

UNA REVISIÓN HISTÓRICA DE LA AUTOMATIZACIÓN DE LA MINERÍA EN MÉXICO

Ruth Robles^a y Guillermo Foladori^a

Fecha de recepción: 25 de abril de 2018. Fecha de aceptación: 25 de octubre de 2018.

<http://dx.doi.org/10.22201/iiec.20078951e.2019.197.64750>

Resumen. El auge minero en determinados periodos históricos se debe a la incidencia de varios factores, como son el precio de los metales, el desarrollo de la tecnología, y las políticas económicas y ambientales. El presente artículo reseña los principales periodos del desarrollo de la minería en México y profundiza en el más reciente: la aplicación de la automatización. La mayoría de los análisis sociales sobre la minería se enfocan en el concepto de neoextractivismo y hacen énfasis en las políticas económicas y los precios. La aportación de este estudio es sobre los datos de la revolución en las fuerzas productivas del sector minero, aspecto que puede ser igual de importante que los precios de los metales y la política económica en el sector para entender el contexto actual.

Palabras clave: minería; automatización; explotación de oro y plata; desarrollo tecnológico; empresas transnacionales; inversión extranjera.

Clasificación JEL: F21; F23; L72; O33; P12.

A HISTORICAL REVIEW OF MINING AUTOMATION IN MEXICO

Abstract. The increase of mining in certain historical periods can be attributed to the incidence of various factors, such as the price of metals, technological development, and economic and environmental policies. This paper reviews the most important periods of mining development in Mexico, examining in depth the most recent period: the implementation of automation. The majority of social analyses related to mining have focused on the concept of neo-extractivism and have emphasized economic policies and prices. This paper's contribution is a review of the data of the revolution in the mining sector's productive forces. This is an aspect that may be as important as metal prices and the sector's economic policies when seeking to understand the current situation.

Key Words: mining; automation; gold and silver exploitation; technological development; translational companies; foreign investment.

^a Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Correos electrónicos: ruthberumen@yahoo.com.mx y gfoladori@gmail.com, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el término neoextractivismo se utiliza para explicar el auge en la explotación de productos primarios en América Latina (García Zamora y Grinspun, 2015; Gudynas, 2009; Veltmeyer y Petras, 2015). Los minerales son un caso destacado en el contexto del neoextractivismo. El presente artículo participa en la discusión relacionada con las transformaciones que ha sufrido la economía minera en México, y ofrece información sobre el papel que desarrolla la tecnología en la explotación de oro y plata, sobre todo en las últimas tres décadas. La investigación sugiere que los cambios tecnológicos en el periodo antes señalado, junto con la elevación de los precios internacionales, son igual de importantes que las políticas económicas neoliberales para entender lo que se conoce como neoextractivismo.

La información sobre los cambios tecnológicos de las últimas décadas fue obtenida de las siguientes fuentes: 1) información bibliográfica; 2) más de diez entrevistas a proveedores de tecnología y empresarios del ramo minero,¹ y 3) Reunión Internacional de Minería Zacatecas 2018 (RIM, 2018).

La historia de la producción minera en México se puede agrupar en distintos periodos para su análisis.² Si se omite el largo periodo precolonial, donde los metales preciosos eran utilizados sobre todo con fines suntuarios, se puede identificar a dicho periodo como el primero donde la explotación del oro y la plata se realizó de manera sistemática, con el firme propósito de transformarlos en dinero.³ El proceso de producción de minerales metálicos, durante

¹ Se entrevistaron a proveedores de tecnología minera del ramo de: explosivos, equipos de rezagado y cargado, equipos de perforación, tecnología de flotación, equipos de laboratorio, software e industria 4.0. Así también, se entrevistaron a especialistas en ingeniería de rocas, personal de mantenimiento, gerentes de área y supervisores.

² En la historia económica, la tecnología siempre ha tenido un papel relevante. Marx, por ejemplo, señalaba: “lo que diferencia unas épocas de otras no es lo que se hace, sino cómo, con qué medios de trabajo se hace” (2010, p. 218). Marx refiere esta distinción a etapas económicas radicalmente diferentes, como modos de producción; sin embargo, la idea de la importancia de los cambios tecnológicos puede ser utilizada (con las reservas necesarias) para distinguir periodos, aun dentro del mismo modo de producción.

³ Aunque durante las últimas tres cuartas partes del siglo xx y lo que va del siglo xxi los metales preciosos no son utilizados en su mayoría como dinero, sino destinados en principio a usos suntuarios, la importancia que mantiene el oro como reserva de valor es clave, como lo demuestra el recurrir al oro como refugio de valor en crisis financieras, lo cual muestra que el papel del metal como dinero en su función de reserva de valor es un indicador más importante que el destino proporcional de su producción. En la actualidad cerca de 30% de la producción de oro es para reserva de valor en lingotes y monedas (Coulson, 2011; Geocomunes, 2017).

el periodo colonial, se basó en la explotación del trabajo indígena. Se tiene registro de que los sistemas de trabajo minero fueron, por orden cronológico, los siguientes: encomienda, esclavismo, trabajo forzado y trabajo a jornal (Bakewell, 1990).

El segundo periodo contempla el desarrollo e implementación de una nueva tecnología en la extracción, en el procesamiento y la fundición, así como en la expansión de la metalurgia a otros minerales; inicia durante el periodo del porfiriato y continúa hasta las primeras tres a cuatro décadas del siglo xx. Fue en este periodo que se abandonó el esquema mono-productivo colonial de explotación de metales preciosos, en particular el de la plata, para diversificarse en la producción de metales industriales, como los no ferrosos y los siderúrgicos (plomo, cobre, zinc, hierro y carbón) (Sariego *et al.*, 1988).

El tercer periodo se inauguró en la segunda posguerra, con el auge de la expansión minera a la explotación de minerales no metálicos (azufre, fluorita y barita) (Sariego *et al.*, 1988). Esta etapa, comprendida dentro del periodo de industrialización por sustitución de importaciones (ISI), hizo que se consolidara el sindicalismo minero, así como la intervención del Estado en el sector, donde el instrumento principal fue el programa de mexicanización de la minería.

El cuarto periodo de la minería mexicana se inauguró, según las periodizaciones más comunes que acentúan los cambios en las políticas gubernamentales como variable clave, en 1982 con la apertura de la economía a las políticas neoliberales (López y Eslava, 2013); y como una reacción contra el Estado intervencionista y de bienestar (Anderson, 2003). El periodo se caracterizó por la reforma al artículo 27 constitucional, la firma del Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN), y la promulgación de nuevas leyes como la agraria, la minera y la de inversión extranjera, que acabaron con el programa de mexicanización para dar paso a la presencia de grandes corporaciones transnacionales.⁴ Es también, el periodo en que comienza la automatización en los procesos productivos (Sariego *et al.*, 1988), un suceso que tiene su auge a finales de los años noventa hasta lo que va del siglo xxi.

El presente artículo se organiza en cuatro apartados, en la introducción se realiza una breve descripción de los distintos periodos por los que ha atravesado la minería en México. El segundo apartado describe, desde el punto de vista histórico, cómo se desarrolló la tecnología en los tres primeros periodos

⁴ En específico se modificó el artículo 27 constitucional, fracción iv, para permitir que las sociedades mercantiles por acciones (incluyendo el capital extranjero) pudieran ser poseedoras de terrenos rústicos para el cumplimiento de su objetivo (DOF, 1992).

de la minería, desde el periodo colonial, pasando por el porfiriato, hasta el periodo de industrialización por sustitución de importaciones (ISI). En el tercer apartado se explica cómo la revolución tecnológica iniciada en los años noventa provocó cambios radicales en todas las etapas del proceso de extracción de metales, los cuales han tenido implicaciones económicas significativas. Finalmente, en las conclusiones se comenta cómo la megaminería representa un quiebre productivo entre el siglo pasado y el presente.

2. PRIMEROS PERIODOS DEL DESARROLLO TECNOLÓGICO DE LA MINERÍA EN MÉXICO

En este apartado se abordan los tres primeros periodos de desarrollo tecnológico en la minería en México. En la época colonial, el sistema productivo se basaba casi en exclusivo en la extracción, el beneficio y el comercio de los metales preciosos, en especial de la plata. Los filones de mineral se explotaban mediante la excavación abierta, para luego ahondar a mayor profundidad, lo que llevó a construir túneles retorcidos y estrechos que causaron muchos problemas operacionales –*sistema de rata*, como se le conocía en la Nueva España. La primera mejora técnica consistió en la construcción de socavones y túneles inclinados que conectaban las galerías inferiores para facilitar la ventilación, el drenaje y la extracción de mineral. El primer socavón que se construyó para dar servicio a varias minas fue en 1556, en la montaña del Potosí (Bakewell, 1990).

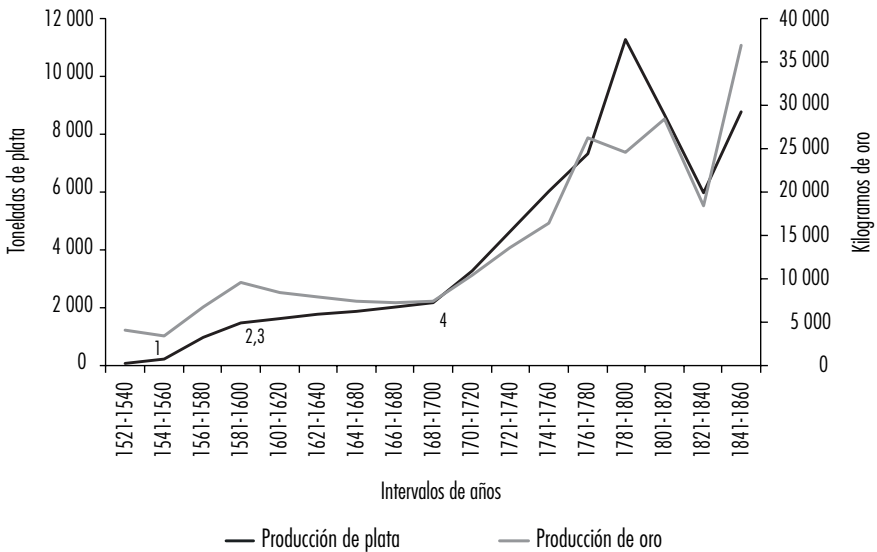
Mientras tanto, el uso de explosivos en la extracción minera data de 1627. Fue a partir de ese año, y hasta 1865, que se utilizó la pólvora negra (Konya y Walter, 1991). La perforación de grandes tiros y galerías fue consecuencia de la introducción de la pólvora en explosiones subterráneas. Al hacerse más profundos los tiros, fue necesaria la utilización de malacates para subir el mineral a través de ellos –mecanismos simples de una polea tirada por animales (Brading, 1975). Las técnicas de procesamiento también evolucionaron durante el dominio español. La fundición fue la primera aplicación tecnológica utilizada; mediante este procedimiento se refinaban pequeñas cantidades de mineral con altas concentraciones de plata (Ramos Ramírez, 2014).

Otra técnica de procesamiento de metales que se expandió con gran rapidez fue el beneficio con azogue o mercurio. Alrededor del año 1600, en la Nueva España existían 370 haciendas que las utilizaban para extraer plata (Bakewell, 1990). Esta técnica permitió aprovechar una amplia gama de minerales, junto con la trituración a base de molino de propulsión hidráulico o

animal, según la existencia de agua en el lugar. El agua también era utilizada para las operaciones de lavado en el proceso de amalgamación (Bakewell, 1976).

En retrospectiva, la explotación mineral durante la Colonia fue reducida en sus resultados debido al escaso desarrollo de las fuerzas productivas, si se la compara con las técnicas contemporáneas. Para dimensionar la cantidad de plata exportada a Europa durante el periodo colonial, se comparó la cantidad extraída entre 1521 a 1830, algo más de tres siglos, y que equivale a 56 144 kilogramos, con la producida de 2000 a 2010, es decir, tan sólo una década, equivalente a 33 465 kilogramos. De esta forma queda claro que en este último periodo se extrajo más de la mitad de plata que la que se obtuvo en 310 años de la época colonial (González Rodríguez, 2011). La gráfica 1 muestra el comportamiento de la producción de oro y plata durante la Colonia, y se puede apreciar que la introducción de una nueva tecnología coadyuvó a elevar la producción.

Gráfica 1. Producción de oro y plata durante la época colonial 1521-1821



Nomenclatura: 1) construcción de socavones (1556), 2) técnica de fundición (años 1600), 3) beneficio de metales con azogue (años 1600), y 4) pólvora negra (años 1700).

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010), Bakewell (1976, 1990) y Brading (1975).

El segundo periodo de producción minera, se enmarca durante el triunfo de la Reforma y el despojo de los bienes pertenecientes al clero que consolidaron una nueva aristocracia laica, poco emprendedora. La llamada hacienda porfiriana no representó un avance significativo sobre el modelo colonial, dado que no capitalizó otros procesos, y sólo explotó minerales preciosos de vetas ricas y poco profundas. Sin embargo, recurrió a las inversiones de capital internacional, sobre todo el estadounidense (Rosenzweig, 1988).

Con la apertura de la minería al capital extranjero dio inicio la consolidación de una nueva etapa tecnológica, que incrementó la productividad en la minería. Un aspecto a destacar fue el crecimiento de la red ferroviaria, pues de un total de 22 822 km de vías que se tenían en 1908, 16.4% (3 749 km) se consideraban caminos férreos exclusivos para la actividad minera (Sariego *et al.*, 1988). Esta situación contribuyó a disminuir los costos de acarreo de los minerales (Bernstein, 1964).

Otro cambio tecnológico importante que sustentó el auge minero en el periodo del porfiriato fue la introducción de la electricidad, cuyas primeras obras datan de 1889, aunque las instalaciones a gran escala se construyeron después de 1900 (Bernstein, 1964). La electricidad dentro de una mina se utiliza para la iluminación, el bombeo, el arrastre y el manto de cargas, así como el funcionamiento de compresores para la perforación y la ventilación (Sariego *et al.*, 1988).

Otra aplicación tecnológica posterior a la invención de la dinamita, por Alfred Nobel en 1865, fue el desarrollo de productos más energéticos que la pólvora negra, como las dinamitas gelatinosas, que fueron ampliamente utilizadas entre 1867 y 1950 (Konya y Walter, 1991).

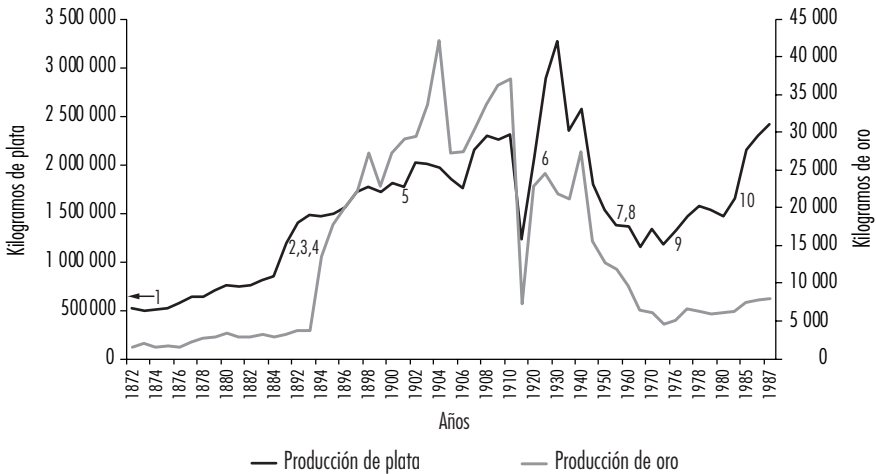
Durante la etapa del procesamiento del mineral destaca la construcción de varias fundiciones. Las primeras plantas que se construyeron en México, fueron en Monterrey y en Aguascalientes en 1891 y 1894, respectivamente. Vendrían después las de Velardeña, en Durango y Avalos, en Chihuahua, que en conjunto procesaban 40% del plomo y 20% de la plata producida en el país (Sariego *et al.*, 1988).

La introducción de la cianuración también fue un aspecto importante para aumentar la eficiencia de la metalurgia de metales preciosos, y pasó desde 60%, correspondiente a la amalgamación, hasta 92% (Sariego *et al.*, 1988). La introducción de esta técnica incrementó la producción nacional de oro de 1 477 kilogramos en 1891 a 41 420 kilogramos en 1910 (Bernstein, 1964). Hacia 1920 los óxidos y sulfuros de cobre, plomo y zinc, contenidos en las rocas, comenzaron a ser tratados por la flotación selectiva. Esta técnica permite la separación de compuestos metálicos mediante el uso de reactivos,

y se acompaña de lixiviación, molienda, trituración, filtrado y secado (Sariiego *et al.*, 1988).

En la gráfica 2 se puede apreciar el comportamiento de la producción minera de oro y plata durante el porfiriato y en la época ISI. En el caso de la producción de plata puede observarse que, después de 1891, con el inicio de las fundiciones, la producción comenzó a acelerarse junto con la adopción de la cianuración como el principal método de extracción, salvo en la coyuntura de 1905 generada por la reforma monetaria que colocó a México fuera del patrón monetario de la plata (Sariiego *et al.*, 1988).⁵ En el caso del oro la tendencia fue similar, sin embargo, su escala de producción fue menor a la de la plata.

Gráfica 2. Producción de oro y plata en el porfiriato (segundo periodo) y en la época de ISI (tercer periodo)



Nomenclatura: 1) dinamitas gelatinosas (1867), 2) electrificación (1889), 3) fundiciones (1891), 4) cianuración (1891), 5) mecanización simple (primeras décadas de 1900), 6) flotación (1920), 7) mecanización intensiva-maquinaria electromecánica y diésel (década de los cincuenta), 8) nitrate de amonio anfo (mediados de la década de los cincuenta), 9) mecánica de rocas (década de los setenta), 10) automatización (década de los ochenta).

Fuente: elaboración propia con base en INEGI (2010); Sariiego *et al.* (1988); Bernstein (1964); Konya y Walter (1991) y Ramírez y Alejano (2004).

⁵ A finales del siglo XIX cuando la equivalencia entre el oro y la plata comenzó a fluctuar debido a la depreciación constante de la plata, el valor del peso mexicano se tornó muy inestable, por lo que el gobierno decidió iniciar el cambio al patrón oro.

Durante la Revolución mexicana, la producción minera sólo se vio afectada durante los primeros años: la producción de plata se redujo de 2 305 748 a 1 230 750 kilogramos de 1910 a 1915 (INEGI, 2010), empero, esta situación se recuperó después de 1916, como respuesta al aumento de los precios durante la Primera Guerra Mundial (1914-1918) (Tello, 2008). Durante la Segunda Guerra Mundial, Estados Unidos fue el principal destino exportador de México, no sólo de minerales, sino también de productos agropecuarios y de manufacturas, los cuales superaron las exportaciones mineras (Tello, 2008). De hecho, la producción de plata disminuyó de 2 570 394 a 1 900 352 kg de 1940 a 1945, al igual que la de oro, de 27 468 a 15 530 kilogramos durante el mismo periodo (INEGI, 2010).

En el tercer periodo de producción minera, después de la posguerra, la actividad industrial se incrementó entre 1958 y 1970, sin embargo, la minería en su totalidad no representó más del 20% de las exportaciones. Para 1959, sólo aportó 5% del PIB, aunque México era el primer productor de plata del mundo, el segundo en azufre, fluorita y bismuto, el tercero en plomo y el cuarto en zinc y barita (Tello, 2008). La publicación de la Ley Reglamentaria del Artículo 27 Constitucional en Materia de Exploración y Aprovechamiento de Recursos Minerales de 1961, pretendió asegurar el control sobre el sector minero por parte del Estado y el capital nacional, para permitir el crecimiento de la minería y orientar la producción minera hacia la industria y el mercado nacional (Delgado Wise y Del Pozo Mendoza, 2001).

Mediante esta ley se exigía una participación mayoritaria de capital mexicano en las empresas mineras, es decir, sólo se otorgaban concesiones de explotación cuando la participación mexicana ascendía al 51% o más. La mexicanización se aceleró a través de las reducciones fiscales, a tal grado que para 1971 el capital mexicano participaba de forma mayoritaria en casi todas las empresas mineras; aunque nunca se eliminó en su totalidad el capital extranjero (Urías, 1980). En términos productivos, la mexicanización no tuvo progresos muy significativos, excepto en la producción de carbón, cobre y hierro, en tanto que los volúmenes de metales como plata, plomo y zinc se mantuvieron estancados (Delgado Wise y Del Pozo Mendoza, 2001).

Desde la década de los cincuenta, se inició la introducción de maquinaria electromecánica y diésel en la minería, lo que permitió la explotación de reservas de baja ley o tajos a cielo abierto, facilitada por el uso de maquinaria de gran capacidad, lo que hizo redituable la extracción y el procesamiento de minerales con poca concentración de metales. Esta época marca el inicio de la mecanización intensiva, así como la desprofesionalización del trabajo obrero. El propósito es la sustitución progresiva del trabajo manual y

la mecanización simple iniciada en las primeras décadas del siglo xx (Sariego *et al.*, 1988).

Las operaciones extractivas y de procesamiento involucraron maquinaria en sus diversas actividades como: barrenadoras, cargadores de explosivos, resagadores, amacizadores, equipos de acarreo, transportes, equipos de ventilación y desagüe, quebradoras, molinos, celdas de flotación, entre otros. La mecanización alcanzó prácticamente todas las etapas del ciclo productivo.

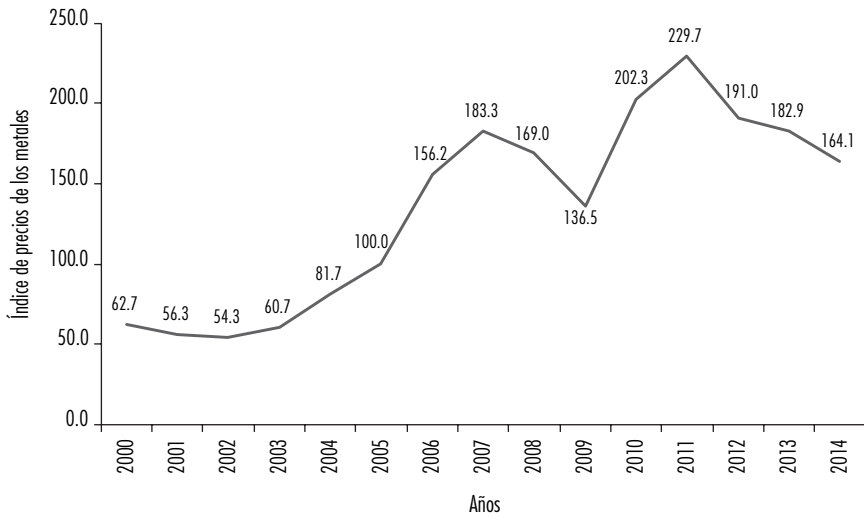
El desarrollo de la mecánica de rocas permitió comprender el comportamiento de las rocas, y con ello, mejorar la planeación de las operaciones mineras. Esta ciencia nace al final de la Segunda Guerra Mundial, aunque se desarrolla con mayor intensidad a partir de la década de los setenta (Ramírez y Alejano, 2004). Fue a mediados de los años cincuenta cuando surgió en el mercado un nuevo explosivo, formulado con nitrato de amonio y diésel, llamado *anfo*, un producto mucho más económico que la dinamita y que inundó el mercado de extracción de minerales (Konya y Walter, 1991). Posteriormente, durante las décadas de los años sesenta y setenta, se produjeron nuevos productos llamados hidrogeles y emulsiones, que sustituyeron a la dinamita en todos los sectores industriales (Konya y Walter, 1991).

3. CUARTO PERIODO: AUTOMATIZACIÓN

El cuarto periodo inició a principios del siglo xxi con el aumento de los precios internacionales de los metales, en pleno auge de la política económica neoliberal (véase gráfica 3). En México, este aumento incrementó la producción de diversos metales como el oro y la plata (véanse gráficas 4 y 5).

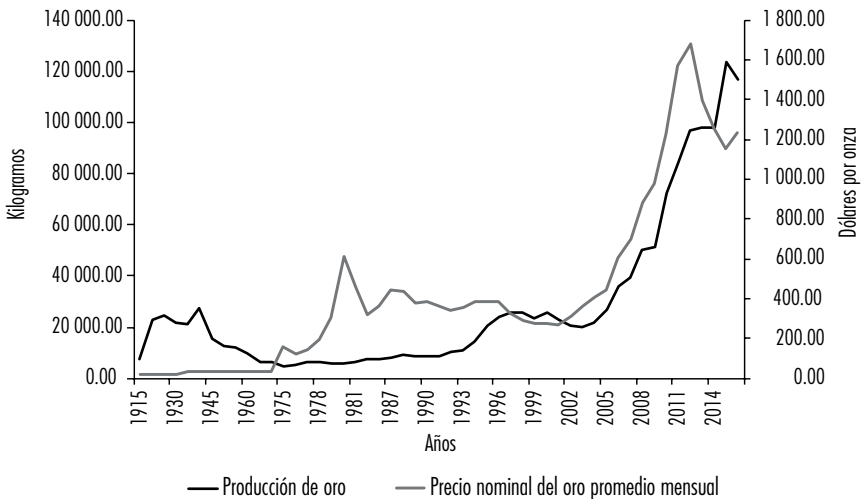
Si bien las políticas gubernamentales para favorecer la inversión extranjera en la minería facilitaron el control de enormes territorios en los diversos países de América Latina, una revisión de los cambios tecnológicos que sucedieron a partir de la década de los noventa, y que están asociados a la minería de cielo abierto, muestran un cambio significativo en los procesos productivos en casi todas sus etapas, lo cual significó un aumento sustancial de la productividad del trabajo en el ramo, tal vez capaz de llevar a las corporaciones mineras a los más remotos lugares del mundo con relativa independencia de las políticas neoliberales que les facilitaron el acceso; aunque en algunos casos el apoyo político fue imprescindible.

Gráfica 3. Índice de precios de los metales 2000-2014 (2005 = 100)



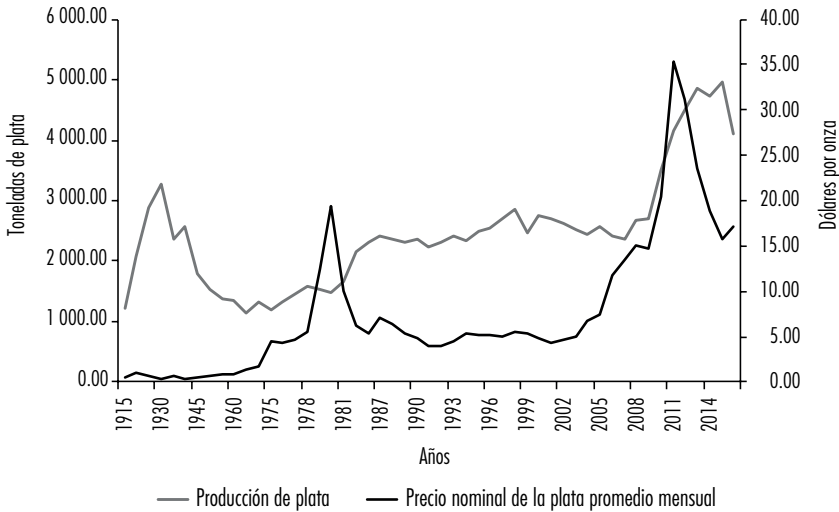
Fuente: Fondo Monetario Internacional citado por SGM (2015).

Gráfica 4. Producción de oro en kilogramos años 1915-2016 *versus* precio nominal promedio mensual por onza en dólares



Fuente: elaborada con base en INEGI (2010) (años 1915-2008), CAMIMEX (2017a) (años 2009-2016) y Macro Trends (2018).

Gráfica 5. Producción de plata en toneladas años 1915-2016 *versus* precio nominal promedio mensual por onza en dólares



Fuente: elaboración con base en INEGI (2010) (años 1915-2008), CAMIMEX (2017a) (años 2009-2016) y Macro Trends (2018).

La Tercera Revolución Industrial, y una cuarta aún en desarrollo, facilitaron el diseño de los procesos automáticos. En la minería, estos sucesos dieron lugar a una revolución tecnológica acaecida desde los años noventa. Tal vez este sector no sea uno de los sectores líderes en la implementación de procesos automáticos, pero sí es un ramo donde ya se perciben estos cambios desde hace dos décadas.

La automatización efectiva en todos los procesos productivos requiere de la integración de tres componentes esenciales: 1) detección de información sobre el funcionamiento de la maquinaria y equipo, 2) procesamiento de dicha información, y 3) control. En ausencia de sistemas automatizados, las operaciones mineras tienen que ser controladas a cortas distancias para garantizar su desarrollo eficiente. Esta situación puede presentar diversos tipos de peligros al personal, como es la proximidad a poderosas máquinas, la exposición a fuerzas hidráulicas y eléctricas, la caída de rocas, y la exposición a polvos y gases provenientes de los explosivos. Las empresas mineras reconocen que estos peligros, además de amenazar la seguridad de sus trabajadores, disminuyen su índice de producción. Aunque el desarrollo de sistemas automatizados inició desde los años setenta, sus frutos se consolidaron hasta el presente siglo (Ralston *et al.*, 2014).

Una mina por completo automatizada integra tres capas tecnológicas que interactúan continuamente: la primera se compone de equipos mineros dotados con componentes electrónicos como sensores inteligentes. Dentro de estos equipos se encuentran perforadoras, resagadores, cargadores y transportes. La segunda, se integra por un sistema de comunicación, y la tercera, por una plataforma inteligente capaz de controlar y planificar el proceso (Li y Zhan, 2018).

La clave para entender esta Revolución Industrial en el sector minero está en la aplicación de las tecnologías de la micro-opto-electrónica y el satélite a la gran mayoría de dispositivos, instrumentos, maquinaria y procesos de monitoreo y control. Los *mems* (micro-electric-mechanical-system) que están en la base de la tecnología microelectrónica, permiten miniaturizar dispositivos por debajo del micrómetro, y en algunos casos en tamaño nanométrico, con propiedades de movimiento mecánico usados ampliamente en sensores, actuadores y convertidores de energía. Mucha de la tecnología desarrollada de manera acumulativa, pasó en una o dos décadas, a partir de fines de los años ochenta, a dar un salto cualitativo, al reducir los equipos, conectarlos entre sí, acelerar el proceso de análisis, distanciar la exploración del objeto (satélite) y permitir un monitoreo y decisiones con la información en tiempo real de todo el proceso en su conjunto.

Este salto cualitativo, es el resultado de diversos factores, entre los que se encuentran el abaratamiento de diversos componentes electrónicos como los sensores, así como también el desarrollo de plataformas de análisis de datos con sus respectivas interfaces de visualización. El aumento del número de sensores colocados en la maquinaria y el equipo aumentó el volumen, la variedad, la velocidad y el valor de la generación de datos. Este acontecimiento propició la necesidad de desarrollar servicios para almacenar, procesar y analizar grandes cantidades de datos en tiempo real, dentro de las mismas empresas mineras (aunque también existe la posibilidad de contratar este servicio en empresas especializadas) (Hashem *et al.*, 2015).

La revolución tecnológica de la minería también condujo a la reducción significativa de los equipos. En geofísica, por ejemplo, el antiguo analizador portátil de minerales XRF (X-Ray Fluorescence) de fines de los años ochenta pesaba más de 30 kilogramos (Cufari, 2016). En los años noventa se produjo el equipo Niton XRF manual y de mayor capacidad de análisis que sólo pesaba un kilogramo y medio (Thermo Scientific, *s/f*).⁶ Mediante sofisticados sensores es posible hoy en día realizar mediciones gravimétricas para detectar

⁶ Las modernas versiones se utilizan hoy en día en muchas áreas, como la detección de plomo en las pinturas.

mínimas variaciones en el campo gravitacional de la tierra e identificar zonas con minerales más pesados; y métodos ópticos por láser permiten medir desde dispositivos aéreos la topografía de la superficie de la tierra con precisión altimétrica de entre 5 a 20 centímetros (Jébrak y Vaillancourt, 2012).

La cara más conocida de la revolución tecnológica de los años noventa en la minería son las explotaciones a cielo abierto. Aunque si bien dicha modalidad ya existía, y en gran escala se desarrolló desde mediados del siglo xx con algunos minerales y en determinados países, no es en la misma forma en que comenzó a ocurrir desde los años noventa, pues se sumó —al tamaño y a la visibilidad de explotación a cielo abierto— la interconexión de todas las etapas y de todos los procesos productivos de manera sistemática, y automatizada, lo que contrasta con las explotaciones anteriores que, con independencia del tamaño, se basaban en islas independientes de producción para las diferentes fases del proceso productivo.

Una de las principales barreras naturales para la inversión de capital en la minería es el espacio, que es una variable clave en varios aspectos como la ubicación geográfica y de distancia de poblaciones, puertos, y vías de comunicación; el clima, la topografía, y las características geológicas del suelo; la *ley de corte* o menor cantidad de mineral que puede tener el material retirado para ser rentable su explotación en relación al material de desecho o estéril. Además, otro aspecto clave del espacio, es el entorno del material extraído. Aquí la diferencia radical está entre las minas en profundidad, que deben trabajar con relativamente reducido equipo, utilizando maquinaria en condiciones de espacio limitado, aire enrarecido, eventuales gases tóxicos, con necesidad de mantenimiento regular de las paredes y de los techos de los socavones y pozos, y demás ajustes a lo limitado del espacio.

Las restricciones antes mencionadas son superadas con la explotación a cielo abierto, donde la cantidad y el tamaño de la maquinaria no se enfrentan a restricciones significativas; el espacio no es obstáculo para la movilización del capital fijo y los insumos, tampoco para el movimiento de la materia prima extraída y los residuos. En términos comparativos, por ejemplo, una vez realizadas las excavaciones cuando la mina es en profundidad, la cantidad de material estéril retirado tiene que ser insignificante, en relación a la enorme cantidad que es retirada sistemáticamente de la mina a cielo abierto. La restricción de espacio que existe en el pozo en profundidad no se da en la explotación a cielo abierto, lo cual abarata significativamente los costos.

Esta diferencia, que es técnica, se transforma en económica porque permite un trabajo más intensivo, y con ciclos de rotación del capital más rápido en las minas a cielo abierto, y ha sido decisiva para la transición de la explo-

tación en profundidad a la explotación a cielo abierto allí donde es posible técnicamente. Sin embargo, para que las explotaciones a cielo abierto sean rentables, considerando que en la mayoría de los casos la cantidad de mineral por materia estéril es menor porque las zonas con alta ley ya fueron explotadas, debió surgir toda la tecnología de sensores y automatización.

El paso de la mina en profundidad a la mina a cielo abierto implica un escalamiento en el nivel de inversión de capital. La mina a cielo abierto requiere de mayores inversiones de capital para que sea rentable; de allí que las modernas explotaciones sean realizadas por corporaciones transnacionales de gran calibre económico, y en zonas donde la ley de corte garantiza la recuperación del capital invertido y las ganancias correspondientes antes del agotamiento de la mina, lo cual obliga a una evaluación preliminar muy detallada del potencial productivo (exploración) y de los costos y beneficios, ambos basados en sofisticados equipos y técnicas, utilizando gran cantidad de variables (Herrera Herbert y Pla Ortiz de Urbina, 2006).

La explotación a cielo abierto en gran escala tiene antecedentes que pueden rastrearse hasta mediados del siglo xx, en Estados Unidos de América, cuando se inauguró para la explotación de carbón, primero en Ohio y luego se extendió a otros estados. La clave en este caso fue la utilización de enormes máquinas que se adaptaban a las condiciones de suelos relativamente blandos, en comparación con materiales más duros donde se asientan otro tipo de minerales. Enormes máquinas, como *The Tiger*, *The Mountaineer*, *The GEM of Egypt* o *The Silver Spade* fueron utilizadas en las minas de carbón entre los años cincuenta y los años setenta. Alguna con capacidad para levantar al mismo tiempo el equivalente de entre dos y tres autobuses de tierra de una sola palada. *The Mountaineer* podía cargar 100 toneladas de tierra por palada; mientras que la *GEM of Egypt*, de 1967, con un peso de 700 toneladas recogía 200 toneladas de tierra por palada (Doyle, 2014). Pero esta tecnología funcionaba de manera aislada, y no estaba encadenada a las otras etapas del proceso de producción como ocurre con la moderna megaminería. Diversos autores coinciden en la existencia de una serie de ventajas del método a cielo abierto sobre las minas en profundidad:

Mejor recuperación del volumen de mineral explotable, planificación más flexible a medida que progresa el tajo, la disminución de los niveles de riesgo en el trabajo, la mecanización que no tiene límite en cuanto a la dimensión de los equipos, el menor esfuerzo físico de los trabajadores, la más alta productividad, los mayores tonelajes por voladura, la práctica inexistencia de problemas de ventilación, y los más bajos costes por tonelada movida (Herrera Herbert y Pla Ortiz de Urbina, 2006).

Como contraparte, el mismo autor señala las siguientes desventajas: “las inversiones en equipos son cuantiosas y las cargas financieras son altas, el equipo es más sofisticado y necesita una mano de obra más calificada, los agentes atmosféricos naturales tienen un fuerte impacto (lluvia, nieve, niebla), los frentes de trabajo deben estar mejor organizados, se generan importantes impactos en el entorno que deben ser corregidos por medio de una restauración a veces onerosa” (Herrera Herbert y Pla Ortiz de Urbina, 2006). Tanto ventajas como desventajas coinciden en que el método a cielo abierto sólo puede ser realizado gracias a enormes inversiones.

La revolución tecnológica de los años noventa provocó un cambio radical en todas las etapas del proceso de extracción de metales.⁷ En la exploración, por ejemplo, avances en la espectrometría llevaron a poder analizar simultáneamente docenas de elementos y, en el caso de ciertos metales, hasta medir la cantidad de miligramos del mineral por tonelada (Jébrak y Vaillancourt, 2012). El analizador de rayos-X por fluorescencia se hizo manual y más potente, lo que evitó llevar muestras al laboratorio.

La composición de la tierra y de la atmósfera se puede hacer por vía satelital (Avisis optical sensor) desde 1997. El satélite permite sensoramiento remoto para identificar y medir la composición de la tierra y de la atmósfera mediante análisis de una amplia gama de radiación electromagnética, y realizar mapas de rocas, lo cual facilita la exploración en áreas de difícil acceso. Los más modernos métodos de balance de masa aplican técnicas analíticas sofisticadas para calcular la cantidad de los elementos químicos que se agregaron o desplazaron de una roca durante su formación, pudiendo evaluar la distancia del sitio de análisis respecto del local de mineralización (CONSOREM, s/f).

Los sistemas de información geográfica (GIS) hicieron obsoletos los planos físicos, y tuvieron su auge a finales de los años ochenta junto a los computadores personales y los satélites de captación de información geográfica como Landsat (Smith, 1995), y la ubicación en campo con los GPS. El Servicio Geológico Mexicano (SGM) inició su programa de cartografía minera-geoquímica en 1995.

El avance de la cartografía geológico-minera a escala 1:50,000 es del 34% del territorio nacional a diciembre de 2012, esto es, 667,037 km² enfocados principalmente en los terrenos geológicos con mayor viabilidad para el desarrollo de

⁷ Los principales avances tecnológicos en minería de los últimos años están listados en Jébrak y Vaillancourt (2012).

proyectos mineros, lo que significa que se tiene cartografiado (esencialmente explorado) el 49% de la superficie viable de contener yacimientos minerales (DOF, 2014, p. 17).

Otros softwares miden y elaboran mapas de estrés de las rocas, para identificar las fracturas con potenciales yacimientos de oro, o para otros fines, como el software Tensor cuya primera versión fue de 1993 (*e.g.* Delvaux, *s/f*). Métodos geoquímicos permiten detectar yacimientos más profundos mediante el análisis de la superficie (Jébrak y Vaillancourt, 2012).

Diversos camiones y medios de transporte de carga y retirada de material como tractores mototrallas, retroexcavadoras, dragalinas, camiones de carga, han sido potenciados con sistemas interconectados de datos, creados para economizar combustible y mejorar el desempeño (Daniels, 2017). Varios adoptan el sistema modular (Modular, *s/f*), que permite convertir camiones en convoyes, ofrecer rápidas reparaciones *in situ*, inclusive cambios del motor en poco tiempo,⁸ o reparación de bandas de transporte que, por su peso y localización, obligaban a parar el proceso de producción.

Se utilizan móviles con baterías eléctricas y motores alternativos para impedir que un desperfecto requiera la retirada del local del equipo para mantenimiento. Estos sistemas modulares conectan en una sola base de datos todo el funcionamiento de la mina, y permiten monitorear en tiempo real el funcionamiento de todo el equipo. Otros equipos de seguridad laboral, control de emisiones al ambiente también están siendo aplicados con nuevas tecnologías (Jébrak y Vaillancourt, 2012).

De entre la maquinaria para extracción de mineral las conocidas como minería de superficie marcan un momento histórico. Se trata de potentes máquinas que cortan capas de la roca sobre la cual transitan, la trituran y la envían a un convoy para procesamiento. Cuentan con niveles de precisión que permite ajustarlas a las características de la roca y las vetas del mineral. Una de las primeras fue la 3000 SM surface miner de Wirtgen, vendida en 1983 (Wirtgen GmbH, *s/f*); para principios del siglo XXI fueron mejoradas y hoy en día se encuentran varias marcas en el mercado. Estas máquinas realizan simultáneamente tres procesos (corte, trituración, carga al depósito), que antes se hacían de manera separada. Dependiendo de la máquina, pueden tener un ancho de algo más de tres metros, y cortar más de 50 centímetros de profundidad. La Vermeer T1255TL Terran Leveler Commander III, de 600

⁸ Véase, por ejemplo, ETF (*s/f*) y Wirtgen GmbH (*s/f*).

caballos de fuerza, corta hasta 3.66 metros de ancho y 81 centímetro de profundidad (Machinery Trader, 2018). Toda la maquinaria se ha revolucionado en 10 o 15 años.

Sistemas integrados de cientos de sensores permiten un control exhaustivo del desempeño de la maquinaria, aumentando su productividad mediante el acceso a bancos de datos manejados por softwares especializados. Algunos de los sistemas son Caterpillar's MineStar®, IntelliMine®, KOWA®, CENSE®, Contro-nic Monitoring System®, TRIPS® (Ataman y Golosinski, 2001).

Las innovaciones se dan entre finales de la década de los noventa y la primera década del siglo XXI. A juzgar por estos avances tecnológicos de los últimos 25 años, y los que están en investigación, puede afirmarse que existe una profunda transformación tecnológica en el sector de la minería.

Más del 90% de la producción de los principales minerales metálicos en México se lleva a cabo por grandes corporaciones transnacionales que utilizan este tipo de tecnología. Dentro de estas corporaciones están Goldcorp, Fresnillo plc, Minera Frisco, Peñoles, Agnico Eagle, Pan American Silver y Grupo México. El cuadro 1 muestra el resultado de una investigación en curso sobre la aplicación de la automatización en la minería en México, los datos dan cuenta de la presencia de estas tecnologías en todas las etapas del proceso de producción.

El resultado del aumento en los precios de los minerales, de la revolución tecnológica, y de los cambios legislativos favorables al ingreso de capital extranjero, incrementó la explotación del suelo y subsuelo en México. Para 2016, el Registro Público de Minería registró un total acumulado de 25 652 títulos de concesión minera vigentes que amparaban una superficie de 25.1 millones de hectáreas, lo cual corresponde al 11.3% del territorio nacional (SGM, 2017). Este porcentaje representa un aumento en la superficie explotada de 627.5% respecto de 2010, cuando la superficie explotada era 4 millones de hectáreas (SGM, 2011). La Ley Minera establece que: "Toda concesión, asignación o zona que se incorpore a reservas mineras deberá referirse a un lote minero, sólido de profundidad indefinida, limitado por planos verticales y cuya cara superior es la superficie del terreno, sobre la cual se determina el perímetro que comprende" (DOF, 2014).

Pese a que la minería continúa siendo uno de los sectores productivos más importante en el país, la inversión nacional en el sector mantiene una tendencia a la baja desde 2012, año en el que se registró el máximo histórico con un valor de 8 043 millones de dólares. Durante el 2017, se invirtieron 4 302 millones de dólares, 14.7% más de lo invertido en 2016, no obstante, este valor aún se encuentra lejos del máximo histórico (CAMIMEX, 2018).

Cuadro 1. Ejemplos de tecnologías de automatización, control y monitoreo utilizadas en las diferentes etapas del proceso minero

<i>Etapas</i>	<i>Equipo</i>	<i>Marca</i>	<i>Procedencia</i>
Exploración	Vulcan, una plataforma común para los equipos geotécnicos y de ingeniería.	Maptek	Australia
Extracción de mineral	Rig Control Systems (RCS), sistema de control para perforadoras.	Atlas CopCo	Suecia
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.	Atlas CopCo	Suecia
	Plataforma Mobilaris, un sistema que muestra información 3D en tiempo real de los procesos mineros subterráneos.	Atlas CopCo	Suecia
Trituración y molienda	Sistema de control de ajustes automáticos ASRi™ 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 - Estados Unidos de América
	QCX/RoboLabs, sistema de análisis de muestras de laboratorio con equipos automatizados.	FLSmidth's	Dinamarca - Estados Unidos de América

Fuente: elaboración propia con base a Maptek (2015); Mining & Construction (2014); Epiroc (2016); Mining & Civil Engineering (2018); Sandvik (s/f); FLSmidth (2018a, 2018b).

En tanto, la inversión extranjera directa en el rubro de la minería también ha tenido grandes fluctuaciones durante los últimos años. Su máximo nivel lo alcanzó en 2013, con un valor de 5 265 mil millones de dólares, sin embargo, esta inversión no se mantuvo, pues disminuyó a 2 123 millones de dólares (40%) el siguiente año. Estadísticas de la Secretaría de Economía indican que para 2016 se registró una inversión de 718 millones de dólares, 86.4% menos con respecto a 2013 año de mayor inversión (CAMIMEX, 2017c).

A pesar de que se tuvo una disminución de la inversión nacional y de la inversión extranjera directa en el sector minero durante la última década, si se revisan los porcentajes anuales de inversión en equipo por parte de las empresas afiliadas a la Cámara Minera de México (CAMIMEX) durante los últimos 10 años, se observa que este porcentaje es uno de los más importantes, y fluctúa

alrededor de la quinta parte del total invertido. El año con mayor inversión en equipo durante este periodo fue 2008 con un valor de 30.6% del total invertido (CAMIMEX, 2009).

Un segundo resultado de la revolución tecnológica es la concentración del capital. Las grandes empresas han desplazado a la pequeña y mediana minería hasta convertir en insignificante su participación en este sector. En la minería de oro, por ejemplo, datos de CAMIMEX para 2016, señalan que 60% de la producción de oro fue resultado de tres empresas (Fresnillo plc, Goldcorp, y Minera Frisco) (CAMIMEX, 2017b). Contrasta la mediana minería que sólo registra 1.03% del total nacional, y la pequeña minería con 0.01% del total nacional (SGM, 2017).

En el caso de la plata la situación es semejante. CAMIMEX reporta que para 2016, el 57% de la producción se concentraba en cinco empresas (Fresnillo plc, Golcorp, Peñoles, First Majestic y Pan American Silver); siendo la primera la que concentra 26% del total (CAMIMEX, 2017b). La mediana minería, por su parte, sólo produjo en 2016 el 3.22% y la pequeña minería el 0.25% del total nacional (SGM, 2017).

4. CONCLUSIONES

Una de las características más notorias del desarrollo de la minería durante el quiebre del siglo pasado y el presente es lo que se conoce como el bum de la megaminería, con métodos automatizados y de explotación a cielo abierto cuando resulta técnicamente posible. A este periodo también se le ha llamado de neoextractivismo, relacionándolo con las políticas neoliberales de apertura a la inversión extranjera, mismas que han facilitado el avance de las grandes corporaciones mineras internacionales en la apropiación de enormes superficies en la mayoría de los países de América Latina donde los minerales abundan. Esta interpretación enfatiza el aspecto de la política gubernamental e identifica a América Latina, aunque con reservas y mostrando las diferencias, tanto a gobiernos orientados claramente al libre mercado como a gobiernos populistas.

La revisión sobre las etapas históricas en el desarrollo de la minería en México, enfatizando los cambios tecnológicos y las características de las más recientes transformaciones tecnológicas, en correlación a los precios internacionales, permiten desarrollar la hipótesis de que el proceso de megaminería, así como de explotaciones a cielo abierto son resultado tanto de los avances

materiales en el desarrollo de las fuerzas productivas como del aumento de los precios, así como de la aplicación de las políticas gubernamentales. Para apoyar esta hipótesis en el presente análisis se utilizó información correspondiente a la minería del oro y la plata en México.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, P. (2003), “Capítulo I. Neoliberalismo: un balance provisorio”, en *La trama del neoliberalismo. Mercado, crisis y exclusión social*, Buenos Aires, Argentina, CLACSO, Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales. Disponible en <<http://biblioteca.clacso.edu.ar/clacso/se/201006-09031734/4anderson.pdf>>
- Ataman, I. K. y Golosinski, T. S. (2001), *Knowledge Discovery in Mining Truck Condition and Performance Databases*. Presentado en 17 International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET. Disponible en <http://www.maden.org.tr/resimler/ekler/f65caf0a7d00afd_ek.pdf>
- Bakewell, P. J. (1976), *Minería y sociedad en el México colonial: Zacatecas (1546-1700)*, 1ª edición, España, Fondo de Cultura Económica.
- _____ (1990), “La Minería en la Hispanoamérica Colonial”, en *Historia de América Latina Tomo 3*, España, Editorial Crítica. Recuperado de <<https://jorgecaceresr.files.wordpress.com/2010/05/tomo-3.pdf>>
- Bernstein, M. D. (1964), *The Mexican Mining Industry 1890-1950*, United States of America, State University of New York.
- Brading, D. A. (1975), *Mineros y comerciantes en el México borbónico (1763-1810)*, 1ª edición, España, Fondo de Cultura Económica.
- CAMIMEX (2009), *Situación de la minería en México 2008. CAMIMEX Informe Anual 2009*. Cámara Minera de México. Disponible en <<https://www.camimex.org.mx/files/3414/3700/5364/2009.pdf>>
- _____ (2017a), *Estadísticas. CAMIMEX Informe Anual 2017*. Cámara Minera de México. Disponible en <<https://www.camimex.org.mx/files/2615/0092/9348/05-Info17.pdf>>
- _____ (2017b), *Informe de los Grupos. CAMIMEX Informe Anual 2017*. Cámara Minera de México. Disponible en <<https://camimex.org.mx/files/6315/0058/3952/07-Info17.pdf>>
- _____ (2017c), *Situación de la minería en México 2016. CAMIMEX Informe Anual 2017*. Cámara Minera de México. Disponible en <<https://www.camimex.org.mx/files/9515/0058/4028/02-Info17.pdf>>

- _____ (2018), *Situación de la minería en México 2017. CAMIMEX Informe Anual 2018*. Cámara Minera de México. Disponible en <https://www.camimex.org.mx/files/4415/3073/8309/02_info_2018.pdf>
- CONSOREM (s/f), *Consortium de recherche en exploration minérale*. Disponible en <<http://www.consorem.ca/>>
- Coulson, M. (2011), *Insider's Guide to the Mining Sector: an In-Depth Study of Gold and Mining Shares*, Petersfield, Harriman House. Disponible en <<http://public.eblib.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=3299702>>
- Cufari, B. (2016), *Evolution of Handheld XRF Analysis in Mining*. Disponible en <<https://www.azomining.com/Article.aspx?ArticleID=1344>>
- Daniels, R. (2017), *The Advantages of Open Pit Mining*. Disponible en <<https://sciencing.com/advantages-open-pit-mining-7218839.html>>
- Delgado Wise, R. y Del Pozo Mendoza, R. (2001), “Minería, Estado y gran capital en México”, *Economía e Sociedad*, 16, junio.
- Delvaux, D. (s/f), *Tensor Program*. Disponible en <<http://www.damiendelvaux.be/Tensor/tensor-index.html>>
- DOF (1992), Decreto por el que se reforma el artículo 27 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos. Disponible en <http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4643312&fecha=06/01/1992>
- _____ (2014), Acuerdo por el que se aprueba el Programa de Desarrollo Minero 2013-2018. Disponible en <http://www.dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5344070>
- Doyle, J. (2014), *Giant Shovel on I-70*. Disponible en <<http://www.pophistorydig.com/topics/tag/surface-coal-mining-history/>>
- Epiroc (2016), *Atlas Copco lanza el nuevo sistema de monitorización de equipos, Certiq*. Disponible en <<https://www.epiroc.com/es-mx/newsroom/2016/atlas-copco-launches-new-machine-monitoring-system-certiq>>
- ETF (s/f), *ETF Mining Equipment*. Disponible en <<http://www.etfrucks.eu/>>
- FLSMIDTH (2018a), *Automatización de laboratorios*. Disponible en <http://www.flsmidth.com/-/media/Brochures/Brochures%20for%20Automation/RoboLab_Minerals_ES.ashx>
- _____ (2018b), *FLSMIDTH-Advanced Process Control*. Disponible en <<http://www.flsmidth.com/en-us/Industries/Categories/Products/Electrical+and+Automation/Advanced+Process+Control/Advanced+Process+Control/ProcessExpert+Cement>>
- García Zamora, R. y Grinspun, R. (eds.) (2015), *Megaminería, extractivismo y desarrollo económico en América Latina en el siglo XXI*, 1ª edición, México, Universidad Autónoma de Zacatecas-MAPORRÚA, Librero-Editor.

- Geocomunes (2017), *Amenaza neoliberal a los bienes comunes: panorama nacional de megaproyectos mineros*. Disponible en <http://geocomunes.org/Analisis_PDF/Mineri%CC%81a%20A%20lectura>
- González Rodríguez, J. de J. (2011), *Minería en México. Referencias generales, régimen fiscal, concesiones y propuestas legislativas*. Documento de Trabajo núm. 121. Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. Disponible en <<http://www3.diputados.gob.mx/camara/content/view/full/258443>>
- Gudynas, E. (2009), “Diez tesis urgentes sobre el nuevo extractivismo”, en *Extractivismo, política y sociedad*, CAAP y CLAES. Disponible en <<http://www.gudynas.com/publicaciones/GudynasNuevoExtractivismo10Tesis09x2.pdf>>
- Hashem, I. A. T., Yaqoob, I., Anuar, N. B., Mokhtar, S., Gani, A. y Ullah Khan, S. (2015), “The Rise of ‘big data’ on Cloud computing: Review and Open Research Issues”, *Information Systems*, 47. Disponible en <<https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006>>
- Herrera Herbert, J. y Pla Ortiz de Urbina, F. (2006), *Métodos de Minería a Cielo Abierto*, Madrid, Universidad Politécnica de Madrid. Departamento de Explotación de Recursos Minerales y Obras Subterráneas. Disponible en <<http://oa.upm.es/10675/>>
- INEGI (2010), *Estadísticas históricas de México 2009*, México, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en <http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/integracion/pais/historicas10/EHM2009.pdf>
- Jébrak, M. y Vaillancourt, J. (2012), *100 Innovations in the Mining Industry* (Minalliance), Montreal, PDAC & The Mining Association of Canada. Disponible en <http://www.oma.on.ca/en/ontariomining/resources/minalliance_100_innovations_en.pdf>
- Konya, C. J. y Walter, E. J. (1991), *Rock Blasting and Overbreak Control*, National Highway Institute. Disponible en <<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/012844.pdf>>
- Li, J. y Zhan, K. (2018), “Intelligent Mining Technology for an Underground Metal Mine Based on Unmanned Equipment”, *Engineering*, 4(3), DOI <<https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.05.013>>
- López, F. y Eslava, M. (2013), *El mineral o la vida. Legislación y políticas mineras en México*, 1ª edición, México, Itaca.
- Machinery Trader (2018), *VERMEER T1255 COMMANDER III*. Disponible en <<https://www.machinerytrader.com/listings/construction-equipment/for-sale/list/category/1058/trenchers-boring-machines-cable-plows/manufacturert/vermeer/model-group/t1255>>

- Macro Trends (2018), *MacroTrends Economic Charts and Historical Data*. Disponible en <<http://www.macrotrends.net/1470/historical-silver-prices-100-year-chart>>
- Maptek (2015), *Vulcan. Software de planificación minera y modelado en 3D*. Disponible en <https://www.maptek.com/pdf/es/vulcan/Maptek_Vulcan_Overview_esp.pdf>
- Marx, K. (2010), *El capital. Crítica de la economía política*, vol. 1, tomo 1, España, Siglo XXI de España Editores. Disponible en <<https://filosinsentido.files.wordpress.com/2013/07/77588940-karl-marx-el-capital-vol-i.pdf>>
- Mining & Civil Engineering (2018), *Mobilaris Mining Intelligence*. Disponible en <<https://www.mobilaris.se/mining-civil-engineering/real-time-situational-awareness/>>
- Mining & Construction (2014), *Atlas Copco Enabling Automation-Rig Control System*. Disponible en <<https://miningandconstruction.com/mining/enabling-automation-2748/>>
- Modular (s/f), *Modular Mining Systems | Mine Management Solutions*. Disponible en <<http://www.modularmining.com/>>
- 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). DOI <<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.03.003>>
- Ramírez, P. y Alejano, L. (2004), *Mecánica de rocas: fundamentos e ingeniería de taludes*, Red DESIR, Madrid. Disponible en <<http://oa.upm.es/cgi/export/14183/>>
- Ramos Ramírez, A. (2014), “El beneficio de patio en la hacienda ‘Las Mercedes’ Zacatecas 1850”, *Geomimet* (310).
- RIM (2018), *Reunión Internacional de Minería Zacatecas 2018*. Disponible en <<http://rimzacatecas.mx/>>
- Rosenzweig, F. (1988), “El desarrollo económico de México 1877 a 1911”, *Secuencia*, núm. 12. DOI <<https://doi.org/10.18234/secuencia.v0i12.235>>
- Sandvik (s/f), *Sistema de automatización de trituradoras. Regulación de ajustes automática (ASRi) para trituradoras-Sandvik Mining and Rock Technology*. Disponible en <<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*, 1ª edición, México, Fondo de Cultura Económica.

- SGM (2011), *Anuario estadístico de la minería mexicana ampliada 2010*, vol. 40, México, Secretaría de Economía. Disponible en <http://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/industria_comercio/informacionSectorial/minero/AnuarioEstadisticodelaMineriaMexicanaAmpliada2010.pdf>
- _____ (2015), *Anuario estadístico de la minería mexicana 2014*, vol. 44. México, Servicio Geológico Mexicano. Disponible en <http://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2014_Edicion_2015.pdf>
- _____ (2017), *Anuario estadístico de la minería mexicana 2016*, vol. 46, México, Servicio Geológico Mexicano. Disponible en <https://www.sgm.gob.mx/productos/pdf/Anuario_2016_Edicion_2017.pdf>
- Smith, M. (1995), *The Effects of Disasters on Modern Societies: World Conference on Natural Disaster Reduction, Technical Committee, Session C*. DIANE Publishing.
- Tello, C. (2008), *Estado y desarrollo económico: México 1920-2006*, 2ª edición, México, UNAM, Facultad de Economía.
- Thermo Scientific (s/f), NITON XL3t 500 Analyze. Thermo Scientific. Disponible en <<https://usenvironmental.com/download/manuals/Thermo%20-%20Niton%20XL3t-500-v6.5%20Manual.pdf>>
- Urías, H. (1980), “¿Quién controla la minería mexicana?”, *Comercio Exterior*, vol. 30, núm. 9.
- Veltmeyer, H. y Petras, J. (2015), “¿Un nuevo modelo o imperialismo extractivo?”, en *El neoextractivismo ¿un modelos posneoliberal de desarrollo o el imperialismo del siglo XXI?*, 1ª edición, México, Crítica.
- Wirtgen GmbH. (s/f), *History of Surface Mining*. Disponible en <<https://www.wirtgen.de/en/technologies/surface-mining/history/>>