

INDUSTRIA 4.0 EN LA MINERÍA MEXICANA

Industry 4.0 in Mexican mining

RUTH ROBLES*

GUILLERMO FOLADORI**

ÉDGAR ZÁYAGO LAU***

RESUMEN

El artículo reseña los últimos avances tecnológicos en la minería mexicana y las implicaciones socioeconómicas y ambientales. Las grandes empresas mineras han automatizado algunas actividades; la tendencia ahora es hacia la colocación de servicios de telecomunicaciones en todos los espacios para digitalizar, integrar, automatizar y controlar el proceso minero. Estos avances muestran una inversión constante en equipo, un fuerte proceso de concentración y centralización del capital, una tendencia a la reducción del empleo y un relegamiento en la mejora de las condiciones laborales y ambientales.

PALABRAS CLAVES: MINERÍA, HIDROMETALURGIA, MÉXICO, INDUSTRIA 4.0, CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN.

* Universidad Autónoma de Zacatecas. Correo electrónico: ruthberumen@yahoo.com.mx

** Universidad Autónoma de Zacatecas. Correo electrónico: gfoladori@gmail.com

*** Universidad Autónoma de Zacatecas. Correo electrónico: zayagolau@gmail.com

ABSTRACT

The article reviews the latest technological advances in Mexican mining and its socio-economic and environmental implications. The large mining companies have automated some activities, the trend now is the placement of telecommunications services in all areas to digitize, integrate, automate and control the entire mining process. These advances show a constant investment in equipment, a strong process of concentration and centralization of capital, a tendency to reduce employment and a relegation in the improvement of working and environmental conditions.

KEYWORDS: MINING, HYDROMETALLURGY, MEXICO, INDUSTRY 4.0, CONTROL AND AUTOMATION.

Recepción: 3 de abril de 2019.

Dictamen 1: 23 de octubre de 2019.

Dictamen 2: 27 de octubre de 2019.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21696/rcls102120201167>

INTRODUCCIÓN

El presente artículo muestra los avances en industria 4.0 en la minería hidrometálica de México y las tendencias principales que se infieren. Esta investigación es importante porque no existen trabajos documentales al respecto y porque se trata de una nueva revolución tecnológica, que se está expandiendo a todas las ramas industriales, incluyendo la minería en México.

El artículo está estructurado en seis apartados. En el segundo apartado, luego de esta introducción, se presenta la metodología seguida para la recopilación y el análisis de la información. El tercer apartado se refiere a los sistemas de control y automatización, el corazón de la industria 4.0 en la minería. El cuarto apartado da cuenta de los avances tecnológicos en el caso mexicano, un aspecto poco tratado en los análisis socioeconómicos. El quinto apartado versa sobre las principales implicaciones y tendencias socioeconómicas y ambientales que pueden, razonablemente, derivarse de las aplicaciones tecnológicas analizadas en las secciones anteriores. En este apartado se destacan tres ítems que corresponden a las dimensiones más relevantes de los nuevos avances tecnológicos en la minería: la concentración y centralización del capital, las implicaciones laborales y las incidencias ambientales. El artículo termina con las conclusiones destacadas.

METODOLOGÍA

Información internacional muestra que la minería ha tenido importantes avances tecnológicos en las últimas décadas. Algunas referencias bibliográficas relevantes sobre este tema fueron sistematizadas y referidas. Lo trascendente no es el avance tecnológico en sí, un aspecto siempre presente en el capitalismo, sino el hecho de que la cuarta revolución industrial, llamada industria 4.0, no implica el control de procesos parciales, sino de todas las fases del proceso productivo. Hasta el siglo pasado, etapas parciales del proceso eran automatizadas de manera independiente; ahora, gracias al avance en la micro y la nano tecnologías electrónicas de comunicación, es posible sincronizar integralmente todo el proceso para llegar a ser controlado de manera autónoma. Esto es una novedad de la industria 4.0, un aspecto poco estudiado.

Este artículo puede ser el primer referente documentado sobre el tema; por esta razón, en el apartado cuatro se incorpora un análisis mayormente descriptivo, de

manera que el lector, a través de ejemplos, pueda interiorizar la trayectoria de los nuevos avances tecnológicos. Como no existen bancos de datos sobre el tema, la información se recolectó de variadas fuentes de información. Sucintamente, estas fueron: bibliografía sobre los avances en el mundo de la industria 4.0; entrevistas con proveedores de tecnologías en eventos como la Reunión Internacional de Minería (2018) y la Convención Internacional de Minería (2017); visitas a minas como la Minera Frisco Unidad Minera El Coronel, la Compañía Minera Sabinas y la Minera Peñasquito; entrevistas con personal operativo de la minería, con afectados por la minería y con personal del Servicio Geológico Mexicano (SGM) y de la Dirección General de Minas (DGM); intercambio de información en congresos y seminarios como en el Primer Diplomado de Operaciones Mineras (2017), efectuado en Universidad Autónoma de Zacatecas, y el XXVII Congreso Internacional de Metalurgia Extractiva. La consolidación de esta información fue clave para analizar y entender los nuevos avances de la minería en México.¹

En los apartados cinco y seis se desarrolla un examen más analítico que descriptivo. Para ello, se procesó información estadística y se consideraron algunos supuestos que son de consenso en la literatura especializada. El primer ítem, concentración y centralización del capital, por sí mismo menciona que el desarrollo capitalista encierra una tendencia intrínseca a tales efectos. Esto fue tempranamente analizado por Marx en el tomo III de *El Capital* y fue confirmado por las estadísticas económicas actuales y la legislación tendiente a restringir los oligopolios. Basta con mencionar que en México la gran minería produce 96 y 97 por ciento de la plata y del oro, respectivamente (SGM, 2019, p. 20). Más aún, si se analiza la tecnología utilizada en la minería de México, se observa una dependencia tecnológica con el extranjero. Aunque este es un efecto indirecto de la concentración del capital, el estudio de la dependencia tecnológica es clave para entender el desarrollo de un país. La enunciación de este escenario da pie a la necesidad de realizar estudios con mayor profundidad sobre el tema.

El segundo ítem trata de los efectos del avance tecnológico sobre la fuerza de trabajo. En este punto, el supuesto es que el desarrollo tecnológico implica un aumento del desempleo. Esta relación entre tecnología y empleo es un tema que siempre ha estado presente en la historia del pensamiento económico. El auge de las políticas neoliberales y de la globalización ha puesto en evidencia la correlación entre desarrollo tecnológico y desempleo. El World Economic Forum reconoció esta

¹ Por razones de confidencialidad, no se publican los nombres del personal operativo entrevistado.

situación desde 2017, en particular para la minería (2017, pp. 4 y 12); también los sindicatos mineros han puesto en discusión este punto. El hecho de que el artículo hable acerca de las implicaciones potenciales de los nuevos avances tecnológicos en el desempleo y en la descalificación de la fuerza de trabajo también da pie para futuras investigaciones.

El último ítem, que corresponde a las incidencias sobre el ambiente, muestra los alcances de los nuevos avances tecnológicos sobre el ambiente y manifiesta la razón por la cual la minería sigue siendo objeto de enfrentamientos sociales y ambientales a pesar de los nuevos desarrollos tecnológicos.

LOS SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN

Las tres revoluciones industriales por las que ha transitado el ser humano (vapor, electricidad, electrónica y tecnologías de la información) y una cuarta aún en desarrollo (industria 4.0) han trascendido a todos los sectores industriales, incluyendo la minería. En México, los avances tecnológicos de la primera revolución industrial se consolidaron a principios del Porfiriato (1876-1911), después de su término en el Reino de Gran Bretaña (1760-1840). Una referencia importante de este acontecimiento ocurrió en 1884, cuando por primera vez el carbón se explotó en el ámbito comercial en el estado de Coahuila. En un primer momento, este material se utilizó para fundir cobre en las minas de Pánuco, Coahuila; posteriormente se usó como combustible de los motores empleados en el arrastre de los ferrocarriles (Corona Esquivel, *et al.*, 2006, p. 141).

La segunda revolución industrial, acaecida a mediados del siglo XIX y principios del siglo XIX, se caracterizó por el uso industrial de la electricidad y los derivados del petróleo. Esta nueva revolución también se gestó durante el Porfiriato, cuando se electrificaron las primeras minas (Sariego, *et al.*, 1988, p. 38). Más tarde, durante los años cincuenta, se inició la introducción de maquinaria electromecánica y diésel y, con ello, la explotación de reservas minerales de baja ley y la sustitución progresiva del trabajo manual (Sariego *et al.*, 1988, pp. 11 y 320).

A diferencia de las dos primeras revoluciones industriales, que solo introdujeron algunos elementos tecnológicos, como fue la máquina de vapor, la electricidad, los hidrocarburos o la producción en línea, en las dos últimas revoluciones industriales se han desarrollado múltiples elementos tecnológicos, que, en conjunto, han permitido la digitalización, el control y la automatización de los procesos.

La tercera revolución industrial, iniciada en la década de los setenta, fue liderada por la aplicación de la electrónica y las tecnologías de la información. Esta revolución trajo consigo una mayor automatización de la maquinaria y del equipo, así como el inicio de la digitalización de los procesos industriales. Esta última actividad aún continúa avanzando. Hay quienes opinan será la que dirigirá la transformación de los diversos sectores industriales durante la cuarta revolución industrial. La digitalización, definida como la convergencia del mundo real con el virtual (Kagermann, 2015, pp. 23 y 32), recrea virtualmente todo el ciclo de vida de un producto o servicio, desde su planificación hasta su comercialización. En particular, el mundo virtual es un espacio donde se toman decisiones para luego llevarlas al mundo físico.

La cuarta revolución industrial, más conocida como industria 4.0, fue nombrada así por primera vez en 2011, en la feria de Hannover, Alemania (Vogel-Heuser y Hess, 2016, p. 411). En esta nueva era, los cambios en los sistemas productivos son impulsados por la conjunción de las tecnologías de la información con los elementos operativos de un proceso (Lasi *et al.*, 2014, p. 241). Entre las tecnologías que han desencadenado estos nuevos cambios se encuentran el internet de las cosas (IoT, por sus siglas en inglés), los sistemas ciberfísicos (CPS, por sus siglas en inglés), la computación en la nube, la inteligencia de datos *big data*, la comunicación máquina a máquina (M2M, por sus siglas en inglés), la robótica, la identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas en inglés) (Almada-Lobo, 2015, p. 17). Asimismo, en el núcleo de la industria 4.0 se encuentran los sensores, dispositivos que son cada vez más eficientes a consecuencia del desarrollo de los nanomateriales (Critchley, 2019).

La aplicación de las tecnologías industria 4.0 en los procesos industriales facilitó que los sistemas de control y automatización evolucionaran y dejaran de ser considerados solo como tecnología operacional (Boyes, *et al.*, 2018, p. 1). A finales de los noventa, su arquitectura aislada se interconectó con redes corporativas e internet (European Union Agency for Network and Information Security, 2018). En la actualidad, proporcionan información en tiempo real de todo el proceso, lo que permite dirigirlo con eficiencia y, con ello, incrementar la productividad de este. La inclusión de plataformas de control interactivas en estos sistemas ha posibilitado la gestión de diversas actividades productivas (Barraguer, 2016, p. 40). Un sistema de control y automatización en la minería que ha adoptado nuevas tecnologías se integra básicamente por tres capas, como se sintetiza en el cuadro 1.

**CUADRO 1. ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INTELIGENTE PARA UN PROCESO MINERO**

Capas	Elementos
Capa 3 de control	Plataforma de programación y control de las operaciones inteligentes
Capa 2 de comunicación	Sistema ubicuo de adquisición de la información-sistema de comunicación inalámbrica
Capa 1 de operación	Equipo inteligente: perforadoras de roca o jumbos, perforadoras DTH, rezagadores, cargadores y camiones de carga

Fuente: adaptado de Li y Zhan (2018, p. 383).

La primera capa, llamada operativa, se compone de equipos mineros inteligentes, como perforadoras de roca o jumbos, perforadoras DTH, rezagadores, cargadores y camiones de carga. La segunda capa, llamada de comunicación, está constituida básicamente por un sistema ubicuo de adquisición de la información, un sistema de comunicación inalámbrica y un sistema de posicionamiento preciso y de navegación inteligente. Finalmente, la capa de control está integrada por una plataforma responsable de la programación y el control inteligente de todo el proceso minero. Este es el núcleo de todo el sistema. Todas las operaciones inteligentes del proceso minero se transmiten de esta plataforma a todos los equipos de la capa uno pasando por la capa dos (Li y Zhan, 2018, pp. 382-383).

AVANCES TECNOLÓGICOS EN LA MINERÍA DE MÉXICO

El desarrollo de una mina totalmente automatizada y controlada implica una serie de etapas, las cuales inician con la instalación de la infraestructura de telecomunicaciones en todos los espacios de las minas subterráneas y a cielo abierto, como el cableado estructurado, la fibra óptica, los cuartos de control, los enlaces inalámbricos, las redes wifi, los equipos de telefonía, los servidores, los dispositivos para la expansión de la señal de celular, los nodos de comunicación móvil, el circuito cerrado de televisión, el control de acceso, la detección y supresión de incendios y la radiocomunicación. El objetivo de la instalación de esta infraestructura es ofrecer servicios de telecomunicaciones, como radiocomunicación digital, telefonía a través de internet, video, sistemas de RFID, señal de celular y conectividad inalámbrica wifi (Lasec, 2018).

Luego continúa la digitalización del proceso minero y la integración de todos los sistemas que lo conforman, es decir, la creación de copias virtuales en tiempo real de cada una de las actividades mineras, a través de la información proporcionada por sensores o dispositivos electrónicos ubicados en equipos, máquinas, vehículos, personas, etcétera. Entre los sistemas que se pretende digitalizar e integrar se encuentran los sistemas de localización y rastreo, los sistemas de evacuación, los sistemas anticolisión, las geocercas, el monitoreo de energía, el monitoreo de gases, la telemetría de equipos, el video en movimiento. La idea es gestionar la información de todos los sistemas del proceso minero en una sola base de datos centralizada, para luego teleoperarlos y controlarlos, así como para planificar acciones futuras en la mina (Lasec, 2018).

El World Economic Forum ha identificado cuatro áreas que tendrán un rol muy importante en la transformación automática y digital de la minería; en el cuadro 2 se describen sus alcances.

CUADRO 2. ÁREAS EN DESARROLLO PARA LA TRANSFORMACIÓN
DIGITAL DE LA MINERÍA

Área	Alcance
Automatización, robótica y desarrollo de hardware operacional	Sustitución de actividades manuales o desarrolladas con maquinaria controlada por los trabajadores
Habilitación digital de la fuerza de trabajo	Conexión digital de los trabajadores
Integración de empresas, plataformas y ecosistemas	Integración y conexión de procesos, sistemas de información y otros dispositivos o sistemas
Análisis de última generación y soporte de decisiones	Procesamiento de datos a través de algoritmos matemáticos, para apoyar la toma de decisiones en tiempo real y la planificación futura

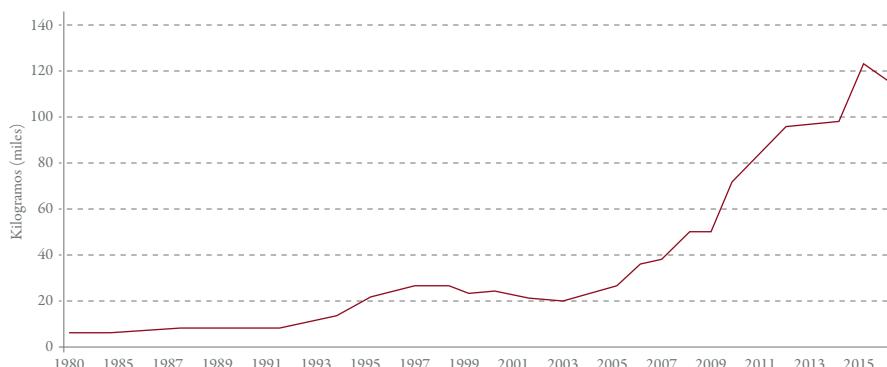
Fuente: elaboración propia con base en World Economic Forum (2017, p. 10).

Las grandes empresas mineras que operan en México se han enfocado en controlar y automatizar de manera aislada algunas actividades y sistemas. Muy pocas empresas han comenzado a colocar infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de la mina, para luego automatizar, controlar y digitalizar todas las actividades, aunque esta es la tendencia. De hecho, los nuevos avances tecnológicos en la minería tratan de que el nuevo sistema de control centralizado que se instale reconozca las actividades mineras automatizadas previamente.

Si bien los nuevos avances tecnológicos en la minería se han enfocado en un primer momento en elevar los índices de productividad de los procesos, también

han traído consigo una serie de beneficios, como mejores condiciones de seguridad laboral, mayor protección de los equipos, ahorro energético, reducción de emisiones al ambiente y reducción de los tiempos muertos. Aunque la producción de oro en México se ha incrementado de modo significativo a partir del presente siglo, como lo muestra la gráfica 1, aún no ha sido posible medir el impacto real de los sistemas de control y automatización introducidos por empresas como Epiroc, Atlas CopCo, Caterpillar, Sandvik, Komatsu y Lasec, dado el aumento constante de los proyectos mineros en etapa de producción, que pasaron de 71 a 107 entre 2010 y 2017 (SGM, 2011, p. 21; SGM, 2018, p. 20).

GRÁFICA 1. PRODUCCIÓN DE ORO EN MÉXICO DURANTE LOS AÑOS 1980-2016



Fuente: INEGI (2010) y CAMIMEX (2017a).

En las diferentes actividades mineras en el mundo se han identificado cinco niveles de automatización. En el primer nivel, denominado control manual local, el operador visualiza constantemente el proceso y lo controla parcialmente a través de un cable que se conecta directamente con la interface de alguna máquina. El segundo nivel, llamado control manual remoto, es parecido al primero, solo que el operador controla las máquinas a través de una consola portátil. En el tercer nivel, denominado teleoperación, el operador continúa visualizando el proceso, pero ahora lo controla a través de sensores que le informan de la situación actual del proceso. En el cuarto nivel, nombrado telesupervisión, el operador supervisa a distancia la ejecución de todo el proceso en los monitores, utilizando tecnología de asistencia automatizada. Finalmente, en el quinto nivel, llamado automatización total, el funcionamiento de la mayoría de los componentes del proceso es autónomo (Ralston *et al.*, 2014, p. 306).

De acuerdo con esta clasificación, en México se cuenta ya con maquinaria y equipo, pertenecientes a las grandes empresas, que se ubican en el tercero, cuarto y hasta el quinto niveles de automatización. El último nivel se observa en las perforadoras rotativas de Epiroc ubicadas en la mina de Peñasquito (Epiroc, 2018). Los procesos mineros de las pequeñas y medianas empresas mineras continúan siendo de tipo manual. Difícilmente estas acceden al primer nivel de automatización. En el cuadro 3 se mencionan algunos ejemplos de sistemas de control y automatización de equipos que se ofrecen en el mercado.

CUADRO 3. EJEMPLOS DE TECNOLOGÍAS DE CONTROL
Y AUTOMATIZACIÓN DE VENTA EN EL MERCADO

Etapa	Equipo	Marca	Origen
Extracción de mineral	Rig Control Systems (RCS), un sistema de control para perforadoras	Epiroc	Suecia
	Sistema autónomo de transporte AHS, un sistema autónomo de carga y transporte de mineral	Komatsu	Japón
Operación Mina	Certiq, plataforma de supervisión de equipos, un sistema que brinda informes del rendimiento de los equipos en tiempo real para un mantenimiento proactivo	Epiroc	Suecia
	Plataforma Mobilaris, un sistema que muestra información 3D en tiempo real de los procesos mineros subterráneos	Epiroc	Suecia
	Komtrax™, un sistema de monitoreo para equipos y flota a la vanguardia en tecnología inalámbrica	Komatsu	Japón
	Sistema Cat® MineStar™, un sistema que administra el rastreo de materiales, el estado de las máquinas, los equipos autónomos, entre otros elementos	Caterpillar	Estados Unidos
Trituración y molienda	Newtrax Technologies Inc., sistema de seguimiento de personal y vehículos y soluciones de telemetría de equipos móviles	Newtrax	Canadá
	Sistema de control de ajustes automáticos ASR™ para trituradoras, el cual monitorea la carga y el tamaño del material alimentado, para luego optimizar el equipo	Sandvik	Suecia
Flotación y lixiviación	ECS/ProcessExpert, un sistema de control para los sistemas de flotación y lixiviación que manipula los actuadores que controlan los niveles de pulpa, los flujos de pulpa, las tasas de aireación y la adición de reactivos	FLSmidth's	Dinamarca y Estados Unidos
	QCX/RoboLabs, un sistema de análisis de muestras de laboratorio con equipos completamente automatizados	FLSmidth's	Dinamarca y Estados Unidos

Fuente: elaboración propia con base en Mining & Construction (2014), Komatsu (2018), Epiroc (15 de enero de 2016), Mining & Civil Engineering (2018), Komatsu (s/f), Caterpillar (2018), International Mining (2018), Sandvik (s/f), FLSmidth (2018b), FLSmidth (2018a, p. 4) y entrevistas con informantes calificados.

En la gran minería de México se han automatizado sistemas como los malacates, el bombeo primario, el sistema de ventilación primario, la trituración y la molienda, el sistema de transporte por bandas, los circuitos de flotación. Los equipos de barrenación, rezagado, carga y transporte también lo han hecho, sobre todo en las grandes minas a cielo abierto. Una mina a cielo abierto es más susceptible de ser automatizada que una mina subterránea, dado que esta última posee condiciones menos favorables para la operación del equipo como temperaturas y concentraciones de polvo y humedad relativamente altas.

La automatización de una máquina se acompaña de un sistema de control capaz de dirigir las tareas y de reducir las fallas. En el caso de la perforación de superficie, Epiroc introdujo el sistema Rig Control Systems (RCS) en 1998, un sistema dirigido al control de perforadoras que sustituye la experiencia humana y el control manual de palancas de mando e interruptores en las perforadoras (Mining & Construction, 2014).

Un sistema de control puede estar dirigido tanto a una máquina o un sistema como a un grupo de máquinas o sistemas. Normalmente, este trabaja con una sola base de datos centralizada que adquiere continuamente información de los elementos que controla. Un ejemplo de este tipo lo tiene Caterpillar, se trata del sistema de control llamado Cat MineStar System, que administra en tiempo real alrededor de 5 500 máquinas en nueve estados de México, pertenecientes a la minería y otros sectores, las cuales están dotadas de miles de sensores en comunicación constante con un servidor. Este reporta a los técnicos de cada región el estatus de las distintas máquinas y la necesidad de programar una visita técnica (Caterpillar, entrevista sobre sistemas de control y automatización, 25 de octubre de 2019).

En un proceso de automatización, los sensores son elementos que miden el nivel de desempeño y también de desgaste de un equipo o maquinaria. Estos elementos alertan cuando es necesaria la sustitución de piezas (Greengard, 2015, p. 67). Los sensores pueden colocarse en las rocas, en la maquinaria y el equipo, en los sistemas de procesamiento de mineral, en los sistemas de exploración remotos, en los cursos de agua, en las atmósferas subterráneas, entre otros espacios. Los sistemas de supervisión de ventilación de la marca Trolex incorporan sensores de vibración, flujo, presión, nivel y temperatura para garantizar atmósferas óptimas en las minas subterráneas (Troxlex, s/f, p. 6).

También es factible que los propios trabajadores porten sensores para conocer con exactitud en cuál lugar de la mina se encuentran y la actividad que están realizando; esto garantiza una rápida acción de rescate en caso de accidente, pero

también es un medio útil para controlar la intensidad del trabajo.² Fresnillo plc ha adoptado un sistema de la marca Newtrax Technologies Inc. que gestiona, no solo las operaciones productivas, sino también la seguridad de las minas subterráneas. Este sistema incluye diversos elementos como el seguimiento del personal y de vehículos durante la jornada laboral (International Mining, 2018).

La empresa mexicana de telecomunicaciones Lasec, con el apoyo del Programa de Estímulos a la Innovación del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), ha diseñado un dispositivo portable por el trabajador llamado Tag, que puede ser rastreado por un sistema de espectro disperso. A través de este dispositivo, el usuario puede emitir una señal de alerta ante cualquier emergencia, o puede reportarse como fuera de peligro ante la señal del mismo dispositivo. Toda esta información es detectada y visualizada en una pantalla que informa sobre el estado de los trabajadores (Rodríguez, 22 de marzo de 2017).

El uso de softwares constituye un elemento de suma importancia en el procesamiento de datos generados en las distintas etapas del proceso minero. Distintos softwares ofrecen herramientas de vanguardia que permiten simular la realidad con interfaces amigables. Existen softwares para la prospección y la exploración, el cálculo de reservas de minerales, la estimación de la factibilidad económica, la planeación, el diseño de una mina, la simulación de procesos metalúrgicos, la operación, entre otras actividades. En la etapa de flotación selectiva, por ejemplo, se ha sustituido ventajosamente el trabajo del experto metalurgista por softwares que optimizan significativamente la dosificación de cianuro, cuyo uso puede reducir hasta el 40 por ciento del costo total del metal beneficiado (Vella, 19 de diciembre de 2017).

Entre las empresas especializadas en el desarrollo de softwares aplicados a la minería y a la geología se encuentran Maptek (2018), Datamine (2018), Leapfrog (s/f) y Dassault Systèmes (2018). Vulcan de Maptek es uno de los paquetes de software más utilizados en la minería, que posee un sistema de planificación minera y modelado 3D, que puede ser aplicado desde la exploración hasta la rehabilitación de un sitio (Maptek, 2015). La tendencia de los nuevos softwares no es solamente procesar una gran cantidad de datos, lo que para los seres humanos podría significar “tiempo muerto”, sino también incorporar algoritmos inteligentes que produzcan aprendizaje. Una de las tendencias es la generación de *machine-learning* softwares

² “Smart baseball caps (known as SmartCaps) that monitor their brainwaves to measure fatigue. The technology has been rolled out primarily with truck drivers and machinery operators, who are at risk from fatigue-related injuries” (World Economic Forum, 2017, p. 16).

que corrijan las acciones de los usuarios en función de lo que el sistema aprende, propendiendo a sustituir la calificación humana por la virtual, con el consecuente desempleo potencial.

ASPECTOS SOCIOECONÓMICOS Y AMBIENTALES DE INDUSTRIA 4.0 EN LOS PROCESOS MINEROS

Los avances en la automatización y la digitalización de los procesos industriales se han enfocado en el aumento del índice de productividad de los diversos sectores industriales, incluida la minería. Sin embargo, bajo su desarrollo subyacen fuerzas económicas, sociales y políticas que levantan preocupaciones, al igual que ha sucedido con las otras revoluciones industriales en la historia del capitalismo. Las principales preocupaciones que la literatura destaca pueden agruparse en tres grandes ítems, que se aíslan para efectos de esta exposición, pero que en la realidad se conjugan: concentración y centralización del capital, implicaciones laborales e incidencias ambientales.

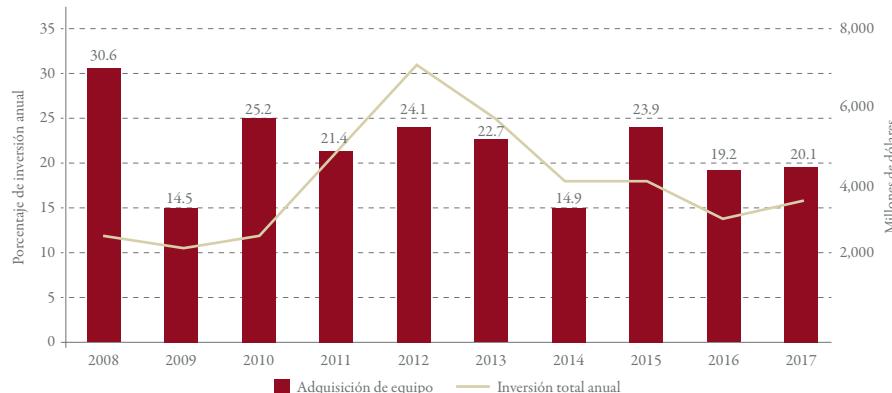
Concentración y centralización del capital

La organización digital de todo el ciclo de vida de un proceso minero es una actividad propia de las empresas que pertenecen a grandes corporaciones. Son empresas que tienen el capital necesario para extraer grandes volúmenes de mineral, reinvertir en nuevas tecnologías y, con ello, aumentar el índice de productividad.

La minería no es el principal sector a la vanguardia de los procesos de automatización, pero es una de las ramas donde se han adoptado los nuevos avances tecnológicos. A pesar de que las inversiones nacionales y extranjeras disminuyeron durante la segunda década del siglo XXI, la inversión en equipo en la minería fue un rasgo constante. La revisión de los informes anuales de la CAMIMEX muestra que el porcentaje promedio de inversión en la adquisición de equipo durante el periodo 2008-2017 tuvo un valor de casi 22 por ciento, comparable con los porcentajes promedio de inversión en proyectos nuevos y expansión de proyectos, con valores en torno a 20 por ciento. Si la inversión total durante estos años de las empresas afiliadas a CAMIMEX tuvo un valor de 41 204.4 millones de dólares, la inversión promedio anual en adquisición de equipo fue de 8 941.4 millones de dólares. También se observa que la inversión de la minería en medio ambiente y

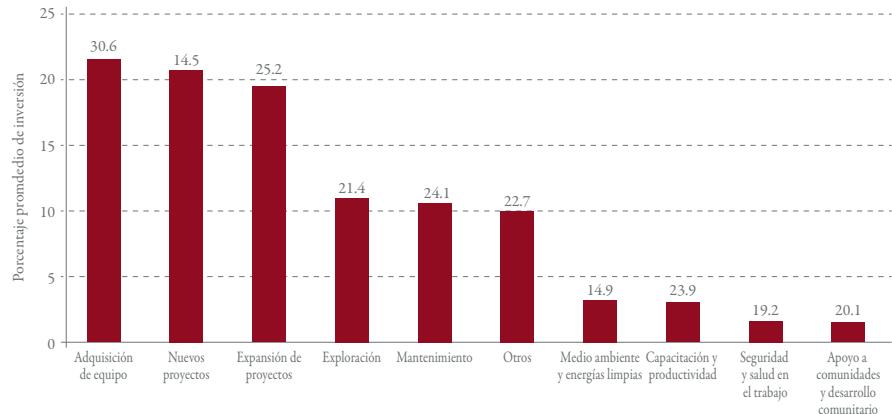
energías limpias, seguridad y salud en el trabajo y apoyo a las comunidades y desarrollo comunitario no sobrepasa el siete por ciento promedio durante el periodo 2008-2017 (véase las gráficas 2 y 3).

GRÁFICA 2. PORCENTAJES ANUALES DE INVERSIÓN PARA LA ADQUISICIÓN DE EQUIPO DURANTE EL PERÍODO 2008-2017 POR LAS EMPRESAS AFILIADAS A CAMIMEX



Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2009, p. 19; 2010, p. 20; 2011, p. 11; 2012, p. 7; 2013, p. 12; 2014, p. 17; 2015, p. 15; 2016, p. 20; 2017b, p. 25; 2018b, p. 32).

GRÁFICA 3. PORCENTAJES PROMEDIOS DE INVERSIÓN EN VARIOS RUBROS DURANTE EL PERÍODO 2008-2017 POR LAS EMPRESAS AFILIADAS A CAMIMEX



Nota: en el rubro de otros se encuentran los gastos por seguridad patrimonial, investigación y desarrollo tecnológico y otros aspectos no especificados.

Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2009, p. 19; 2010, p. 20; 2011, p. 11; 2012, p. 7; 2013, p. 12; 2014, p. 17; 2015, p. 15; 2016, p. 20; 2017b, p. 25; 2018b, p. 32).

En México, poco menos del cien por ciento de la producción anual de minerales metálicos pertenece a grandes empresas mineras. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano (SGM), el porcentaje anual de producción de oro en manos de la gran minería pasó de 42.2 a 98.96 por ciento durante los años 2006-2016. En una década, 56.76 por ciento de la producción de oro dejó de ser aportada por la pequeña y mediana minería. En el caso de la plata, el porcentaje anual de producción pasó de 83.7 a 96.52 por ciento en los mismos años. En una década, 12.82 por ciento de la producción de plata dejó de ser aportada por la pequeña y mediana minería (SGM, 2007, p. 43; SGM, 2017, p. 28). Al parecer, desde el inicio del presente siglo, la producción anual de plata, a diferencia de la de oro, se encontraba más concentrada en la gran minería.

En el cuadro 4 se muestra el porcentaje de producción de metales metálicos para el año 2017 por grupos de empresas. Como se puede observar, más de la mitad de la producción de metales metálicos se encuentra en siete grandes empresas. En el caso del cobre, solo una empresa produce casi 80 por ciento de este metal. Si se considera que diferentes metales pueden ser extraídos en un mismo yacimiento, la concentración de capital por empresa es mucho mayor que las estadísticas por metal mencionadas en este cuadro.

CUADRO 4. PORCENTAJE DE PRODUCCIÓN DE METALES METÁLICOS
DURANTE 2017 POR GRUPOS DE EMPRESAS

Metal	Porcentaje de producción	Empresas
Oro	50	Fresnillo plc, Goldcorp, Agnico Eagle y Minera Frisco
Plata	62	Fresnillo plc, Goldcorp, Industrias Peñoles, Grupo México y Pan American Silver
Cobre	77	Grupo México
Zinc	80	Industrias Peñoles, Goldcorp, Grupo México, Fresnillo plc y Minera Frisco
Plomo	57	Goldcorp, Fresnillo plc e Industrias Peñoles

Fuente: elaboración propia con datos de CAMIMEX (2018a).

Es previsible que las nuevas tecnologías conducirán a un mayor grado de concentración del capital del que ya existe; esto significará que: i) las grandes empresas mineras seguirán adoptando nuevas tecnologías en todas las actividades y operaciones; ii) la tendencia a la centralización del capital en este sector podrá acentuarse, y iii) las empresas mineras continuarán aumentando el índice de productividad y, eventualmente, las tasas de ganancias propios.

Los informes anuales de la CAMIMEX no mencionan si existe una tendencia a la centralización del capital en el sector minero en México; no obstante, sí reportan que la minería ha sido el sector industrial más activo en materia de acuerdos, fusiones y adquisiciones durante los últimos años. De hecho, fue el sector que encabezó la lista en el año 2017. De un total de 220 operaciones formalizadas, 20 por ciento (45) lo realizó este sector (CAMIMEX, 2018b, p. 35). Un ejemplo de estas ocurrió en noviembre, cuando Agnico Eagle Mines compró a la empresa Gogold Resources el proyecto de oro Santa Gertrudis ubicado en Sonora por un valor de 80 millones de dólares. Con este nuevo proyecto, Agnico Eagle Mines continúa situándose como una de las principales empresas productoras de oro en el país (CAMIMEX, 2018b, p. 36).

La concentración y la centralización del capital conllevan una mayor dependencia tecnológica extranjera. Como se observa en el apartado anterior, muy pocos de los avances tecnológicos del presente siglo son desarrollos de la industria mexicana. La mayoría de los suplementos mineros es importada de países de origen o intermediarios.

Implicaciones laborales directas

La disminución del empleo en todos los niveles de calificación es uno de los signos más previsibles de la automatización de los procesos industriales. Los sindicalistas mineros mexicanos ya han llamado la atención sobre este hecho, y han insistido en la necesidad de implementar nuevas políticas públicas para contrarrestarlo (Gómez Urrutia, 28 de junio de 2018). En el otro extremo, los empresarios también han llamado la atención. A comienzos de 2017, El World Economic Forum señaló que durante la próxima década se prevé una desocupación de entre cuatro y cinco por ciento de la fuerza de trabajo en la minería como resultado de la automatización de los procesos (2017, pp. 4 y 12). Si se considera que en México existen 354 702 empleos en el sector minero metalúrgico (SGM, 2017, p. 22), cuatro por ciento de desempleo significaría 14 188 trabajadores desempleados. Esta proporción puede ser significativa en poblaciones en las que la actividad minera es la principal fuente de empleo. No obstante, en México continúa creciendo el empleo en el sector minero; para 2016, se incrementó un 2.8 por ciento con respecto del año anterior, tendencia que se ha mantenido desde 2010 (SGM, 2017, p. 22). Esto se debe a que las empresas mineras han ampliado las reservas de minas activas en los últimos años a través de la exploración de sus alrededores (CAMIMEX, 2018b, p. 31); además, como ya se mencionó, los proyectos mineros en etapa de producción continúan en aumento.

La sustitución de funciones humanas por máquinas y equipos y por un fuerte caudal de inteligencia artificial no es un proceso sencillo. Las empresas mineras han tenido dificultades para capacitar a los trabajadores en tecnologías digitales, acostumbrados a los sistemas mecánicos. Aparte, les ha sido difícil encontrar trabajadores capacitados tanto en sistemas digitales como en sistemas físico mecánicos (World Economic Forum, 2017, p. 7). Esta falta de personal especializado ha obstaculizado en alguna medida la automatización de las grandes empresas mineras localizadas en países subdesarrollados, pues cada vez que se descompone un equipo de esta índole, tienen que recurrir a técnicos expertos en el extranjero, lo que se traduce en grandes pérdidas de tiempo y dinero.

Los procesos de automatización sustituyen, en primer lugar, a los trabajadores de base allí donde la máquina y el equipo pueden realizar el mismo trabajo de forma más económica y eficiente o en lugares con condiciones ambientales adversas. Los perforistas más experimentados han sido sustituidos por equipos automatizados como, por ejemplo, la perforadora PV-351 de la marca Epiroc, una máquina que realiza con precisión cada una de sus operaciones sin agotarse, a diferencia de un perforista cuyo rendimiento va disminuyendo debido al cansancio, distracciones o meros errores (Epiroc, 2018; Mining & Construction, 2014).

En segundo lugar, la automatización sustituye al personal de supervisión, tanto por la reducción de los trabajadores de base como por la introducción de sistemas de control. Tal es el caso de la plataforma de Mobilaris Mining Intelligence, un sistema que proporciona información 3D en tiempo real de todo el proceso minero, desde la posición de las máquinas, vehículos o personas hasta la operación de los sensores. Este es un sistema que permite planear, supervisar y dar seguimiento a las distintas actividades de la minería (Mining & Civil Engineering, 2018).

En tercer lugar, la automatización sustituye a trabajadores calificados en las distintas etapas del proceso minero. Por ejemplo, los geólogos especialistas en la ponderación de las reservas minerales han sido desplazados por el uso de softwares como Gemcom-Gems, Vulkan 3D, Datamine, Leapfrog 3D, Geostat y Surpac. Estos softwares estiman la cantidad de metales presentes en un yacimiento mediante cálculos geoestadísticos, una actividad que anteriormente se realizaba con métodos convencionales.

Aunque se trata de un tema controversial, es posible suponer que las nuevas tecnologías descalifican a los trabajadores calificados.³ Poco se habla de este proceso. Basta con citar un ejemplo para entender que esta descalificación existe: las determinaciones

³ Véase, por ejemplo, el caso del DAQRI (World Economic Forum, 2017, p. 16).

de metales eran realizadas tradicionalmente por químicos experimentados en técnicas analíticas vía húmeda y vía seca. Cuando aparecieron los primeros espectrofómetros de absorción atómica, estos químicos aún participaban en la calibración de los equipos. En la actualidad, el manejo de este tipo de instrumento es tan simple que cualquier trabajador capacitado puede hacerlo. Tal es el caso del espectrómetro de plasma con microondas 4210 MP-AES de la marca Agilent, un equipo con niveles de detección de partes por billón (ppb), que en un tiempo no mayor a tres minutos analiza más de 30 elementos por muestra (Agilent Technologies, 2018).

Existe preocupación en el mundo por el posible impacto de las nuevas tecnologías en el empleo y el trabajo. La Confederación Europea de Sindicatos reconoce que la automatización y la digitalización pudieran traer consigo riesgos como la creación de nuevos monopolios, el despido masivo de trabajadores, el espionaje de trabajadores y el aumento del trabajo digital precario. Este organismo vislumbra la necesidad de crear un tipo diferente de contrato social en este nuevo ambiente tecnológico, en el que los trabajadores sean los principales actores (Davies, 2015, p. 9).

Incidencias ambientales

Los nuevos avances en la minería han propiciado una mayor autonomía y sincronización de los procesos. Las máquinas que se regulan y operan automáticamente durante los cambios de turno han aumentado la producción y disminuido los costos de operación. Estos aspectos han sido los principales objetivos de los nuevos avances tecnológicos. No obstante, a la par, ha habido mejoras en otras áreas como la protección al ambiente. Si bien se han desarrollado diversas tecnologías en esta área, como las empleadas en el tratamiento de aguas, en el manejo de polvos, en el depósito de jales y en la reducción del consumo energético, aún queda mucho por hacer en lo que se refiere a minería.

El hecho de que las nuevas tecnologías sincronicen cada una de las fases del proceso ha traído consigo mayores tasas de explotación y de procesamiento de minerales, pero, a la vez, ha generado un mayor consumo de insumos, entre los que destaca el agua, y una mayor emisión de contaminantes al ambiente, llámense jales, aguas residuales, gases efecto invernadero u otras sustancias químicas. Esta nueva transformación tecnológica ha llevado a la minería a un nuevo nivel de producción, donde el aumento de dimensiones tiene un papel crucial. Aunque la tecnología actual puede coadyuvar a la mitigación de los impactos medioambientales, estos no pueden ser eliminados en su totalidad, dadas las cantidades de minerales extraídos y procesados, que superan por

mucho los registros históricos. Tal es el caso de empresas como Minera Peñasquito, que tiene la capacidad de procesar hasta 150 000 toneladas de mineral por día (Minera Peñasquito, 2011, p. 6). Además, la minería se enfrenta cada vez más a la explotación de minerales de mayor complejidad y de yacimientos de fertilidad decreciente, lo que la hace más susceptible de ocasionar impactos al ambiente.

El uso de los explosivos constituye un ejemplo claro de la manera en que las nuevas tecnologías han facilitado la sincronización del proceso minero para aumentar el nivel de producción, disminuir los costos operativos y, colateralmente, beneficiar al ambiente. En la actualidad, la función de una voladura no solo es fracturar la roca, sino también llegar a un nuevo nivel de manejo de la energía para obtener el tamaño de roca deseado, y para desplazarla a un lugar indicado (Dyno Nobel, entrevista sobre explosivos, 24 de octubre de 2019). Estas acciones ahorran capital a las empresas si se ejecutan correctamente; de lo contrario, acarrean costos para las etapas subsiguientes. Una mala explosión puede generar fragmentos de roca grandes, que tendrían que reprocesarse para poder ingresarlas a la etapa de molienda, con lo cual se generaría un mayor consumo de explosivos y de emisiones a la atmósfera. A la par, si la roca no se desplaza al lugar indicado, los movimientos anexos utilizarían mayor cantidad de combustible y ocasionarían mayor cantidad de emisiones al ambiente.

Las voladuras son iniciadas con sistemas electrónicos de detonación programables, como el DigiShot Plus 4G Electronic Initiation System, que puede detonar hasta 16 000 barrenos en una sola programación (Dyno Nobel, 2018). Lo interesante de este sistema es que, antes de realizar una voladura, esta se puede simular en un software de tres dimensiones, donde se visualiza la fragmentación de la roca y la posible vibración. La voladura llevada a la realidad posee de 90 a 95 por ciento de correspondencia con la simulación. En tiempo, este sistema puede llegar a detonar hasta 400 barrenos en 30 segundos (Dyno Nobel, entrevista sobre explosivos, 24 de octubre de 2019).

Un ejemplo del modo en que las nuevas tecnologías han propiciado ahorros energéticos y beneficios para el ambiente se encuentra en los nuevos sistemas de ventilación. Tradicionalmente, la ventilación normal llega a consumir hasta 70 por ciento del total de la energía de una mina subterránea; por lo tanto, es una de las actividades más costosas. Los actuales sistemas de ventilación monitorean continuamente el nivel de dióxido de carbono dentro de una mina, y se accionan solo cuando detectan que este contaminante se encuentra por arriba de los límites establecidos. Esta acción conlleva un gran ahorro energético y, además, disminuye las emisiones indirectas al ambiente (Epiroc, entrevista sobre automatización, 25

de octubre de 2019).⁴ El consumo energético del sistema de ventilación se reduce aún más con el uso de baterías eléctricas en equipos de carga, de perforación y transportes. De acuerdo con las especificaciones del fabricante, estos equipos no generan emisiones contaminantes al ambiente; así, los costos de operación del sistema de ventilación disminuyen (Epiroc, 2019).

Otro ejemplo de la manera en que las tecnologías pueden disminuir un impacto ambiental en la fuente de origen es la reducción del consumo de agua en el proceso de perforación. Normalmente, las máquinas de barrenación requieren de agua cuando perforan la roca. Las nuevas tecnologías de EPIROC detectan su existencia cuando barrenan una cavidad, lo que las hace regular el flujo de este elemento vital y reducir su consumo (Epiroc, entrevista sobre automatización, 25 de octubre de 2019).

Los nuevos sistemas de control y automatización también ofrecen un monitoreo de los impactos ambientales, como Dispatch. Este sistema, presente en el mercado desde 1979, se creó para solucionar cuestiones operativas relacionadas con el transporte (Oyarzún Montalva, 2001, p. 140). Con el transcurso de los años, se desarrollaron aplicaciones anexas a este sistema que lo transformaron en una plataforma de gestión minera, más que en una herramienta operativa (Oyarzún Montalva, 2001, p. 141). Hoy en día, Dispatch es utilizado por empresas mineras como Peñasquito para el desarrollo de múltiples funciones operativas, entre las que se encuentra el monitoreo de algunos impactos ambientales. El cuadro 5 muestra algunos de los usos de este.

CUADRO 5. MONITOREO DE ALGUNOS IMPACTOS AMBIENTALES POR DISPATCH

Elemento	Parámetro	Acción	Resultado
Aire	Polvos PM10 y PM2.5	Medición de parámetros por equipos especializados y envío de datos a Dispatch para su control	Normativo
Fauna	Fauna en caminos	Detección de fauna en caminos por los operadores y envío de datos a Dispatch para su captura y reubicación	Normativo
Suelo	Derrames en suelo	Detección por los operadores y envío de datos a Dispatch para su control	Normativo
Suelo	Deslizamientos de taludes	Detección por robots y envío de datos a Dispatch para su control	Normativo

Fuente: elaboración propia con datos obtenidos en la visita a Minera Peñasquito (8 de agosto de 2019).

⁴ Las emisiones indirectas son los gases o compuestos de efecto invernadero que se generan fuera de las empresas a consecuencia del consumo de energía eléctrica y térmica (DOF, 2014, p. 1, art. 2).

En los depósitos de jales también se han implantado sistemas de monitoreo de impactos ambientales. Tal es el caso de la mina Peña Colorada, donde se han adoptado piezómetros para medir el nivel del agua, inclinómetros para medir los movimientos subterráneos, estaciones robóticas para medir los movimientos superficiales, estaciones meteorológicas para medir parámetros climáticos, acelerógrafos para medir los movimientos sísmicos y un satélite para medir los asentamientos (desplazamientos verticales) (Reyes, 2019).

Las mineras son de las principales empresas que afrontan conflictos sociales, ambientales y económicos con pobladores de las comunidades donde se ubican estas o con trabajadores. Muchos de estos conflictos han sido documentados en varios sitios web, como el de Mines and Communities (MAC), un sitio que para México tenía documentados 343 conflictos hasta finales de 2019 (MAC, 2019). También, el Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL) había documentado 45 casos para México para esta fecha; de hecho, en este sitio, este país ocupa el segundo lugar en América Latina (OCMAL, s/f).⁵

Si se contrasta la información proveniente de las empresas y de los técnicos que afirman que los impactos ambientales se reducen con los nuevos avances tecnológicos con la información proveniente de las instituciones que registran las demandas de los trabajadores y las comunidades en contra de la minería, resultan dos versiones diferentes del mismo fenómeno. Esta contradicción no necesariamente significa que alguna de las versiones es errada; lo más probable es que ambas sean correctas dentro de las limitaciones de cada perspectiva.

En general, las nuevas aplicaciones tecnológicas están enfocadas en aspectos discretos de la actividad minera. Si bien estas han posibilitado la explotación y el beneficio de un mayor volumen de minerales, los potenciales efectos beneficiosos en el ambiente se pueden contrarrestar por el solo hecho de manejar grandes volúmenes. Esto ha motivado que muchas de las comunidades aledañas a las unidades mineras se quejen por la disminución de las reservas de agua, el aumento de los polvos provenientes de los movimientos de material, la apertura de caminos, el aumento de los jales, la modificación del paisaje, entre otros aspectos que provocan afectaciones significativas en los ecosistemas existentes. La legislación ambiental mexicana aún no considera este aumento de dimensiones. Esta se fundamenta en el análisis del riesgo; de manera que una actividad no será regulada hasta que se demuestre que

⁵ Al respecto, véase los sitios web siguientes, donde se documentan diferentes tipos de conflictos mineros, incluyendo los laborales: <https://www.facebook.com/MICLA-675191549245839/>, <https://www.ocmal.org/> y <http://www.reمامx.org/>

provoca efectos adversos sobre el ambiente. En tanto, las comunidades se basan en la experiencia práctica e histórica, fundamento del principio de precaución, que trata de impedir el desarrollo de actividades que no se sabe si afectarán el ambiente.

CONCLUSIONES

La minería es una de las actividades más importantes en América Latina, y ciertamente en México, donde colabora con un 2.5 por ciento del producto interno bruto nacional (CAMIMEX, 2018b, p. 19). El avance en las tecnologías de la información y la integración de estas con las tecnologías operativas han transformado a la minería, al igual que otros sectores industriales. En México, algunas de las grandes empresas mineras más reconocidas ya han automatizado algunas de sus actividades. Ahora se tiende a la colocación de infraestructura y servicios de telecomunicaciones en todos los espacios de una mina, para luego digitalizar, integrar, automatizar y controlar todas las actividades mineras a través de un único sistema centralizado, incluyendo a los trabajadores, quienes pueden portar dispositivos RFID para su localización. Si bien los nuevos avances tecnológicos en la minería se han enfocado en la elevación de los índices de productividad para aumentar las ganancias, a la par, ha habido mejoras en el entorno laboral y ambiental, aunque estas no han sido tan trascendentales como las primeras.

Desde la perspectiva del desarrollo en México, los nuevos avances tecnológicos en la minería muestran algunas características de interés. La primera es que los sistemas de control y automatización utilizados en el sector minero son producidos por empresas extranjeras; no obstante, se vislumbra el inicio del desarrollo de empresas proveedoras en industria 4.0, como es el caso de Lasec. La segunda característica es que entre los rubros más importantes de inversión por parte de la gran minería se encuentra la adquisición de equipo, con un promedio de inversión de casi 22 por ciento durante el periodo 2008-2017. La tercera característica es el fuerte proceso de concentración y centralización del capital, que muestra que las grandes empresas mineras han desplazado casi por completo a la pequeña y mediana minería en la producción de metales. Estas últimas empresas producen menos de cinco por ciento del total nacional. La cuarta característica es la tendencia a la sustitución del trabajador por maquinaria y equipo, que se observa en las diferentes etapas del proceso laboral, aunque aún no se ha manifestado en los datos globales de empleo por causa del aumento extensivo de la explotación. La quinta característica consiste

en que en las condiciones laborales y en el entorno ambiental no ha habido una mejora paralela al gran desarrollo tecnológico, dados los continuos reclamos de organizaciones sindicales y ambientalistas.

BIBLIOGRAFÍA

- Agilent Technologies (2018). 4210 MP-AES. Recuperado de <https://www.agilent.com/en-us/products/mp-aes/mp-aes-systems/4210-mp-aes>
- ALMADA-LOBO, F. (2015). The Industry 4.0 revolution and the future of Manufacturing Execution Systems (MES). *Journal of Innovation Management*, 3(4): 16-21. DOI: 1024840/2183-0606_003.004_0003
- BARRAGUER, X. M. (2016). Sistema de control distribuido. Nuevas soluciones para adaptarse a las exigencias del mercado. *Industria Química* (39): 38-42. Recuperado de https://www.industriaquimica.es/articulos/20161114/sistema-control-distribuido-nuevas-soluciones-adaptarse-exigencias-mercado#.XkbwdS3mE_U
- BOYES, H.; Hallaq, B.; Cunningham, J., y Watson, T. (2018). The industrial internet of things (IIoT): An analysis framework. *Computers in Industry*, 101(October): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.04.015>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2009). *Informe anual 2009. Situación de la minería mexicana en 2008*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/3414/3700/5364/2009.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2010). *Informe anual 2010. Situación de la minería mexicana en 2009*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/6814/3700/5364/2010.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2011). *Informe anual 2011. Situación de la minería mexicana en 2010*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/9914/3700/5365/2011.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2012). *Informe anual 2012. Situación de la minería mexicana en 2011*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/6414/3700/5395/2012.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2013). *Informe anual 2013. Situación de la minería mexicana en 2012*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://camimex.org.mx/files/1314/3700/5417/02situacion2013.pdf>

- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2014). *Informe anual 2014. Situación de la minería mexicana en 2013*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/8914/3700/5440/2014.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2015). *Informe anual 2015. Situación de la minería en México en 2014*. Distrito Federal, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/4614/3916/7952/Info2015.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2016). *Informe anual 2016. Situación de la minería en México en 2015*. Ciudad de México, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/3614/6852/9181/02-Situacion2016.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2017a). *Informe anual 2017. Estadísticas*. Ciudad de México, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/2615/0092/9348/05-Info17.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2017b). *Informe anual 2017. Situación de la minería en México en 2016*. Ciudad de México, México: Cámara Minera de México. Recuperado de <https://www.camimex.org.mx/files/9515/0058/4028/02-Info17.pdf>
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2018a). *Informe anual 2018. Informe de los grupos de productores*. Ciudad de México, México: Cámara Minera de México. Recuperado de https://www.camimex.org.mx/files/3215/3065/3264/07_info_2018.pdf
- CAMIMEX (Cámara Minera de México) (2018b). *Informe anual 2018. Situación de la minería en México en 2017*. Ciudad de México, México: Cámara Minera de México. Recuperado de https://www.camimex.org.mx/files/4415/3073/8309/02_info_2018.pdf
- Caterpillar (2018). Soluciones tecnológicas Cat® MinestarTM. Recuperado de https://www.cat.com/es_US/support/operations/technology/cat-minestar.html
- CORONA ESQUIVEL, R.; Tritlla, J.; Benavides Muñoz, M. E.; Piedad Sánchez, N., y Ferrusquía Villafranca, I. (2006). Geología, estructura y composición de los principales yacimientos de carbón mineral en México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(1): 141-160. DOI: 10.18268/BSGM2006v58n1a5
- CRITCHLEY, L. (2019). Where Nanotechnology, the IoT, and Industry 4.0 Meet. Mouser Electronics website. Recuperado de <https://www.mouser.com/blog/where-nanotechnology-the-iot-and-industry-40-meet>
- Dassault Systèmes (2018). GEOVIATM. Software de modelado 3D. Dassault Systèmes®. Dassault Systèmes website. Recuperado de <https://www.3ds.com/es/productos-y-servicios/geovia/>

- Datamine (2018). Datamine en MINEX CIS 2018. Recuperado de <https://www.dataminesoftware.com/?s=Datamine+en+MINEX+CIS>
- DAVIES, R. (2015). Industry 4.0: Digitalisation for productivity and growth. *Briefing European Parliamentary Research Service* (September): 1-10. Recuperado de [http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI\(2015\)568337_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568337/EPRS_BRI(2015)568337_EN.pdf)
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (28 de octubre de 2014). Reglamento de la Ley General de Cambio Climático en materia del Registro Nacional de Emisiones. Nuevo Reglamento DOF 28-10-2014. Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión, Secretaría General, Secretaría de Servicios Parlamentarios. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/Reg_LGCC_MRNE_281014.pdf
- Dyno Nobel (2018). DigiShot Plus 4G. Electronic Initiation System. Recuperado de <https://www.dynonobel.com/south-america/resource-hub/publications/product-brochures?page=2>
- Epiroc (15 de enero de 2016). Atlas Copco lanza el nuevo sistema de monitorización de equipos, Certiq. Recuperado de <https://www.epiroc.com/es-mx/newsroom/2016/atlas-copco-launches-new-machine-monitoring-system-certiq>
- Epiroc (2018). PV-351. Recuperado de <https://www.epiroc.com/es-mx/products/drill-rigs/surface-blasthole-drill-rigs/pv-351>
- Epiroc (2019). La flota sin emisiones. Recuperado de <https://www.epiroc.com/es-mx/innovation-and-technology/zero-emission>
- European Union Agency for Network and Information Security (2018). ICS SCADA. Recuperado de <https://www.enisa.europa.eu/topics/critical-information-infrastructures-and-services/scada>
- fLSmidth (2018a). Automatización de laboratorios. Recuperado de http://www.flsmidth.com/media/Brochures/Brochures%20for%20Automation/RoboLab_Minerals_ES.ashx
- fLSmidth (2018b). Advanced process control software. Recuperado de <http://www.flsmidth.com/en-US/Industries/Categories/Products/Electrical+and+Automation/Advanced+Process+Control/Advanced+Process+Control/ProcessExpert+Cement>
- GÓMEZ URRUTIA, N. (28 de junio de 2018). México frente a la cuarta revolución industrial. *La Jornada* (en línea). Recuperado de <http://www.jornada.unam.mx/2018/06/28/opinion/018a1pol>
- Greengard, S. (2015). *The Internet of Things*. Cambridge, Massachusetts, Estados Unidos: MIT Press.

- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) (2010). *Estadísticas históricas de México 2009*. Aguascalientes, Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Recuperado de http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/historicas10/EHM2009.pdf
- International Mining (2018). Newtrax selected by Fresnillo mine for safety and productivity solutions. Recuperado de <https://im-mining.com/2018/03/08/newtrax-selected-fresnillo-mine-safety-productivity-solutions/>
- KAGERMANN, H. (2015). Change through digitization: Value creation in the Age of Industry 4.0. En H. Albach, H. Meffert, A. Pinkwart, R. Reichwald (eds.). *Management of Permanent Change* (pp. 23-45). Wiesbaden, Alemania: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-05014-6_2
- Komatsu (2018). Komatsu celebra el décimo aniversario del Sistema Autónomo de Transporte (AHS) Komatsu Chile. Recuperado de <https://www.komatsulatinoamerica.com/chile/komatsu-celebra-el-decimo-aniversario-del-sistema-autonomo-de-transporte-ahs/>
- Komatsu (s/f). Komtrax. Recuperado de <https://www.komatsulatinoamerica.com/mexico/experiencia-komatsu/innovacion/komtrax/>
- Lasec (2018). Industria 4.0 Mina Digital. Recuperado de <http://lasec.com.mx>
- LASI, H.; Fettke, P.; Kemper, H. G.; Feld, T., y Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & Information Systems Engineering* (6): 239-242. DOI: 10.1007/s12599-014-0334-4
- Leapfrog (s/f). Modelado geológico en 3D. Modelado implícito. Software geológico. Leapfrog. Recuperado de <https://www.leapfrog3d.com/es>
- LI, J., y Zhan, K. (2018). Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment. *Engineering*, 4(3): 381-391. DOI: 10.1016/j.eng.2018.05.013
- MAC (2019). México. Recuperado de <http://www.minesandcommunities.org/list.php?r=949>
- Maptek (2015). Maptek Vulcan. Software de planificación minera y modelado en 3D. Recuperado de https://www.maptek.com/pdf/es/vulcan/Maptek_Vulcan_Overview_esp.pdf
- Maptek (2018). Maptek: Planificación minera en 3D, diseño de minas, geología y programación en Vulcan. Recuperado de <https://www.maptek.com/cl/productos/vulcan/index.html>

- Minera Peñasquito (2011). *Resumen ejecutivo. Manifestación de Impacto Ambiental Modalidad Particular. Ampliación del depósito de jales y fase II del patio de lixiviación.* Peñasquito GoldCorp. Recuperado de <http://sinat.semarnat.gob.mx/dgiraDocs/documentos/zac/resumenes/2011/32ZA2011M0005.pdf>
- Mining & Civil Engineering (2018). Mobilaris Mining IntelligenceTM just like Google for your mine. Recuperado de <https://www.mobilaris.se/mining-civil-engineering/real-time-situational-awareness/>
- Mining & Construction (2014). Atlas Copco Enabling Automation: Rig Control System. Recuperado de <https://miningandconstruction.com/mining/enabling-automation-2748/>
- OCMAL (Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina) (s/f). Conflictos Mineros en México. Recuperado de https://mapa.conflictosmineros.net/ocmal_db-v2/conflicto/lista/02024200
- OYARZÚN MONTALVA, H. (2001). La tecnología en la administración moderna. En *Acta de sesiones. XXIV Convención Internacional Acapulco, Guerrero, México.* Distrito Federal, México: Asociación de Ingenieros de Minas Metalurgistas y Geólogos de México.
- RALSTON, J.; Reid, D.; Hargrave, C., y Hainsworth, D. (2014). Sensing for advancing mining automation capability: A review of underground automation technology development. *International Journal of Mining Science and Technology*, 24(3): 305-310. DOI: 10.1016/j.ijmst.2014.03.003
- REYES, M. A. (2019). Presas de jales. Presentado en V Seminario sobre Depósitos de Jales, Auditorio de la Facultad de Minas, Metalurgia y Geología, Universidad de Guanajuato, 26 y 27 de septiembre. Guanajuato, Guanajuato, México.
- RODRÍGUEZ, E. (22 de marzo de 2017). Diseñan sistema inteligente para seguridad en minas. *CienciaMx Noticias*. Recuperado de <http://www.conacytprensa.mx/index.php/tecnologia/tic/13912-disenan-sistema-inteligente-para-seguridad-en-minas>
- Sandvik (s/f). Automatización de la trituradora. Recuperado de <https://www.rocktechnology.sandvik/es-la/productos/trituradoras-y-alimentadores-estacionarios/automatizaci%C3%B3n-de-la-trituradora/>
- SARIEGO, J. L.; Reygadas, L., Gómez, M. Á., y Farrera, J. (1988). *El Estado y la minería mexicana. Política, trabajo y sociedad durante el siglo XX.* Primera edición. Distrito Federal, México: Fondo de Cultura Económica.
- SGM (Sistema Geológico Mexicano) (2007). *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2006.* Distrito Federal, México: Secretaría de Economía, Coordinación General de Minería. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2006.pdf

- SGM (Sistema Geológico Mexicano) (2011). *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2010*. Distrito Federal, México: Secretaría de Economía, Coordinación General de Minería. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/31741/anuario_2010.pdf
- SGM (Sistema Geológico Mexicano) (2017). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2016*. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2016_Edicion_2017.pdf
- SGM (Sistema Geológico Mexicano) (2018). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2017*. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2017_Edicion_2018.pdf
- SGM (Sistema Geológico Mexicano) (2019). *Anuario estadístico de la minería mexicana, 2018*. Pachuca, Hidalgo, México: Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2018_Edicion_2019.pdf
- Trolex (s/f). Sensores y sistemas para la minería. Cuando la seguridad es esencial. Recuperado de http://www.hegasaes.com/administrador/repositorio/file/trolex/trolex_mining.pdf
- VELLA, H. (19 de diciembre de 2017). The fourth industrial revolution: Bringing AI to mining. Mining Technology website. Recuperado de <https://www.mining-technology.com/features/fourth-industrial-revolution-bringing-ai-mining/>
- VOGEL-HEUSER, B., y Hess, D. (2016). Guest Editorial Industry 4.0: Prerequisites and visions. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 13(2): 411-413. DOI: 10.1109/TASE.2016.2523639
- World Economic Forum (2017). *Digital Transformation Initiative. Mining and Metals Industry*. Recuperado de <https://www.weforum.org/whitepapers/digital-transformation-initiative/>