y TO están fusionadas o altamente coordinadas, existiendo una infraestructura digital implementada a lo largo de la organización, además de métricas para medir rendimiento/alerta.
	★★★★ Mejora continua	Emergen constantemente alertas y propuestas de mejoras para que la organización optimice su relación con las fuentes humanas reaccionando ágilmente a cambios y amenazas.	Se busca interacciones entre distintos procesos a través de datos que obtienen información oculta a simple vista, por medio de herramientas de IA. Las mejoras constantes logran optimizar procesos ante un cambio, apoyándose de soporte digital que genere cambios en la organización.	Se busca optimizar el uso de la infraestructura digital y buscar mejoras ante amenazas. Existe soporte o infraestructura para el uso de herramientas de IA que ayuden en la búsqueda de mejoras.

(Fuente: elaboración propia)

Particularmente, la dimensión de “Procesos” se extendió a la cadena de valor en minería, permitiendo expandir la matriz genérica a las áreas de exploración, caracterización de recursos y reservas, diseño y planificación, operaciones, planta de tratamiento y relaves, trazando además de forma transversal el área de automatización, tal como se observa en la Figura 41.

Figura 41: Procesos de la cadena de valor minera



(Fuente: elaboración propia)

XII. Matrices cuantitativas por proceso de la cadena de valor

A partir de la matriz genérica de transformación digital, se dispuso la elaboración de seis matrices cuantitativas por proceso de la cadena de valor, de forma de esbozar definiciones más específicas que apuntan a cada área, y en virtud de estas, las potenciales propuestas de implementación. Los resúmenes se observan en las Figuras 42, 43, 44, 45, 46 y 47.

Figura 42: Matriz cualitativa para “Exploración”

1. EXPLORACIÓN		DIMENSIÓN		
		1.1. Humana 	1.2. Procesos 	1.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	1.1.1. No existe personal experto. La exploración y levantamiento de recursos se realiza en base a conocimiento por experiencia y oficio, basado en evidencias visibles de mineralización y/o alteración.	1.2.1. Hay procesos informales, con conocimiento básico por experiencia y oficio de características del área de estudio. No se tiene documentación asociada.	1.3.1. No se cuenta con instrumentos y tecnología para la toma de muestras superficiales y mediciones aéreas. El foco está puesto en las herramientas geológicas (brújula, lupa, martillo, etc.).
	★★ Adopción	1.1.2. Existe personal con experiencia y oficio avanzado, con la capacidad de integrar y evaluar información múltiple y generar decisiones progresivas de exploración.	1.2.2. Algunos procesos están formalizados y basados en experiencia, con desarrollo de catas y toma de muestras superficiales para una caracterización básica del área de estudio.	1.3.2. Se cuenta con instrumentos y tecnología básica para la captura de información en la toma de muestras superficiales y mediciones aéreas, así como softwares de mapeo y geofísica.
	★★★ Implementación	1.1.3. Existen competencias básicas para el levantamiento de información geológica y geoquímica, y para la integración y evaluación mediante la construcción de modelos digitales 2D y 3D.	1.2.3. Los procesos más importantes de toma de muestras y análisis están estandarizados. Existe un soporte de software para el almacenamiento de la información.	1.3.3. Se cuenta con instrumentos y tecnología avanzada para la captura de información en la toma de muestras superficiales y mediciones aéreas, software especializado y conexión offline con otros sistemas.
	★★★★ Mejora continua	1.1.4. Existen capacidades avanzadas para el levantamiento, procesamiento, interpretación y modelación de datos, siguiendo estándares de la industria minera tendientes a certificación, con herramientas digitales expertas.	1.2.4. La mayoría de los procesos importantes de toma de muestras y análisis están estandarizados. Existen protocolos de transmisión de datos y una plataforma de software integrada para almacenamiento y análisis.	1.3.4. Se cuenta con instrumentos y tecnología avanzada para la captura de información en la toma de muestras superficiales y mediciones aéreas, software especializado, conexión online con otros sistemas, e información de campañas pasadas como contexto para trabajo en terreno.

(Fuente: elaboración propia)

Figura 43: Matriz cualitativa para “Caracterización de recursos y reservas”

2. CARACTERIZACIÓN DE RECURSOS Y RESERVAS		DIMENSIÓN		
		2.1. Humana 	2.2. Procesos 	2.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	2.1.1. No se cuenta con personal profesional y la caracterización de recursos deficiente o inexistente.	2.2.1. Procesos informales con conocimiento básico por experiencia y/u oficio de las características del yacimiento. Control manual de las variables y tiempos de espera no óptimos.	2.3.1. No se cuenta con instrumentos y tecnología para levantamiento apropiado de recursos y reservas. La toma de muestras y determinación de leyes se realiza para recursos de corto plazo.
	★★ Adopción	2.1.2. No se cuenta con personal profesional, sin embargo, las operaciones se realizan en base a experiencia previa y oficio.	2.2.2. Algunos procesos están formalizados y basados en experiencia con desarrollo de catas y toma de muestras para una caracterización básica de recursos de corto plazo.	2.3.2. Existe maquinaria básica para el desarrollo de trincheras o galerías de exploración y explotación con cata y toma de muestras orientadas a caracterización de recursos de corto plazo.
	★★★ Implementación	2.1.3. Se cuenta con profesionales con competencias medias, tales como memonistas y/o profesionales con 1 o 2 años de experiencia.	2.2.3. Los procesos más importantes de caracterización y evaluación de recursos están formalizados permitiendo una estimación de corto y mediano plazo.	2.3.3. Existe maquinaria y capacidad de perforación para la cata, muestreo y caracterización 3D de cuerpos minerales que permiten la caracterización y evaluación de recursos de corto y mediano plazo.
	★★★★ Mejora continua	2.1.4. Se cuenta con profesionales de más de 3 años de experiencia, o se poseen recursos necesarios para subcontratación de servicios de específicos. Se cuenta con personas certificadas en recursos y reservas mineras, quienes manejan software especializado en un nivel avanzado.	2.2.4. Definición de recursos y reservas de corto a largo plazo logrados con sistema de calidad relacionado con un estándar de caracterización para buscar inversionistas QA/QC. Se usa un sistema de clasificación de recursos y reservas.	2.3.4. Existe maquinaria y capacidad de perforación para la cata, muestreo y caracterización 3D de cuerpos minerales que permiten la caracterización y evaluación de recursos de corto a largo plazo, incluyendo ensayos metalúrgicos y determinación de reservas.

(Fuente: elaboración propia)

Figura 44: Matriz cualitativa para "Diseño y planificación"

3. DISEÑO Y PLAN MINERO		DIMENSIÓN		
		3.1. Humana 	3.2. Procesos 	3.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	3.1.1. No se cuenta con personal con competencias básicas en TIC ni personal para la realización de un diseño y plan minero de explotación.	3.2.1. Procesos informales, con conocimiento básico por experiencia y/u oficio. No se tiene documentación asociada ni plan minero.	3.3.1. No se cuenta con asistencia de software de planificación de actividades, ni planillas de cálculo que se usen de forma manual.
	★★ Adopción	3.1.2. No se cuenta con personal profesional, sin embargo, existen competencias básicas en TIC.	3.2.2. Algunos de los procesos están formalizados y se cuenta con un plan minero básico. Se planifican actividades de explotación asistido por planillas, pero sin software especializado.	3.3.2. Se cuenta con planillas de cálculo que permiten calcular volúmenes de extracción o planificar actividades de forma manual, generando un diseño y plan de explotación básico.
	★★★ Implementación	3.1.3. Se cuenta con profesionales con competencias medias, tales como memoristas y/o profesionales con 1 o 2 años de experiencia en TIC aplicadas al diseño y planificación minera.	3.2.3. Los procesos más importantes están formalizados y son estandarizados. Existe una metodología para generar un diseño minero y plan de explotación asistido por software especializado, pero no está integrada en distintos horizontes temporales.	3.3.3. Se cuenta con software especializado de planificación y/o diseño minero, que permite generar un plan minero que cumpla estándares básicos de operatividad.
	★★★★ Mejora continua	3.1.4. Se cuenta con profesionales experimentados con más de 3 años de experiencia en TIC aplicadas al diseño y planificación minera.	3.2.4. La mayoría de los procesos están formalizados y estandarizados. Existe una metodología integrada de planificación apoyada por sistemas de información que aseguren control de operación y reduzcan riesgo.	3.3.4. Se cuenta con una plataforma integrada y en tiempo real que conecta distintos software especializados de planificación y diseño minero, que permitan generar y actualizar un diseño y plan minero con estándares nacionales e internacionales de auditabilidad.

(Fuente: elaboración propia)

Figura 45: Matriz cualitativa para "Operaciones"

4. OPERACIONES		DIMENSIÓN		
		4.1. Humana 	4.2. Procesos 	4.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	4.1.1. No se cuenta con personal profesional para la implementación del plan minero de explotación, y el desarrollo es artesanal.	4.2.1. Explotación minera es artesanal, sin un plan específico basado en las características de un cuerpo mineral delimitado.	4.3.1. Instrumentos o maquinaria básica para movimientos de tierra que permiten extracción de pequeña escala.
	★★ Adopción	4.1.2. No se cuenta con personal profesional, sin embargo, existe experiencia previa y oficio en el desarrollo de labores de explotación minera.	4.2.1. Existe un plan de extracción con operaciones unitarias básicas, basado en conocimiento previo de oficio en la explotación de recursos minerales, capaz de definir cuerpos minerales y su posible continuidad, y la forma de explotar en forma progresiva, con bajo grado de automatización.	4.3.2. Maquinaria menor para una operación básica de extracción de pequeña minería (<5.000 ton/mes), soportada por una infraestructura TI básica en interconectividad.
	★★★★ Implementación	4.1.3. Se cuenta con profesionales con competencias medias, tales como técnicos y/o ingenieros con 1 o 2 años de experiencia en equipos, explotación minera y procesos, que permiten lograr estándares mínimos de explotación.	4.2.3. Existen operaciones unitarias y auxiliares que siguen un plan de explotación basado en la caracterización de recursos minerales y con una infraestructura mediana, además de un plan minero de estándares mínimos con mediano grado de automatización.	4.3.3. Maquinaria mayor e infraestructura TI parcialmente interconectada para una operación minera de extracción de mediana minería (>5.000 ton/mes), con un diseño y plan minero que cumple estándares básicos de seguridad y viabilidad.
	★★★★★ Mejora continua	4.1.4. Se cuenta con profesionales con más de 3 años de experiencia, o se poseen recursos económicos para la sub-contratación de trabajos de explotación que permitan actividades extractivas (>5.000 ton/mes).	4.2.4. Procesos de explotación integrado, en cumplimiento de estándares de seguridad, eficiencia y viabilidad nacional e internacional, que aseguran una alimentación continua y de largo plazo en planta (integración mina-planta) con alto grado de automatización y continuidad.	4.3.4. Maquinaria mayor e infraestructura TI interconectada para una operación minera de extracción de mediana minería (>15.000 ton/mes), con un diseño y plan minero que cumple estándares nacionales e internacionales de explotación.

(Fuente: elaboración propia)

Figura 46: Matriz cualitativa para "Planta de tratamiento"

5. PLANTA DE TRATAMIENTO		DIMENSIÓN		
		5.1. Humana 	5.2. Procesos 	5.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	5.1.1. No se cuenta con personal profesional disponible para ejecutar y planificar una planta de tratamiento.	5.2.1. El tratamiento del mineral es limitado y los procesos se enfocan en enviar el material a una planta externa.	5.3.1. No hay o hay escasa tecnología de planta disponible.
	★★ Adopción	5.1.2. No se cuenta con personal profesional, sin embargo, se realiza el trabajo en base a experiencia previa y oficio en el procesamiento del material.	5.2.2. Inexistente o escasa planificación de caracterización geometalúrgica, ni capacidad de predicción del comportamiento metalúrgico. El envío a la planta es con escaso muestreo y control, y no hay capacidad de predicción de comportamiento metalúrgico.	5.3.2. Existe una planta de tratamiento que permite extraer un producto de mediana calidad, sin existencia de sensores, softwares o sistemas de control de procesos.
	★★★★ Implementación	5.1.3. Se cuenta con profesionales con competencias medias, tales como memonistas y/o profesionales con 1 o 2 años de experiencia.	5.2.3. Existe un plan de caracterización geometalúrgica regular, pero no los suficientes datos para hacer un trabajo consistente, por lo que el modelo está en desarrollo temprano, con análisis manuales o semi-automáticos que utilizan metodologías en casos puntuales.	5.3.3. Existe una planta de tratamiento que genera un producto de mediana calidad de cobre concentrado o lixiviado. El proceso es controlado con hardware y software, pero la captura de datos no predice su funcionamiento.
	★★★★★ Mejora continua	5.1.4. Se cuenta con personal altamente capacitado, capaz de establecer una caracterización y planificación del material en planta, así como operar, modelar el proceso y realizar un análisis crítico de datos.	5.2.4. Existe un plan de caracterización geometalúrgica regular con abundantes datos, capaz de elaborar modelos de planificación de planta en base a filosofías de operación y control definida. Se toman decisiones por medio de modelos de procesos que se anteponen a fallos.	5.3.4. Existe una planta de tratamiento para la generación de un concentrado y lixiviado y/o cátodo de buena calidad. A través de sensores de captura de datos, la información es utilizada para anteponerse a fallos, programar paradas y controlar la producción y KPIs.

(Fuente: elaboración propia)

Figura 47: Matriz cualitativa para "Relaves"

6. RELAVES		DIMENSIÓN		
		6.1. Humana 	6.2. Procesos 	6.3. Tecnología 
ETAPA	★ Preparación	6.1.1. No se cuenta con personal con formación profesional específica en TI asociada a planificación y operación de depósitos de relaves e infraestructura relacionada.	6.2.1. No hay algoritmos o procesos para el tratamiento o recuperación de agua desde relaves post-flotación. La construcción del depósito cumple con los mínimos exigidos, pero no existe un repositorio digital corporativo para estos efectos ni un registro digital de la información de diseño <i>as built</i> .	6.3.1. Solo se cuenta con software de oficina para el registro de información básica de proceso.
	★★ Adopción	6.1.2. No se cuenta con personal con formación profesional específica en TI, pero se solicita asesoría externa para la implementación de un sistema de gestión de información.	6.2.2. Se decide generar registros de información de proceso, sin un mayor análisis de las causas que produjeron problemas.	6.3.2. Se incorporan sistemas de información y sensores para obtener información de los procesos de recuperación de agua, control de calidad asociada a la construcción de depósitos de relaves y monitoreo geotécnico de muros.
	★★★ Implementación	6.1.3. Se incorporan profesionales con entrenamiento específico en TI, pero con poca experiencia profesional, o bien, solo con experiencia profesional en TI en otras áreas de la misma compañía minera.	6.2.3. Se incorporan procesos específicos que favorecen el uso hídrico eficiente y políticas corporativas de control de calidad asociadas a la construcción del depósito de relaves.	6.3.3. Se diseñan algoritmos para interpretación de la información de instrumentación, los que se integran a los sistemas de registro. Esta información, junto con su interpretación, se empaqueta en software especializado.
	★★★★ Mejora continua	6.1.4. Se cuenta con profesionales con educación formal ad hoc y amplia experiencia en la implementación de sistemas de monitoreo y tecnologías de información asociadas a depósitos de relaves e infraestructura relacionada.	6.2.4. Existen procesos para monitoreo de variables, como generación y manejo de relaves, control de calidad en la construcción, e integración estructural de depósitos. A partir de su procesamiento dinámico, se definen límites de operación, eventos desfavorables y alarmas.	6.3.4. Se implementa una plataforma de monitoreo que integra la lectura de instrumentación en planta y relaves, registro de información y gestión de eventos. Existe capacidad de validar la integridad de la información, procesarla, generar comunicaciones, recomendar acciones y corregir.

(Fuente: elaboración propia)

XIII. Propuestas de mejora tecnológica

A partir de las matrices cuantitativas presentadas en el punto anterior, el grupo de investigadores y profesionales de AMTC elaboraron propuestas y acciones para alcanzar cada etapa descrita, en cada una de las tres dimensiones, y a lo largo de la cadena de valor del proceso minero.

Siguiendo la numeración, desde exploración a relaves y el orden por dimensión, las propuestas se enlistan desde una etapa temprana (una estrella) hasta mejora continua (cuatro estrellas), acompañadas de una o más acciones definidas en términos de desarrollo tecnológico y utilización de herramientas digitales. La información se encuentra en formato de ficha para lograr un mejor entendimiento.

1. Exploración

1.1. Dimensión humana

☆ Acercamiento inicial

Acercamiento a los conceptos de TD y exposición de sus ventajas, a través de la disponibilidad para asistir a diversos talleres.

☆☆ Capacitación

Capacitación del personal en TD, contando con un programa especial de capacitaciones.

☆☆☆ Expertos

Contratación de personal experto en TD, por medio de perfiles y de un programa de *headhunting*.

☆☆☆☆ Mentorías

Mentorías por parte del personal de mayor experiencia a las personas novatas en TD utilizando un programa acorde con el personal disponible.

1.2. Dimensión procesos

☆ Recopilación de datos

Adquisición de datos desde fuentes públicas, tales como SERNAGEOMIN, Landsat o Sentinel.

☆☆ Softwares básicos

Capacitación de personal y adquisición de *softwares* básicos, junto con diseño de protocolos para su uso, tal como Google Earth (más accesible y amigable, además de ser gratuito).

☆☆☆ Softwares especializados y protocolos

Diseño de guías y estándares para la utilización de *software* especializados, además de diseño de protocolos para su uso, gestionados a través de políticas de acceso a lo largo de la organización para modelamiento geofísico (Oasis Montaj), geográfico (ArcGis, QGIS, Target), geológico (Leapfrog, Surpac) y base de datos (AcQuire).

☆☆☆☆ Integración de sistemas

Ejecución de proyectos de TI que integren la TD a actividades de exploración, permitiendo la existencia de indicadores de rendimiento (KPI) para los procesos que son monitoreados por sistemas autónomos, generando correcciones (si es posible) y alertas.

1.3 Dimensión tecnología

☆ Instrumentación básica

Capacitación de personal y adquisición de instrumentación básica, como magnetómetros, gravímetros, brújulas, picas, imanes, rayadores, libretas geológicas, entre otros.

☆☆ Instrumentación avanzada

Capacitación de personal y disposición de instrumentación avanzada, como sensores XRF, XRD, cámaras espectrales, espectrógrafos, drones instrumentados, entre otros.

☆☆☆ Software especializados

Diseño de guías y estándares para las actividades de exploración, a fin de interpretar el trabajo desarrollado por los *softwares* especializados.

☆☆☆☆ Integración de sistemas

Ejecución de proyectos de TI que integren la TD a actividades de exploración, además de inversión en infraestructura tecnológica, implementando la infraestructura adecuada para asegurar la interconexión de sistemas.

2. Caracterización de recursos y reservas

2.1. Dimensión humana

☆ Acercamiento inicial

Acercamiento a los conceptos de TD y exposición de sus ventajas, por medio de desarrollo de talleres de capacitación progresiva.

☆☆ Capacitación

Capacitación del personal en TD, contando con un programa de capacitaciones propio.

☆☆☆ Expertos

Contratación de personal experto en TD, por medio de perfiles y de un programa de *headhunting*.

☆☆☆☆ Mentorías

Mentorías por parte del personal de mayor experiencia a las personas novatas en TD utilizando un programa acorde con el personal disponible.

2.2. Dimensión procesos

☆ Desarrollo de capacidades para el uso de instrumentación y software básico

Capacitación del personal e introducción al uso de instrumentación y software básico.

☆☆ Desarrollo de capacidades para el uso de instrumentación y software avanzado

Capacitación del personal y desarrollo intermedio en el uso de instrumentación avanzada.

☆☆☆ Desarrollo de capacidades para la implementación de software especializado

Elaboración de guías y estándares para las actividades de evaluación de recursos y reservas mineras.

☆☆☆☆ Desarrollo de capacidades para el uso de sistemas con softwares especializados

Diseño y planificación de proyectos de TI integrados con áreas clave, que optimicen procesos de caracterización de recursos y reservas mineras.

2.3 Dimensión tecnología

☆ Adquisición e implementación de instrumentación y software básico

Capacitación del personal y adquisición de instrumentación y software básico (Excel, GIS) para el desarrollo de modelos de recursos de corto plazo, levantamiento de datos sistematizados y acumulativos, e integración en bases de datos.

☆☆ Adquisición de instrumentación y software avanzado

Capacitación del personal y adquisición de instrumentación avanzada para mejorar la capacidad de caracterización y modelación de recursos minerales y posibles reservas (GIS o software de modelación básica).

☆☆☆ Adquisición e implementación de software especializado

Diseño e implementación de guías y estándares para las actividades de evaluación de recursos y reservas mineras, a través de la adquisición de softwares especializados para la modelación geológica y geometalúrgica y para la estimación de recursos y reservas mineras (Leapfrog, Vulcan, Datamine).

☆☆☆☆ Integración de sistemas con softwares especializados

Ejecución de proyectos de TI que integren la TD a actividades de estimación de recursos y reservas mineras, además de inversión en infraestructura tecnológica, asegurando la interconexión de sistemas y el desarrollo de modelos geológicos, geometalúrgicos, de recursos y de reservas de corto y largo plazo.

3. Planificación y diseño

3.1. Dimensión humana

☆☆ Capacitación del personal

Capacitación del personal en Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) a través de cursos dirigidos con énfasis en sus ventajas competitivas, utilizando plataformas de aprendizaje en línea (se cuenta con disponibilidad para asistir a capacitaciones).

Capacitación en herramientas de informática pagadas o gratuitas (MS Office, LibreOffice).

Capacitación en fundamentos de planificación y diseño vía plataformas de aprendizaje en línea, contando con disponibilidad para asistir a capacitaciones.

☆☆ Definición área de planificación

Contratación de personal calificado (interno/externo) en área de TD para diseño y planificación por medio de un sistema de gestión de RRHH externo.

Capacitación en *software* especializado, utilizando el *hardware* apropiado y *software* de planificación/diseño (Whittle, Vulcan, DSIM).

☆☆☆ Ampliación área de planificación

Aumento del equipo profesional experto en área de TD para diseño y planificación por medio de un sistema de gestión de RRHH interno y/o externo.

Capacitación en *software* especializado que integre distintos procesos de planificación, utilizando *hardware* apropiado y *paquetes que agrupan varios softwares* de planificación y diseño (Geovia, Maptek, MineMax).

☆☆☆☆ Capacitación continua y gestión de calidad de área de planificación

Capacitación de manera continua a personal del área formada, por medio de un sistema de gestión de RRHH interno.

3.2. Dimensión procesos

☆☆ Definición de procesos

Definición de procesos prioritarios y formalizados por medio de asesoría experta externa (definición de reserva, método de explotación, operaciones unitarias, secuencia), generando protocolos y estándares de procesos en planificación.

Generación de planillas tipo macro que sirvan de base para asistir la planificación y cuantificación de actividades, utilizando software de ofimática, pagados o gratuitos (MS Office, LibreOffice) junto con *hardware* apropiado.

☆☆ Definición de metodología

Definición de procesos prioritarios y complementarios a distintos alcances (corto, mediano y largo plazo) por medio de asesoría interna y/o externa, generando protocolos y estándares de procesos en planificación

Desarrollo de *benchmarking* de tecnologías de diseño y planificación, encontrando los aspectos más apropiados para cada proceso, mediante *softwares* de empresas proveedoras y presentaciones en reuniones.

Definición de una metodología para generar plan minero (diagrama de flujo, identificación de cuellos de botella, interrelaciones) en base a los procesos individuales, poniendo énfasis en productividad y costos, utilizando *hardware* y *software* para procesamiento, sistema de control y registro de datos.

☆☆☆ Metodología integrada

Generación de metodología integrada y trazable, identificando iteraciones que retroalimentan corto, mediano y largo plazo, por medio de sistemas de control y registro de datos, con actualización constante que retroalimenta al *software* de planificación.

Optimización de procesos individuales para la reducción de costos y mejora de KPI de interés, a través de sistemas de control y gestión, y *softwares* de planificación y diseño que agrupan varios *softwares* en uno.

☆☆☆☆ Planificación robusta y dinámica

Análisis continuo de datos y optimización holística, maximizando valor y control del riesgo de desviaciones de los objetivos de producción. permitiendo generar un sistema ubicuo de control, gestión y registro de datos en una nube, en conjunción con instrumentos en operación (equipos) de captura de datos y comunicación con actualización constante que retroalimenta suite de planificación.

Revisión continua de KPIs (corto, mediano y largo plazo) con asistencia de aprendizaje automático, por medio de *hardware* y *software* que soporten algoritmos de inteligencia artificial.

3.3 Dimensión tecnología

☆ Implementación TI básica

Disposición de equipamiento (*hardware* y *software*) para realizar cálculos en planillas y procesador de texto que permita análisis básico, utilizando *software* de ofimática, pagados o gratuitos (MS Office, LibreOffice) junto con *hardware* apropiado.

☆☆ Implementación TI avanzada

Disposición de equipamiento (*hardware* y *software*) para realizar tareas avanzadas de planificación, utilizando *software* comercial especializado que permita generar planes de producción básicos (Whittle, Vulcan, DSIM) con *hardware* apropiado.

☆☆☆ Implementación TI especializada

Disposición de un sistema de control y registro de datos, con actualización online que retroalimenta *software* de planificación, por medio de una infraestructura TI interconectada (*sensores*, *wireless*).

Disposición de un *software* de planificación y diseño que agrupe varios softwares (Geovia, Maptek, MineMax) junto con *hardware* apropiado.

☆☆☆☆ Implementación TI integrada

Disposición de un sistema de control y aprendizaje automático que incluya variables geo-minero-metalúrgicas que se registran *online* y arrojan actualizaciones del plan minero, generando un sistema ubicuo de control, gestión y registro de datos en una nube, en conjunción con instrumentos en operación (equipos) de captura de datos y comunicación con actualización constante que retroalimenta la suite de planificación, así como *hardware* y *software* que soporten algoritmos de inteligencia artificial y realidad virtual.

4. Operaciones

4.1. Dimensión humana

☆ Profesionalización de personal

Subcontratación de empresa de manejo de información.

Contratación de profesional del área para llevar el control de operaciones.

Contratación de profesional externo para la implementación de operaciones unitarias.

☆☆ Creación unidad de operaciones

Contratación de personal calificado en área de TD de operación.

Definición de un líder de equipo y roles del personal, generando protocolos y estándares de operación.

☆☆☆ Ampliación de unidad de operaciones

Aumento del equipo profesional experto en área de TD de operación,

Contratación de profesionales expertos en gestión de calidad (internos o externos), generando un sistema de gestión de calidad del proceso.

Disposición de un área responsable por la planificación del mantenimiento de los equipos.

☆☆☆☆ Capacitación continua y gestión de calidad de unidad de operaciones

Capacitación de manera continua a personal del área formada, a través de un sistema de gestión de calidad certificado.

4.2. Dimensión procesos

☆ Sistema de gestión de la operación minera básica

Diseño y puesta en marcha de operaciones unitarias no formalizadas, utilizando *softwares* básicos (Excel) y registro de datos, junto con un *hardware* apropiado.

Definición de plan de sensorización crítica y captura de datos de operación con asesoramiento externo para retroalimentación de decisiones de planificación, a

través de equipos de comunicaciones, *hardware* y *software* de captura y análisis de datos.

☆☆ Sistema de gestión de la operación minera intermedia

Diseño de un protocolo de registro de tiempos de ciclo para flota minera, a través de *softwares* de diseño de procesos tipo ERP (*Enterprise Resource Planning*).

Diseño de un plan de registro de utilización de los equipos, por medio de *softwares* de diseño de procesos tipo ERP.

Definición e implementación de un sistema de categorización de recursos mina, que incluya detalle de insumos, mano de obra y recursos asociados a cada operación y sus actividades, desarrollado por *software* básico para control y gestión de *software* de ofimática, pagados o gratuitos (MS Office, LibreOffice), o tipo ERP (SAP, Dashpivot), junto con *hardware* apropiado.

☆☆☆ Sistema de gestión de la operación minera avanzada

Diseño e implementación de un sistema de coordinación y gestión de flota y protocolos de comunicación, por medio de un sistema genérico de gestión de equipos (ERP).

Diseño e implementación de un programa de mantenimiento de equipos, por medio de un sistema genérico de gestión de equipos (ERP).

☆☆☆☆ Mejora continua operaciones mina

Generación de un plan de mejora continua del centro de monitoreo y despacho de equipos, elaborado a partir de un sistema de gestión de flota (Dispatch, Octopus Dispatcher).

Definición y creación de un área responsable del mantenimiento predictivo y de reparación de equipos, por medio de un sistema de gestión y mantenimiento de equipos (MineCare-Modular, Orien).

4.3 Dimensión tecnología

☆ Administración de equipos

Disposición de un registro electrónico basado en planillas electrónicas con información de equipos disponibles, utilización, mantenimiento, ubicación, etc., a partir de *softwares* básicos (Excel) y de registro de datos con *hardware* apropiado.

☆☆ Equipamiento básico para gestión de equipos

Disposición de sistema no autónomo de medición de ubicación, ciclos de los equipos y su mantenimiento, a partir de *softwares* básicos (Excel), de registro de datos, y sistemas de CCTV (Circuito Cerrado de Televisión) u oficina en mirador para poder monitorear el movimiento de la flota, junto a *hardware* apropiado.

☆☆☆ Equipamiento para gestión de equipos

Disposición de un centro de monitoreo y despacho de equipos, a través de un sistema de comunicaciones por radio (análogo o digital) que permita coordinar la flota de equipos (Motorola).

Disposición de sistema semiautónomo de mantención programada, a partir de un sistema de gestión de mantenimiento de equipos.

☆☆☆☆ Mejora continua gestión de equipos

Disposición de un centro automatizado de monitoreo y despacho de equipos en tiempo real, a partir de sistemas de despacho con monitoreo por GPS (o similar) que permita coordinar la flota de equipos.

Disposición de un sistema que permita la planificación del mantenimiento predictivo de equipos basados en IA, por medio de un sistema de gestión de mantenimiento predictivo de equipos de mina y planta con monitoreo en tiempo real que soporten aprendizaje automático.

5. Planta de tratamiento

5.1. Dimensión humana

☆ Profesionalización de personal

Subcontratación de empresa de manejo de información.

Contratación de profesional del área para llevar el control de procesos.

Contratación de profesional externo para el diseño de planta.

☆☆ Creación unidad de procesos

Contratación de personal calificado en área de TD de planta.

Definición de un líder de equipo y roles del personal, generando protocolos y estándares de operación.

☆☆☆ Ampliación de unidad de procesos

Aumento del equipo profesional experto en área de TD.

Contratación de profesionales expertos (externo o interno) en gestión de calidad, generando un sistema de gestión de calidad del proceso.

☆☆☆☆ Capacitación continua y gestión de calidad de unidad de procesos

Capacitación de manera continua a personal del área formada, contando con un sistema de gestión de calidad certificado.

5.2. Dimensión procesos

☆ Diseño planta

Diseño y puesta en marcha de planta de procesos.

☆☆ Implementación de control y planificación planta

Desarrollo de balances de masa de proceso en base a muestreos esporádicos, utilizando *softwares* básicos (Excel) y de registro de datos.

Definición de plan de pruebas geometalúrgicas y pilotaje, utilizando *software* de diseño.

Definición de instrumentos básicos de control.

☆☆☆ Control y planificación avanzados de la planta

Definición de instrumentos avanzados de *software* y sistema control, a través de *hardware* y *software* para sistema de control y registro de datos.

Desarrollo de filosofía de control de proceso, a través de *softwares* sofisticados (MetSim, HSC, JKSImMet).

Desarrollo de un área de planificación para el área de planta.

☆☆☆☆ Optimización continua de la planta

Análisis continuo de datos y optimización de procesos, por medio de un sistema de control y registro de datos en una nube, instrumentos de captura de datos y comunicación con actualización constante.

Revisión de KPI planificación-producción a corto, mediano y largo plazo, utilizando sistemas de control operando con modelo metalúrgico de planta.

5.3 Dimensión tecnología

☆ Construcción planta

Construcción de planta de procesos

☆☆ Equipamiento básico de planta

Disposición de equipos necesarios para realizar un muestreo manual o semiautomático.

Implementación de instrumentos, *software* y sistema control básico, como cortadores de flujos y/o equipos de muestreo.

☆☆☆ Equipamiento y sensorización planta

Disposición de equipos necesarios para realizar un muestreo regular y semiautomático, como cortadores automáticos o flujómetros.

Implementación de instrumentos, *software* y sistema control crítico.

Disposición de un laboratorio metalúrgico para realizar pruebas básicas, a fin de determinar variables críticas a mediano plazo (mensual)

☆☆☆☆ Mejora continua instrumentación planta

Disposición de una actualización regular de instrumentos y *software* mediante cortadores automáticos, flujómetros, medidores de tamaño de partícula, ley y sensores de medición de variables críticas.

Disposición de un laboratorio metalúrgico y químico *in situ* para determinar variables críticas a corto plazo (diario-semanal).

6. Relaves

6.1. Dimensión humana

☆ Capacitación de personal en TI aplicada a sistemas de gestión de relaves

Acercamiento a los conceptos de TI aplicada a gestión de relaves y exposición de las ventajas de su uso.

Inducción en el uso de herramientas de oficina básico o intermedio, contando con un programa de capacitación de personal.

☆☆ Diagnóstico de oportunidades de incorporación de nuevo personal de TI

Identificación de perfiles profesionales requeridos por la compañía minera.

Evaluación técnico-económica de incorporación de personal.

Proceso de selección de personal, por medio de un área de gestión de personas propia.

☆☆☆ Formación de equipo de TI interno para sistemas de registro de información y registro de operación

Contratación de personal especializado en TI, a partir de la creación de un departamento propio.

Evaluación de opciones de capacitación de personal de TI, contando con perfiles profesionales bien definidos y un programa estructurado de reclutamiento.

☆☆☆☆ Consolidación de equipo de TI para el desarrollo, implementación y operación de plataforma de monitoreo de generación, manejo y almacenamiento de relaves

Desarrollo de políticas de seguimiento y evaluación de competencias.

Proceso continuo de capacitación de personal, a partir de la creación de un programa de mejora continua.

6.2. Dimensión procesos

☆ Plan de registro de reportes a la autoridad

Generación de un protocolo de llenado y registro de información básica solicitada por la autoridad, el que incluye actividades de capacitación periódicas asociadas.

☆☆ Establecimiento de sistema de registro de información en proceso de manejo y depósito de relaves

Identificación de los parámetros de control y monitoreo a registrar.

Generación de protocolo de medición y registro interno de los parámetros identificados, el que incluye actividades de capacitación periódicas asociadas.

☆☆☆ Definición de estrategia de manejo eficiente y control de disposición de relaves

Definición de base de datos con información consolidada.

Definición de manual de operación de sistema de disposición de relaves, el cual incluye actividades de capacitación periódicas asociadas.

☆☆☆☆ Definición de sistema de gestión integral de relaves: desde la generación al depósito

Identificación de posibles problemas y medidas correctivas.

Definición de manual de operación, incluyendo eventos y medidas correctivas, alineado con Norma ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001, el cual se encuentra inserto en un programa de mejora continua, con auditorías y actividades de capacitación periódicas asociadas.

6.3 Dimensión tecnología

☆ Formatos para registro de información requeridos por la autoridad

Definición de estructuras de formatos.

Generación de formularios digitales para el registro de información utilizando herramientas ofimáticas.

☆☆ Implementación de servidor y herramientas básicas para el registro de información

Instalación de instrumentación básica y sistema de adquisición de datos para el monitoreo de variables, a partir de instrumentación y procedimientos manuales de levantamiento de información, según corresponda.

Desarrollo de base de datos relacional para el registro de información, a partir de un servidor con base de datos centralizada.

☆☆☆ Sistema de monitoreo de relaves

Desarrollo de algoritmos de procesamiento de información desde sensores, de acuerdo con el rango de operación definido en el manual.

Implementación y validación de herramienta de gestión para régimen de operación normal.

Instalación de sistemas inalámbricos de comunicación de datos de sensores.

☆☆☆☆ Herramienta integral de gestión

Implementación y validación de sistema de monitoreo integral, incluyendo alarmas y acciones correctivas en caso de eventos desfavorables u otros problemas operacionales, por medio de una plataforma digital auditable que integre información de todas las posibles variables de control del depósito, que sea capaz de presentar información, que permita establecer y comunicar su estado operacional en relación con los umbrales de operación segura y que provea de una base de datos de proceso.

CONCLUSIONES

La mediana y pequeña minería juegan un rol preponderante en la industria minera nacional, generando un importante dinamismo a la economía de la I, II, III, IV y V región del país, principalmente. La participación relativa de estos sectores en términos de producción ha venido disminuyendo en los últimos años, por lo cual la transformación digital puede contribuir a mejorar sus procesos mineros y con ello su competitividad, ya sea incorporando propuestas digitales en su cartera de proyectos de inversión, o bien, proponiendo metodologías más ágiles en sus procesos con fin de lograr una integración en toda la organización.

El sector posee una alta heterogeneidad respecto al conocimiento, capacidades y grado de adopción de herramientas y tecnologías de transformación digital. Los resultados analizados en este estudio a través de información proporcionada por empresas de la mediana minería permitieron generar una primera aproximación respecto al conocimiento y desempeño sobre transformación digital en el sector, así como el estado de la infraestructura de red de datos, información que sirvió de base para elaborar propuestas más concretas que permitan integrar las áreas internas y externas de las compañías. Asimismo, esta información podría adaptarse a pequeña minería, entendiendo las brechas que existen entre distintos sectores mineros.

La matriz de madurez tecnológica propuesta en el estudio permite a cada empresa poder autoevaluarse respecto de la etapa de madurez de TD en que se encuentra y generar una estrategia de mejora, conociendo cuales son los recursos que debe disponer. La ejecución de estas propuestas en una o varias áreas de la cadena de valor minero dependerá del interés de cada empresa en la implementación de la TD, permitiendo generar proyectos y/o iniciativas colaborativas de mejora en el corto, mediano y largo plazo. En relación a las empresas encuestadas, es posible reconocer, de forma preliminar, un estado genérico para las dimensiones estudiadas, tales como:

- A nivel humano, al menos 6 empresas podrían ubicarse en una etapa de adopción, lo que si bien se podría traducir como un bajo nivel de conocimiento en materia de transformación digital y se identifica como principal dificultad la falta de recurso humano calificado, existe un esfuerzo reflejado en la implementación de proyectos, siendo más fácil la incorporación de herramientas tecnológicas por medio de capacitaciones.
- A nivel de procesos, si bien la información es heterogénea, es posible apuntar los esfuerzos a ciertas áreas críticas como planificación y planta para aquellos grupos que han desarrollado proyectos de transformación digital, y caracterización y operaciones para aquellos que no. La identificación de la muestra en esta dimensión requiere de un trabajo más

exhaustivo en terreno con cada una de las empresas que complemente la información recogida en el cuestionario.

- A nivel de tecnologías, al menos 5 empresas podrían ubicarse en una etapa de adopción, lo que significa, ahondar en la arquitectura de la data con que trabajan y lograr un cambio organizacional de metodologías manuales a automatizadas, a través de propuestas de mejora robustas que permitan análisis más expeditos.

Una forma de acelerar el proceso de adopción de herramientas digitales, especialmente en mediana minería, puede ser mediante el trabajo colaborativo entre las empresas asociadas a SONAMI con Universidades y Centros de I+D, instancia donde se pueden compartir resultados de los proyectos de TD y lecciones aprendidas que faciliten su adopción, esto con el objetivo de desarrollar iniciativas concretas que agilicen ciertos procesos clave dentro de las organizaciones. Otro papel relevante lo puede ejercer ENAMI, en particular, por su apoyo a la pequeña minería mediante su política de fomento, permitiendo la incorporación de TD en etapas de exploración y caracterización mineral.

Equipo de Trabajo

El estudio “Transformación digital en la mediana y pequeña minería chilena” fue desarrollado por el Advanced Mining Technology Center de la Universidad de Chile, por un equipo de investigadores y profesionales que integran este Centro de Investigación Aplicada en minería.

Equipo de Investigadores:

Javier Ruiz del Solar
Christian Ihle
Diana Comte
Humberto Estay
Brian Townley
Pía Lois
Enrique Jélvez
Mauricio Correa
Fabián Soto
Mauricio Mascaró
Karina Monsalve
Samuel Rojas

Equipo de Profesionales:

Rodrigo Cortés
Gabriela Novoa
Claudio Baeza
Victoria Villarroel
Antonio Quilaqueo
Rodrigo de la Paz

ANEXOS

A.1. Información de las empresas mineras encuestadas

Del total de 42 compañías que componen actualmente la industria de la mediana minería, 11 de ellas proporcionaron información, respondiendo el cuestionario en torno a proyectos de transformación digital y digitalización, señalando el estado actual de cada una. En general, estas entidades de mediana escala llevan en promedio más de 25 años de operación en el rubro, y el rango de trabajadores tanto en faena como en operación, oscila entre 90 y 1.400 personas. Las encuestas fueron contestadas en su mayoría por profesionales de TI e informática, aunque también contó con la información proporcionada por gerentes generales y personal de administración y finanzas. El resumen se refleja en la Tabla 9.

Tabla 9: Razón social de mineras, responsable y cargo

Razón social	Nombre	Responsable encuesta	Cargo
Inversiones Alxar S.A.	Alxar	Erwin Kaufmann Salinas	Gerente general
Sociedad Contractual Minera Atacama Kozan	Atacama Kozan	Manuel Muñoz Cruz	Encargado del Departamento de Informática
Compañía Minera Carmen Bajo Ltda.	Carmen Bajo	Mario Valdés Braun	Gerente general
Sociedad Contractual Minera Carola	Carola	Richard Ochoa Sánchez	Superintendente de gestión, planificación estratégica e inversiones
CEMIN Holding Minero	CEMIN	Rodolfo Torres-Rabello	Líder de proyectos e innovación
Compañía Minera Cerro Negro S.A.	Cerro Negro	Maritza Baeza Cervela	Gerente de sustentabilidad
Minera Cruz Ltda.	Cruz	Rodrigo Sepúlveda Ugalde	Gerente de administración y finanzas
Haldeman Mining Company S.A.	Haldeman	Mauricio Silva Meza	Jefe corporativo de tecnologías de información
Minera Valle Central S.A.	MVC	Luis Martínez Maira	Jefe de TI
Sociedad Punta del Cobre S.A.	Pucobre	Sebastián Ríos Rivas	Gerente general
Compañía Explotadora Minera San Andrés Ltda.	San Andrés	Bernardo Mellibosky Grau	Gerente de adquisiciones

A.2. Estructura del cuestionario

El cuestionario se separó en cinco categorías, las que se detallan a continuación con cada sub-pregunta:

1. Información de las mineras encuestadas:
 - a. Correo electrónico.
 - b. Nombre.
 - c. Cargo.
 - d. Empresa.

2. Producción de cobre, plata, hierro y oro:
 - a. Volumen de cobre.
 - b. Volumen de oro.
 - c. Volumen de hierro.
 - d. Volumen de plata.
 - e. Otros.

3. Faenas:
 - a. N° de faenas (nombre, ubicación) y tipo de faena (rajo abierto, subterránea).
 - b. Cantidad de trabajadores.
 - c. Tipo de proceso (electro-obtención, flotación).
 - d. Años de operación.

4. Minería 4.0 y transformación digital:
 - a. ¿Cómo evaluaría usted el nivel de conocimiento del concepto "minería 4.0" o "transformación digital" en su organización?
 - b. ¿Qué aspectos internos de la empresa cree fundamentales para que su organización, efectivamente, pueda incorporar las tecnologías o herramientas digitales a sus procesos productivos y de apoyo logístico? Responda según nivel de importancia, definiendo un *ranking* en escala de 1 a 4, a partir de las siguientes opciones, siendo 1 el aspecto más importante y 4 el menos importante.
 - i. Recursos financieros.
 - ii. Recursos humanos.
 - iii. Incorporar las tecnologías como parte del negocio.
 - iv. Derribar barreras culturales.
 - c. ¿Qué aspectos externos de la empresa cree fundamentales para que su organización, efectivamente, pueda incorporar las tecnologías o herramientas digitales a sus procesos productivos y de apoyo logístico? Responda según nivel de importancia, definiendo un

- ranking* en escala de 1 a 6, a partir de las siguientes opciones, siendo 1 el aspecto más importante y 6 el menos importante.
- i. Soluciones a costos competitivos
 - ii. Soluciones escalables
 - iii. Mayor conocimiento de los proveedores sobre el negocio minero
 - iv. Programas de apoyo del Gobierno
 - v. Subsidios
 - vi. Apoyo de universidades y centros de I+D
- d. Cuáles de los siguientes ámbitos tecnológicos cree relevante abordar en su empresa mediante proyectos de transformación digital. Marque las 3 alternativas:
- i. Automatización
 - ii. Centros de operaciones remotas
 - iii. Ciberseguridad
 - iv. *Edge computing*
 - v. Integración TI/TO
 - vi. Servicios *wireless*
 - vii. Trabajo a distancia
- e. Cuáles de las siguientes áreas cree importante trabajar en un proyecto de digitalización. Marque las 3 alternativas más relevantes:
- i. Automatización de perforación / acarreo
 - ii. Digitalización de la Oficina de Despacho
 - iii. Monitoreo de dispositivos
 - iv. Optimización de la fuerza laboral
 - v. Seguridad de la fuerza laboral
 - vi. Seguridad de los datos
- f. En su empresa, ¿se ha desarrollado algún proyecto de transformación digital en los últimos dos años? (automatización, robótica, *big data*, inteligencia artificial, etc.).
- i. Si la respuesta es sí:
 1. ¿Qué porcentaje del presupuesto se asigna anualmente para la ejecución de proyectos relacionados con la implementación de soluciones o tecnologías digitales?:
 - 1) Menor a 1%
 - 2) Entre 1% y 5%
 - 3) Entre 5% y 10%
 - 4) Mayor a 10%
 2. ¿En qué ámbito o área de proceso se ha implementado?:
 - 1) Administración

- 2) Geología
 - 3) Gestión de la información
 - 4) Gestión de seguridad
 - 5) Logística
 - 6) Mina
 - 7) Ore-pass
 - 8) Planta
 - 9) Proceso de selección de mineral
 - 10) Recursos humanos
 - 11) Sala de control remota
 - 12) SAP Business One
 - 13) Tronadura
3. ¿Qué tipo de solución o herramienta digital se utilizó?:
 - 1) Analítica avanzada
 - 2) Digitalización bodegas
 - 3) Equipos autónomos
 - 4) Internet de las cosas
 - 5) Sensometría
 - 6) Software a medida
 4. ¿Cuál ha sido el o los beneficios obtenidos al incorporar herramientas digitales?:
 - 1) Aumento de productividad
 - 2) Aumento de seguridad
 - 3) Control de riesgos
 - 4) Disminución de costos
 - 5) En etapa de prueba industrial
 5. ¿Cuáles fueron las principales dificultades que debieron enfrentar? Marque las 3 alternativas que considere más relevantes:
 - 1) Bajo nivel de confianza en las tecnologías
 - 2) Barreras culturales
 - 3) Dificultad en la obtención de permisos sectoriales y ambientales
 - 4) Falta de conocimiento de las tecnologías
 - 5) Financiamiento
 - 6) Infraestructura de apoyo insuficiente (redes, conectividad, entre otros)
 - 7) Recurso humano no calificado
 - 8) Sincronizar con el cierre de mina rajo

ii. Si la respuesta es no:

1. ¿Cuáles son las razones o factores más relevantes que explicarían no haber desarrollado aún proyectos de transformación digital en su organización?:
 - 1) Disponibilidad de capital humano
 - 2) Disponibilidad de recursos financieros
 - 3) Falta de información y comprensión
 - 4) No es prioridad
 - 5) No se perciben beneficios
 - 6) Partiendo recién con operaciones
2. Mencione áreas en "Mina" donde implementaría este tipo de proyectos.
3. Mencione áreas en "Planta" donde implementaría este tipo de proyectos.
4. Mencione áreas en "Servicios de apoyo a faena" donde implementaría este tipo de proyectos.
5. ¿Con qué propósito asignaría recursos para la ejecución de proyectos de transformación digital en su empresa?

5. Infraestructura de redes de datos y conectividad.

- a. ¿Qué tipo de red de datos existen en la faena minera de su empresa?
- b. ¿Qué tipo de enlace hay entre las faenas y la oficina administrativa principal?
- c. ¿Cómo realiza la captura de datos en sus operaciones?
- d. Los datos generados por equipos y sensores ¿cómo se recolectan para su procesamiento?
- e. ¿Qué se hace con los datos generados por equipos sensores?
- f. Para almacenar los datos históricos de equipos y sensores u otro tipo de datos, ¿qué utiliza?
- g. Si almacenan los datos, por cuánto tiempo se almacenan los datos históricos.
- h. *Softwares* utilizados:
 - i. En gestión (por ejemplo, ERP)
 - ii. En evaluación de yacimientos.
 - iii. En diseño minero.
 - iv. En planificación minera.
 - v. Otros.
- i. En su empresa cuentan con profesionales que poseen conocimientos o se desempeñan en:
 - i. Profesional que posee conocimiento en.
 - ii. Profesional que se desempeña en.

REFERENCIAS

AChEE (2018). Eficiencia Energética en la Estrategia: Identificando oportunidades de valor. Gobierno de Chile.

Arenas, Ana (2019). Transformación digital real de la mano de Dell Technologies. InfoChannel.

AWS (2017). *Digital transformation checklist - Using technology to break down innovation barriers in Government*. Amazon Web Services, Inc.

Boulton, Clint (2021). *What is digital transformation? A necessary disruption*. CIO.

CITRIX (2021). *What is digital transformation?*

<https://www.citrix.com/solutions/digital-workspace/what-is-digital-transformation.html>

COCHILCO (2017). Monitoreo de variables e indicadores relevantes de la mediana minería chilena. Gobierno de Chile.

COCHILCO (2018). Encuesta de Capital Humano y Gastos en la Mediana Minería. Gobierno de Chile.

COCHILCO (2019). Proyección de la producción de cobre en Chile 2019-2030. Gobierno de Chile.

COCHILCO (2020). Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2020 – 2029. Gobierno de Chile.

Dell Technologies (2021). Índice de transformación digital.

<https://www.delltechnologies.com/es-cl/perspectives/digital-transformation-index.htm>

Deloitte (2021). *Digital transformation*.

<https://www2.deloitte.com/us/en/insights/topics/digital-transformation.html>

Duro, Sonia (2021). ¿Qué es la transformación digital y cuáles son las fases de la digitalización de una empresa? El Blog de José Facchin.

ENAMI (2020). Memoria Anual y Estados Financieros 2019. Directorio ENAMI.

Gandhi, Prashant; Khanna, Somesh; Ramaswamy, Sree (2016). *Which industries are the most digital (and why)*. Harvard Business Review.

Gartner® (2021). *Digital transformation*.

<https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/digital-transformation>

Google Cloud (2021). ¿Qué es la transformación digital?
<https://cloud.google.com/learn/what-is-digital-transformation?hl=es>

Hewlett Packard Enterprise (2021). *What is digital transformation?*
<https://www.hpe.com/us/en/what-is/digital-transformation.html>

IBM (2021). *What is digital transformation?*
<https://www.ibm.com/topics/digital-transformation>

INGEMINA (2017). Evaluación del programa de fomento de la pequeña y mediana minería de la empresa nacional de minería, ENAMI. DIPRES.

McKinsey & Company (2021). *Unlocking success in digital transformations.*
<https://www.mckinsey.com/business-functions/organization/our-insights/unlocking-success-in-digital-transformations#>

Ministerio de Minería (2017). Estudio de caracterización regional de la pequeña minería - Programa de capacitación y transferencia tecnológica para la pequeña minería artesanal (PAMMA). Gobierno de Chile.

MIT Sloan Management Review (2021). *Digital transformation.*
<https://sloanreview.mit.edu/tag/digital-transformation/>

PMG Business Improvement (2021). Índice de transformación digital de Empresas Proveedoras de la Minería. Corporación Alta Ley.

Pratt, Mary K.; Sparapani, Jason (2021). *What is digital transformation?* TechTarget.

PwC (2021). *Digital transformation.*
<https://www.pwc.com/th/en/consulting/digital-transformation.html>

Red Hat (2021). *What is digital transformation?*
<https://www.redhat.com/en/topics/digital-transformation/what-is-digital-transformation>

Salesforce (2021). *What is digital transformation?*
<https://www.salesforce.com/in/products/platform/what-is-digital-transformation/>

SERNAGEOMIN (2020). Anuario de la Minería de Chile. Gobierno de Chile

Tabrizi, Behnam; Lam, Ed; Girard, Kirk; Irvin, Vernon (2019). *Digital transformation Is not about technology.* Harvard Business Review.

The Enterprisers Project (2021). *What is digital transformation?*
<https://enterpriseproject.com/what-is-digital-transformation>

Toro, Ramón (2021). ¿Qué es transformación digital y qué empresas lo necesitan? Fractal.

VMware (2021). *Accelerating digital transformation*.
<https://www.vmware.com/company/vmwonecloud.html>

Young, Aaron; Rogers, Pratt (2019). *A review of digital transformation in mining*. Mining, Metallurgy & Exploration, 36(4), 683-699.