



Plata
Servicio Geológico Colombiano
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC

Plata

René F. Lugo Primelles y Luis Bernal

Citación: Lugo, R. F. y Bernal, L. (2019). Plata. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 2. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

La plata es un elemento químico de número atómico 47, situada en el grupo 1b de la tabla periódica de los elementos y con peso atómico 107.87. Su símbolo químico es Ag y procede del latín *argentum*. Es un metal de transición, de color blanco, brillante, blando, dúctil y maleable, y es el mejor metal conductor del calor y de la electricidad. Además, se considera un metal noble y precioso.

Las principales fuentes de plata son las de cobre, cobre-níquel, oro, plomo y plomo-zinc. Los principales yacimientos se relacionan con filones hidrotermales de oro, plomo, zinc y plata, y disseminaciones de tipo porfídico (Cu-Au, Cu-Mo-Au, Au, Sn, Sn-Ag), chimeneas de brechas (en ocasiones como subproducto de menas uraníferas, junto a Co, Cu, Ni, Pb), *skarns* (Pb-Zn, Fe) y sulfuros masivos de plomo-zinc.

En razón de que la plata en Colombia está ligada a la minería del oro, tanto en producción como en beneficio, no hay empresas que se dediquen de forma exclusiva a esta actividad y la información existente sobre este metal obligatoriamente está relacionada con la del oro. No obstante, el destacado proceso inversionista que vienen desarrollando en los últimos años compañías extranjeras, en labores de prospección y exploración geológicas para metales preciosos y básicos, debe conducir a un cambio sustancial en el futuro mediano.

1. Usos

La plata es un metal precioso que se caracteriza por su poder reflector, resistencia a la oxidación, color blanco y brillo metálico, maleabilidad y ductilidad, propiedades que el hombre aprovechó desde hace unos 4000 años para la elaboración de ornamentos y herramientas. Además de poseer la mayor conductividad eléctrica de todos los metales, la plata es buena catalizadora y sus sales son muy sensibles a la luz.

A comienzos del siglo XX uno de los principales usos de este metal, aparte de la joyería y la platería, era la acu-

ñación de monedas. Con los avances tecnológicos surgidos a raíz de la Segunda Guerra Mundial, en los campos de la electrónica y la fotografía, se fueron desarrollando nuevos productos de consumo y la plata se fue convirtiendo en un metal con aplicaciones en la industria y en la fotografía.

A finales del siglo XX se dejó de utilizar la plata en la acuñación de monedas oficiales y se había convertido en un metal con un 70 % de la demanda en la industria y en la fotografía (USGS, 2005).

El mayor demandante de plata es el sector industrial, seguido del de joyería y platería. El tercer demandante es el de fotografía (19 %), único sector que se mantiene en permanente disminución; en el cuarto lugar se ubica la fabricación de monedas y medallas conmemorativas, con cerca del 5 %.

De acuerdo con USGS (2014), en la actualidad sus usos específicos principales son en material fotográfico; circuitos; conductores; superconductores; televisores de plasma; antenas; joyería; platería; piezas conmemorativas; catalizadores; baterías; soldaduras; aparatos médicos, odontológicos y de laboratorio; espejos; paneles de energía solar; plantas de purificación de agua; teléfonos celulares; papel; desinfectantes; desodorantes y preservadores de madera, entre otros.

2. Ambiente geológico

Los yacimientos argentíferos (plata como metal principal o como subproducto) tienen, por lo general, algún tipo de asociación mineral con oro, cobre, plomo, zinc, níquel, cobalto, uranio, molibdeno, tungsteno, hierro y estaño, y están presentes en diversos ambientes geotectónicos, tanto en zonas de cratón como en márgenes continentales y arcos de islas, es decir, en terrenos con basamento siálico como simático, razón por la cual presentan una distribución mundial muy amplia.

Se pueden encontrar en regiones con edades entre el Precámbrico y el Cuaternario, asociadas con sistemas

estructurales bien definidos, de fallamientos elongados o estructuras circulares, que facilitan las labores de reconocimiento y prospección regionales.

2.1. Características

El grado de desarrollo del conocimiento actual de este recurso mineral ha permitido establecer un grupo de patrones útiles para su localización e investigación con fines económicos.

2.1.1. Geoquímica

Junto con el oro y el cobre, la plata integra el grupo 1b de la tabla periódica, conjunto de metales que aparecen en estado nativo en rocas de la corteza terrestre, donde el contenido promedio en rocas ígneas ultramáficas es 0.6 ppm, en rocas máficas 0.1 ppm, en rocas félsicas 0.04 ppm, en calizas 0.1 ppm, en areniscas 0.25 ppm y en *shales* 0.19 ppm.

El oro, el cobre y la plata son solubles mutuamente, y en menor grado la plata con el mercurio. Se ha encontrado que la plata puede contener pequeñas cantidades de arsénico, antimonio y mercurio en su estructura cristalina (Stanton, 1972).

2.1.2. Mineralogía

La plata cristaliza en el sistema cúbico hexaquisoctaédrico, comúnmente en cristales mal formados y en grupos arborescentes y reticulados, por lo general en masas irregulares, placas y escamas, a veces en grano o en alambre. Tiene dureza entre 2.5 y 3 en la escala de Mohs, brillo metálico, color blanco, y en su estado más puro tiene un peso específico de 10.5 (Cornelius y Hurbult, 1981).

Se encuentra en estado nativo; como sulfuro en el mineral argentita (SAg_2); telururo como silvanita $\text{Te}_2(\text{Au, Ag})$; como sulfosal en la polibasita ($\text{S}_{11}\text{Sb}_2\text{Ag}_{16}$); proustita (S_3AsAg_3); estefanita (S_4SbAg_5), y pirargirita (S_3SbAg_3), entre otros.

La plata presenta aleaciones naturales con cobre, mercurio y plomo. Con el oro forma una serie completa de soluciones sólidas; si el contenido de plata en la aleación con oro es superior al 20 %, recibe el nombre de *electrum*.

Otros minerales como la galena argentífera (SPb), que es un mineral relativamente fácil de fundir, y la tetraedrita argentífera $\text{Cu}_3(\text{Sb, As})\text{S}_3$, son importantes menas de plata.

2.2. Tipo de depósito

Entre los principales tipos de yacimiento están los hidrotermales, especialmente los epitermales y orogénicos, con

una tendencia de la plata hacia las condiciones epitermales. No obstante, existen otros tipos de depósitos de rendimiento económico que hay que tener en cuenta, que en términos generales se relacionan de la siguiente manera, aunque las descripciones específicas se ajustan a los modelos de depósitos establecidos por el British Columbia Geological Survey, Canada (BCGS).

2.2.1. Filones hidrotermales en general

En los siglos XVIII y XIX se explotaron yacimientos de filón donde la plata era el producto principal. Se mencionan las minas de Tonopah (Estados Unidos), Pachuca (México) y Potosí (Bolivia), famosa esta última por haber sido la montaña más rica del mundo en plata (Bateman, 1957).

Actualmente pertenecen también a esta categoría la mina Cannington en Australia y la mina Fresnillo, Proaño, en México, que son las dos mayores minas del mundo (Comisión Chilena del Cobre, 2006). En estos yacimientos se explotan filones y brechas mineralizados que contienen algunos de los siguientes minerales: plata nativa, *electrum*, argentita, polibasita, pirargirita y estefanita, además de calcopirita, enargita, blenda y galena.

También son importantes productoras de plata las minas Comstock en Nevada, Guanajuato en México, y Creede en Colorado.

2.2.1.1. Depósito epitermal de Au-Ag de baja sulfuración (Comstock Lode)

Hace referencia a yacimientos donde oro, *electrum*, sulfosales de plata y argentita están contenidos en filones de cuarzo-adularia, en rocas volcánicas de composición félsica a intermedia, la mayoría con edad entre 40 y 4 Ma. Las rocas encajantes son andesitas, dacitas, cuarzo-latita, riolacita, riolita y rocas sedimentarias asociadas.

La mineralización se distribuye dentro de sistemas de diaclasas y fallas normales mayores, y consiste en argentita, oro o *electrum* \pm sulfosales de plata \pm naumanita; en cantidad moderada, con escasa galena, esfalerita, calcopirita, telururos, hematita y arsenopirita. Los minerales de ganga son cuarzo + pirita \pm adularia \pm calcita \pm sericita \pm clorita. Relación Au/Ag < 1. Ejemplos: minas Comstock y Tonopah en Nevada, y Guanajuato en México (Mosier, Singer y Berger, 1992).

2.2.1.2. Filones polimetálicos epitermal de Au-Ag de baja sulfuración (Pachuca, Creede)

En este tipo de yacimiento el producto principal es la plata. Los minerales galena, esfalerita, calcopirita, sulfosales +

telururos + oro se presentan en venas de cuarzo-carbonato, en vulcanitas félsicas a intermedias y rocas sedimentarias asociadas. El marco tectónico se relaciona con sistemas de diaclasa, fallas normales mayores y fracturas debidas a los domos. Subyacen rocas más antiguas de escudos continentales o arcos de isla que han tenido levantamientos rápidos.

Los filones se componen de galena + esfalerita + calcopirita + sulfosales de cobre + sulfosales de plata ± telururos ± bornita ± arsenopirita. Los minerales de ganga son cuarzo + clorita ± calcita + piritita + rodrosita + barita ± fluorita ± siderita ± ankerita ± sericita ± caolinita ± adularia. La alteración de cima a base es: cuarzo ± caolinita + montmorillonita ± zeolita ± barita ± calcita; la presencia de adularia es variable.

El proceso de enriquecimiento supergénico es un factor importante que incrementa el grado del yacimiento. Como patrones geoquímicos se tiene que son sistemas con contenidos altos en Au + As + Sb + Hg; Au + Ag + Pb + Zn + Cu; Ag + Pb + Zn, y Cu + Pb + Zn. En depósitos con plata los metales básicos generalmente tienen más alto grado (Mosier, Singer y Berger, 1992).

Los filones y sistemas de filones argentíferos se encuentran tanto en terrenos de cratón (Cannington, Australia; ciertos depósitos en China) como en los sistemas cordilleranos de las márgenes continentales (por ejemplo, en el Cinturón Circumpacífico, donde aparecen los restantes mencionados) o en los arcos de islas. En múltiples ocasiones estructuras mineralizadas representan parte de una estructura mayor de tipo porfídico.

2.2.2. Depósitos de tipo porfídico

(Cu-Au, Cu-Mo-Au, Au, Sn, Sn-Ag, Ag)

Son yacimientos de origen hidrotermal, hipotermal, asociados con rocas intrusivas hipoabisales o de ambiente más profundo, de textura porfirítica y composición félsica a intermedia, donde la mineralización ocurre por remplazamiento y se distribuye de manera diseminada y en enrejado.

Presentan zonas de alteración hidrotermal bastante definidas, que se distribuyen de manera concéntrica del centro a la parte externa: zona potásica, zona filica ± zona argílica y zona propilítica.

Son depósitos de bajo tenor y alto tonelaje que se explotan a cielo abierto, donde los productos principales son cobre, oro, tungsteno, molibdeno y estaño; la plata es uno de los subproductos, excepto en el caso de los porfídeos de plata.

Los depósitos porfídicos ocurren por todas las latitudes a través de unas series lineales, relativamente estrechas y extensas provincias metalogénicas (figura 1). Se asocian de modo predominante con los cinturones orogénicos de edades Mesozoico y Cenozoico occidentales de Norte y Suramérica, y alrededor de la margen occidental de la cuenca del Pacífico. Grandes depósitos también ocurren en orógenos de edad Paleozoico en Asia Central y el este de Norteamérica, y con menor desarrollo dentro de terrenos precámbricos.

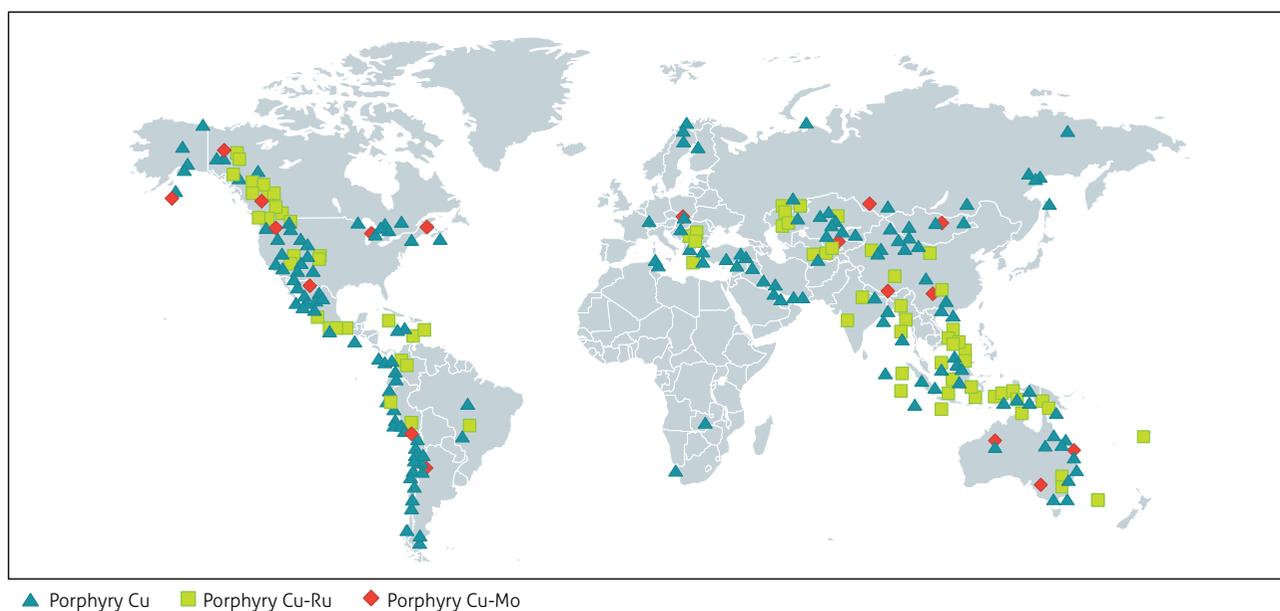


Figura 1. Distribución global de los depósitos porfídicos

Fuente: USGS (2017)

2.2.2.1. Pórfidos de Cu, Cu-Mo y Cu-Mo-Au

Los minerales principales de la mena son calcopirita, bornita, calcocita, tenantita, enargita, otros sulfuros de cobre y sulfosales, molibdenita y *electrum*; los minerales accesorios son piritita, magnetita, cuarzo, biotita, feldespato potásico, anhidrita, moscovita, minerales arcillosos, epidota y clorita.

2.2.2.2. Pórfidos de Cu-Au

Los minerales principales de la mena son calcopirita, bornita, calcocita, tenantita, otros sulfuros de cobre, oro nativo, *electrum* y telururos; los minerales accesorios incluyen piritita, arsenopiritita, magnetita, cuarzo, biotita, feldespato potásico, anhidrita, epidota, clorita, escapolita, albita, calcita, fluorita y granate.

2.2.2.3. Pórfidos de Au

Los principales minerales de la mena son oro nativo, *electrum*, calcopirita, bornita y molibdenita, en tanto que los minerales accesorios son piritita, magnetita, cuarzo, biotita, feldespato potásico, anhidrita, muscovita, minerales arcillosos, epidota y clorita.

2.2.2.4. Pórfidos de Sn y Sn-Ag

Los principales minerales de la mena son casiterita, tetrahedrita, argentita, estannita, wolframita, calcopirita, esfalerita, franckeita, cilindrita, teallita, molibdenita, bismutinita, otros sulfuros y sulfosales, plata nativa y bismuto nativo; minerales accesorios son: piritita, arsenopiritita, loellingita, cuarzo, biotita, feldespato potásico, muscovita, minerales arcillosos, fluorita y topacio.

2.2.2.5. Pórfidos de Ag

Los principales minerales de la mena son freibergita, estefanita, acantita, esfalerita y galena, mientras que los accesorios incluyen arsenopiritita, pirrotina, piritita, adularia, cuarzo, fluorita y calcita. Los tenores de plata van de 0.2 a 5.0 g/t.

2.2.3. Brechas magmáticas hidrotermales, sedimentarias, intrusivas

Son depósitos de ambiente epitermal predominante, menos mesotermal, siempre dependientes de las estructuras porfídicas mayores, donde en ocasiones forman parte del propio depósito porfídico y otras veces aparecen con carácter independiente, alejados hacia las zonas someras de la columna mineralizada. Un ejemplo clásico de clase mundial es la brecha diatrema de Pueblo Viejo (República Dominicana), depósito epitermal de Au-Ag-Cu de alta sulfuración.

Las *brechas sedimentarias*, formadas esencialmente en el lecho oceánico, representan la roca encajante de muchos yacimientos tipo Sedex (Pb-Zn-Ag).

2.2.4. Depósitos complejos de brechas (intrusivas, uranio asociado a discordancias)

El yacimiento Olympic Dam es uno de los más grandes depósitos de uranio del mundo, que cuenta con cerca del 66 % de las reservas y recursos de Australia. Se encuentra hospedado en un complejo de brecha granítica bastante hematitizada en el cratón Gawler. Está recubierto por cerca de 300 m de sedimentos cuasihorizontales de la provincia geológica de Shelf Stuart.

El núcleo central del complejo es una brecha hematito-cuarcifera estéril, con varias estructuras de diatremas, flanqueadas al este y oeste por zonas de brechas fuertemente hematitizadas y brechas graníticas. Estas zonas tienen mas o menos 1 km de ancho por casi 5 km de largo en dirección noroeste-sureste. Casi toda la mineralización económica de uranio-cobre se alberga en estas brechas ricamente hematitizadas, las cuales están rodeadas en su mayoría por las brechas graníticas.

El depósito contiene hierro, cobre, uranio, oro, plata, elementos raros (principalmente lantano y cerio) y fluorita. Solo se recuperan cobre, uranio, oro y plata.

2.2.5. Yacimientos de sulfuros de plomo-zinc

Los principales son depósitos estrato confinados en secuencia de rocas volcánicas o sedimentarias, que pueden ser masivos o diseminados. Los de mayor tamaño son sulfuros masivos confinados de manera estratiforme en carbonatos (como Tristate, en Estados Unidos, depósitos hospedados en rocas carbonatadas o en rocas volcánicas, según el *British Columbia Geological Survey*, SGCB); le siguen en importancia los depósitos exhalativos en rocas sedimentarias (Canadá, Australia) y sulfuros diseminados de Pb-Zn (Sarmiento, 1987).

En las menas de metales básicos, principalmente en galena, se origina la mayor parte de la producción de plata en el mundo; la proporción de plata en galena está en el rango de 1/50 y 1/100; los grandes yacimientos de galena argentífera tienen en promedio una Oz/t de plata y 1.7% de plomo.

2.2.6. Skarns

Se originan principalmente a partir de intrusiones pobres en sílice, generadas por una corteza oceánica primitiva, por lo que se presentan en terrenos de arcos de isla y de *rift* continental. Las rocas generadoras pueden ser porfídicas de mediana profundidad, así como estructuras de brechas más someras y también batolitos a mayores profundidades,

que vienen en contacto con rocas carbonatadas calcáreas o magnesianas. Los márgenes continentales son el ambiente que engloban estos depósitos. La plata se encuentra en volúmenes aprovechables en los *skarns* de Zn-Pb, Cu, Au y Fe, con mayor importancia en los primeros.

La mayoría de los depósitos de *skarn* de zinc ocurren en ambientes continentales, asociados bien sea con procesos de subducción o de *rifting*. Son explotados como menas de zinc, plomo y plata, aunque por lo general el zinc es dominante. También se caracterizan por los altos tenores (10-20 % Zn + Pb, 30-300 g/t Ag). Las rocas ígneas relacionadas presentan amplio rango de composición química, desde dioritas hasta granitos hipersilíceos. Se manifiestan en diversos ambientes geológicos, desde batolitos emplazados en profundidad hasta complejos someros de diques-sillos o extrusiones volcánicas superficiales. Lo más común es que estas mineralizaciones se ubiquen en forma distal con respecto a las intrusiones asociadas.

Además de su contenido metálico de Zn-Pb-Ag, los *skarns* zincíferos se distinguen de otros tipos de *skarn* por su mineralogía rica en manganeso y hierro, por su ocurrencia a lo largo de contactos estructurales y litológicos, y por la ausencia de significativas aureolas metamórficas centradas alrededor del *skarn*. Casi todos los minerales de *skarn* de estos depósitos pueden estar enriquecidos en manganeso, incluyendo granate, piroxeno, olivino, elbaíta, piroxenoideas, anfíboles, clorita y serpentina.

2.3. Métodos de prospección

Como en otros minerales, los estudios deben realizarse en las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada.

En la etapa de *reconocimiento* se identifican las áreas con potencial de mineralización, a partir de los resultados de los estudios geológicos regionales, que incluyen comprobación de la fotointerpretación, ejecutando cartografía aérea de anomalías de color y la inspección preliminar de campo. También se ejecutan otros trabajos regionales, por ejemplo estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La *prospección* se realiza con el propósito de identificar el depósito posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques), y perforaciones aisladas para medir el comportamiento de la mineralización en la profundidad. Se ejecutan trabajos geofísicos mediante métodos magnéticos, electromagnéticos y geoeléctricos

preferentemente. Se deberán obtener con carácter preliminar las dimensiones y la morfología, así como los tenores y otras características esenciales de los cuerpos minerales. Atendiendo al grado de confiabilidad de los resultados obtenidos se calcularán recursos inferidos que deben utilizarse en un estudio conceptual, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados.

Las fuentes principales para la exploración de la plata son minerales primarios y secundarios como metales nativos y aleaciones, sulfuros, antimonidos, arseniuros, telururos, selenuros, sulfosaltos, sulfatos básicos y haluros. La plata también podría ser identificada como componente traza en óxidos básicos, carbonatos, óxidos de Fe, óxidos de Mn y materia orgánica (los suelos limonita, psilomelanos y lateríticos podrían ser exitosamente probados para concentraciones anómalas de Ag). La clorargirita se presenta como una mena supergénica importante de la plata, se halla en la parte superior, es decir, en la zona de enriquecimiento de los filones de plata, se encuentra asociada a la plata nativa, cerusita y, en general, a minerales secundarios (Klein, 1997).

El mejor método para realizar la exploración de depósitos de plata es la geoquímica, ya que ese elemento está muy asociado a elementos como As, Mo, Pb, Co, Ni, Cu y Zn.

La *exploración general* permite la delineación más confiable de los depósitos. Los métodos utilizados incluyen trabajos de cartografía geológica detallada, estudios estratigráficos, muestreos superficiales de afloramientos, trabajos geofísicos complementarios que pueden incluir métodos magnéticos, electromagnéticos y geoeléctricos más detallados, así como la realización de apiques y perforaciones, los cuales conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delinearán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. Se realizarán los estudios metalúrgicos preliminares junto con los estudios de prefactibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la continuación hacia la siguiente etapa detallada. Asimismo se calcularán recursos indicados e inferidos, y reservas probables.

Para los depósitos extremadamente complejos hasta aquí llega la investigación, ya que la decisión que se toma es abandonar o continuar con la explotación e investigación simultáneas.

Por su parte, la *exploración detallada* permite la delineación tridimensional detallada de los depósitos, mediante el muestreo de afloramientos, apiques, túneles y núcleos de perforaciones, así como la distribución detallada de los tenores y otras características importantes,

tanto en lo referente a sus posibles usos como a la explotación y el beneficio mineral. En esta etapa se llevarán a cabo los estudios necesarios metalúrgicos a escala industrial, así como los estudios de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán también recursos medidos, indicados e inferidos, y reservas probadas y probables.

2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se describen los métodos de extracción y beneficio en la minería argentífera.

2.4.1. Sistemas de extracción

La necesidad de garantizar la viabilidad económica de las operaciones ha exigido, durante las tres últimas décadas, aprovechar las economías de escala, con fuertes ritmos de producción y maquinaria de gran tamaño. Después de la Segunda Guerra Mundial el diseño de los equipos evolucionó y se perfeccionó hasta adoptar las formas que hoy en día se consideran clásicas. Se produjo primero un aumento espectacularmente rápido en las dimensiones de las máquinas, que en general se caracterizaban por estar impulsadas por robustos motores diésel de régimen lento y aspiración natural, que se acoplaban a transmisiones mecánicas.

Paralelamente, algunos fabricantes ensayaban y desarrollaban máquinas con transmisiones eléctricas. Estas unidades llevaban su propio grupo electrogenerador, arrastrado por un motor diésel, tendencia que no se generalizó por los problemas de disponibilidad y fiabilidad que surgieron. Posteriormente, con la primera crisis de la energía a comienzos de los años setenta, durante la cual se produjo una elevación desproporcionada de los productos petrolíferos con respecto a las tasas generales de inflación, las empresas explotadoras se vieron forzadas a considerar los sistemas continuos de extracción, basados fundamentalmente en el transporte con cintas, debido a las ventajas económicas que ofrecía la energía eléctrica generada con otros combustibles más baratos, como el carbón. (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1995)

Como se mencionó al inicio del documento, la minería de plata está íntimamente relacionada con las explotaciones de oro y otros metales, por tanto se aplican los mismos sistemas extractivos que los utilizados en estos metales.

2.4.1.1. Minería a cielo abierto

La minería a cielo abierto sufrió un importante impulso innovador, al seguir aportando más del 70 % de los pro-

ductos minerales en todo el mundo, y la maquinaria que se empleaba creció no tanto en tamaño, como en la mejora de la fiabilidad de sus componentes y automatización de funciones y mecanismos. Esta evolución se ha traducido en un incremento de los rendimientos, un mejor aprovechamiento energético, una mayor disponibilidad de la maquinaria y, en esencia, en un abaratamiento de costos.

Seguidamente se hace una breve descripción de los principales métodos que se aplican en minería de superficie, destacando las características que deben cumplir los yacimientos y algunos aspectos operativos de interés.

Cortas. En yacimientos masivos o de capas inclinadas la explotación se lleva a cabo tridimensionalmente por banqueo descendente, con secciones transversales en forma de tronco cónico. Este método es el tradicional de la minería metálica.

La extracción, en cada nivel, se realiza en bancos con uno o varios tajos. Debe existir un desfase entre bancos con el fin de disponer de unas plataformas de trabajo mínimas para que operen los equipos a su máximo rendimiento y en condiciones de seguridad. Las vías de transporte se adaptan a los taludes finales, o en actividad, permitiendo el acceso a diferentes cotas.

El ataque al mineral se realiza de techo a muro, como en cualquier otro método. En estas explotaciones se suele disponer de bancos en estéril de mayor altura que en el mineral.

Este grupo de métodos se caracteriza por su simplicidad, por la concentración de los trabajos y por la reducida distancia de transporte, tanto en horizontal como en vertical, ya que permiten una fácil y económica restauración de los terrenos (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1997, 2004).

Terrazas. Este método se basa en una minería de banqueo con avance unidireccional. Se aplica a depósitos relativamente horizontales de una o varias capas o estratos de mineral y con recubrimientos potentes que obligan a depositar el estéril en el hueco creado, transportándolo alrededor de la explotación (Herrera, 2006).

Contorno. En yacimientos semihorizontales y con reducida potencia, donde la orografía del terreno hace que el espesor del recubrimiento aumente de forma considerable a partir del afloramiento del mineral, se realiza una minería conocida como de contorno. Consiste en la excavación del estéril y el mineral en sentido transversal hasta alcanzar el límite económico, dejando un talud de banco único, y una progresión longitudinal siguiendo el citado afloramiento.

Dado el gran desarrollo de estas explotaciones y la escasa profundidad de los huecos es posible realizar una transferencia de los estériles para la posterior recuperación de los terrenos (Herrera, 2006).

Dentro de este grupo existen diversas variantes, todas en función de la secuencia de avance planteada y los equipos mineros empleados. De estos últimos los más utilizados son los tractores de orugas, las palas cargadoras, las excavadoras hidráulicas y las volquetas.

Dragado. En mineralizaciones especiales, como son las metálicas de oro, casiterita, etc., contenidas en aluviones, resulta interesante la aplicación del método de dragado, inundada previamente la zona de explotación.

Este método es económico cuando la propia agua de inundación se utiliza en el proceso de concentración, como ocurre con la separación gravimétrica. Las dragas, además del sistema de extracción que utilicen, cangilones, cabeza de corte, etc., incorporan la propia planta de tratamiento sobre la plataforma, cribas, ciclones, *jigs*, etc., capaces de tratar grandes volúmenes de material y de un sistema de evacuación de los estériles a la zona ya explotada (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1997).

2.4.1.2. Minería subterránea

Cámaras y pilares. Este método es conocido también con el término “*room and pillar*” y consiste en ir dejando secciones de mineral, como pilares, para mantener los huecos creados. Las dimensiones de las cámaras y la sección de los pilares dependen de las características del mineral y de la estabilidad de la roca caja, del espesor de recubrimiento y de las tensiones sobre la roca.

El grado de aprovechamiento del depósito se da en función de las dimensiones de los macizos abandonados.

El mineral que queda como pilar puede recuperarse parcial o totalmente, reemplazando los pilares por otro material para el sostenimiento del techo, o puede extraerse en forma de retirada, abandonando los cortes para el posterior hundimiento del techo; en el caso contrario generalmente los pilares con mineral se pierden.

Este método se puede aplicar en cuerpos con buzamiento horizontal, y normalmente no debe exceder de 60°; se emplea cuando el mineral y la roca encajante son relativamente competentes, cuando los minerales no requieren clasificación en la explotación y en depósitos de gran potencia y área extensa.

Tajos por subniveles. Este método es conocido también con el término “*sublevel stopping*” y consiste en dejar cámaras

vacías después de la extracción del mineral. El método se caracteriza por su gran productividad, debido a que las labores de preparación se realizan en su mayor parte dentro del mineral. Para prevenir el colapso de las paredes, los cuerpos grandes normalmente son divididos en dos o más tajos; la recuperación de los pilares se lleva a cabo en la etapa final de minado, el cual se ejecuta desde los niveles para predeterminar los intervalos verticales. Los subniveles son desarrollados entre los niveles principales; el mineral derribado con taladros largos o desde los subniveles cae hacia la zona vacía y es recuperado desde los “*drawpoint*” para luego ser transportado hacia la superficie.

Corte y relleno ascendente. El mineral se arranca por rebanadas horizontales, en sentido ascendente, desde la galería de fondo. Una vez volado se extrae completamente de la cámara, a través de unos coladeros, efectuándose a continuación el relleno del hueco creado con estériles, con lo que se consigue crear una plataforma de trabajo estable y el sostenimiento de las excavaciones.

El material de relleno puede ser el escombros procedente de las labores de preparación de la mina o el que con esa finalidad se extrae en la superficie de alguna cantera próxima y, una vez triturado, se mezcla con agua para transportarlo hidráulicamente por medio de una tubería. Este material se drena para separar el agua, quedando así un relleno compacto. La consolidación puede aumentarse mediante la adición de una cierta cantidad de cemento.

La mayoría de las operaciones se han mecanizado casi totalmente, con lo que este método ha llegado a sustituir otros hasta ahora muy utilizados. Las principales ventajas que presenta son la alta selectividad, la buena recuperación del mineral, la facilidad de aplicación y las condiciones de seguridad alcanzadas cuando los macizos rocosos no son competentes. Los inconvenientes que presenta son el costo del material de relleno, el tamaño limitado de las voladuras y las interrupciones en la producción, que son necesarias para distribuir el material de relleno dentro de las cámaras (Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1997).

2.4.2. Sistemas de beneficio

La recuperación de metales ha sido un desafío para el hombre, que se desarrolló casi paralelamente con su evolución. En este sentido, se conocen muchas fases del conocimiento humano según el uso de los metales (o minerales): la Edad de Piedra; un poco más evolucionado cuando se habla de la Edad de Hierro, Cobre y Bronce. El método más rudimentario sin duda ha sido la simple selección manual de los materiales de interés.

En la mayoría de operaciones metalúrgicas se hace necesaria una liberación de las partículas metálicas, para lo cual se deben efectuar operaciones de trituración y molienda, por lo general con equipos especialmente diseñados y construidos para tal fin. Un factor determinante es el tamaño, el cual se obtiene de la liberación óptima de metales de interés; por eso este suele ser un factor crítico, pero al mismo tiempo el menos eficiente desde el punto de vista costo-beneficio de la energía usada.

Los métodos de concentración de minerales existen desde épocas inmemoriales, desde que el hombre comenzó a realizar minería. Una de las operaciones más antiguas para el aprovechamiento de los metales fue el elemental método de gravimetría, aquel que se basa en la mayor densidad de los elementos metálicos frente a los materiales de ganga o minerales (Gestión de conocimientos para una minería artesanal, s.f).

2.4.2.1. Gravimetría

Esta operación se basa en las características de diferencia de densidad de los elementos contenidos en materiales heterogéneos; es decir, se basa en el mayor peso, influenciado por la fuerza de la gravedad, de un elemento con respecto a otros.

En el caso de la metalurgia de la plata existen diversos equipos para realizar las operaciones de recuperación basados en principios gravimétricos, aunque siempre es importante la separación de las partículas gruesas de la finas. En el caso de los yacimientos aluviales se busca separar primero las rocas mediante el uso de rieles, cedazos, *trommels* y zarandas estáticas o vibratorias.

Los sistemas más usuales y rudimentarios para la recuperación de plata por gravimetría suelen ser las canaletas o canalones, las cuales tienen el piso recubierto con materiales fibrosos, detalle que permite que las partículas libres de plata o *electrum* se concentren con la ayuda de la adherencia o resistencia al flujo turbulento. Los materiales fibrosos más usuales suelen ser alfombras sintéticas o inclusive cobijas; es aconsejable poner trampas transversales sobre el piso de la canaleta.

Otros sistemas de recuperación gravimétrica se basan en el incremento de la gravedad por la aplicación de fuerza centrífuga, lo que multiplicado por la alta densidad de los metales preciosos permite que las densidades proyectadas tengan un mayor diferencial entre uno y otro elemento. Estos son los llamados equipos de medios densos, que vienen a ser la fuerza aplicada a equipos de forma cónica, como los concentradores Falcon, Knudsen y Knelson, que son los más eficientes de todos en condiciones ideales. Es pertinente aclarar que la eficiencia en estos equipos ocurre cuando las

partículas de los metales están libres (Gestión de conocimientos para una minería artesanal, s.f).

2.4.2.2. Amalgamación

Operación que se basa en la alta densidad de los metales valiosos y las fuerzas de tensión superficial sobre la superficie del mercurio. Esta operación se basa en la alta afinidad del mercurio por la plata y el oro, aunque ciertamente es posible forzar amalgamación con otros elementos metálicos, como la formación de amalgamas para uso dental en la que actualmente se usa zinc, o la frotación del mercurio en bandejas de cobre como planchas amalgamadoras.

Es un error considerar que una amalgama es una aleación; esto se debe a que una amalgama es una simple mezcla no homogénea de cualquier elemento metálico con el mercurio, metal que en condiciones normales de presión y temperatura es un líquido. Dicho lo anterior, y para aclararlo aún mejor, es posible amalgamar partículas de plata con un espesor de 1 mm, a tal punto que interiormente dicha partícula seguirá siendo únicamente de plata, por lo que no es una aleación.

Esta es una operación contaminante muy difundida y que debería ser erradicada de las prácticas de recuperación de metales preciosos, además de ser muy costosa y sumamente deficiente (Gestión de conocimientos para una minería artesanal, s.f).

2.4.2.3. Flotación de minerales

Las operaciones de flotación, como un proceso de concentración, tienen como objetivo la recuperación de los metales de interés, contenidos en un mineral en forma impura pero, al mismo tiempo, enriquecida. Este tipo de operaciones se basan en las características hidrofóbicas de ciertos componentes de los minerales (típicamente el azufre): al introducir aire se forman burbujas (flotación por espumas) y las partículas de mineral se adhieren a estas, flotando a la superficie donde son extraídas como concentrados.

La flotación muchas veces requiere cierta inducción por reactivos, aunque inicialmente la flotación era un operación recomendada solo para minerales sulfurados; hoy por hoy, y desde hace mucho tiempo, es posible hacer flotar minerales oxidados debido a la aplicación y uso de reactivos que dan características hidrofóbicas a los elementos de interés en la mena.

Los principales reactivos a usarse en las operaciones y procesos de flotación son, en forma genérica, los siguientes:

Depresores. Son reactivos que inhiben ciertos elementos a fin de que no floten durante la operación, para que se mantengan debajo de la línea de espuma. Este tipo de reactivos se usa en la flotación diferencial o selectiva, o simplemente para evitar que se sumen a los concentrados elementos indeseables.

Colectores. Contrariamente a los depresores, los colectores se usan para que los elementos valiosos puedan adherirse a la superficie de las burbujas, de manera tal que sean justamente los elementos concentrados como producto los que afloran a la superficie.

Espumantes. Son aquellos reactivos que producen la espuma por el ingreso de aire, lo que permite la formación de burbujas lo suficientemente fuertes y estables. En general, los reactivos a usarse, así como su dosificación, dependen de las características propias de cada mineral. (Gestión de conocimientos para una minería artesanal, s.f)

2.4.2.4. Fundición y tostación

Son procesos pirometalúrgicos cuyas aplicaciones se recomiendan en el caso de metales de alta ley así como de concentrados diversos. En el caso de la tostación, este se considera un proceso previo; se trata de un pretratamiento para que el mineral o concentrado se vuelva dócil ante algún proceso de ataque químico con reactivos convencionales.

En la fundición los metales son colectados por fusión debido a altas temperaturas, siendo así que se concentra en el fondo del recipiente que los contiene, usualmente un crisol. La fundición en pequeña escala se emplea con plata y oro físico obtenidos por diversos procesos, lo que permite un refinamiento y, además, homogeneizar el material como aleación, tanto de la plata como del oro y sus impurezas (Gestión de conocimientos para una minería artesanal, s.f).

2.5. Recursos, reservas y comercio

Las reservas mundiales de plata en el 2016 se estiman en 571 000 tm (figura 2), de las cuales el 80 % se localiza en los nueve países productores indicados en la tabla 1. Más de dos tercios de los recursos mundiales de plata están asociados con yacimientos de Cu, Pb y Zn localizados a grandes profundidades, de diferentes tipos, tales como filones, sulfuros masivos, sulfuros diseminados y *skarns*, donde la plata es un subproducto. El tercio restante está en filones, donde el oro es el componente metálico más valioso (USGS, 2005).

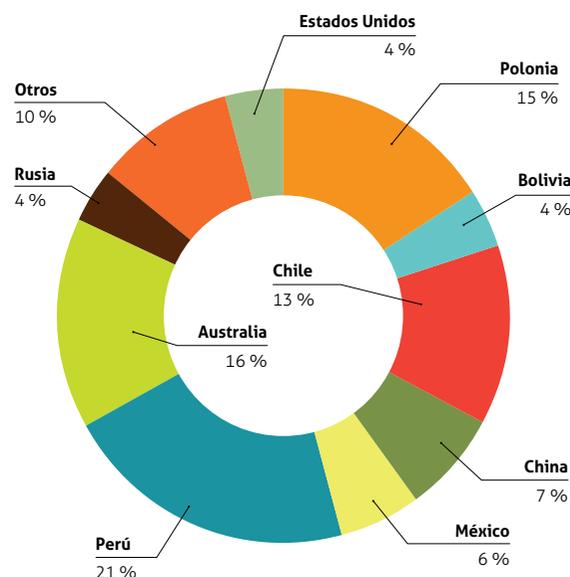


Figura 2. Participación de las reservas mundiales de plata en el 2016

Datos en toneladas métricas (tm)

Fuente: USGS (2016)

Tabla 1. Reservas mundiales de plata en el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	31 000	30 000	25 000	25 000	25 000
Australia	29 000	33 000	31 000	69 000	89 000
Bolivia				22 000	22 000
Canadá	37 000	35 000	16 000	7 000	
Chile				70 000	77 000
China			26 000	43 000	39 000
México	37 000	37 000	37 000	37 000	37 000
Perú	25 000	25 000	36 000	120 000	120 000
Polonia			51 000	85 000	85 000
Rusia					20 000
Otros	120 000	120 000	50 000	50 000	57 000
Total	279 000	280 000	272 000	528 000	571 000

Datos en toneladas métricas (tm)

Fuente: USGS (2016)

En la tabla 1 se observa cómo el desarrollo continuo de Perú en el ámbito minero llevó a triplicar sus reservas de plata en la última década, convirtiéndolo en el país con mayores cantidades de reservas de plata a nivel mundial.

La producción más antigua de plata de mina de la que se tenga conocimiento data de hace unos 4000 años, en lo que hoy se conoce como Turquía, pero no fue sino hasta el descubrimiento de América que tuvo un fuerte impulso, alcanzando durante el siglo XVII alrededor de 270 t anuales.

A comienzos del siglo XX hubo un notable incremento en la producción, al desarrollarse nuevas técnicas que hacían posible la explotación de plata como subproducto de la minería de yacimientos de plomo, zinc y cobre, llevando la producción anual a cerca de 6000 t/año (Comisión Chilena del Cobre, 2006).

La producción de plata de mina está relacionada, en su mayor parte, con yacimientos de plomo, zinc, cobre y oro de donde se obtiene como subproducto; el resto proviene de yacimientos donde es producto principal (USGS, 2005).

De la plata de mina producida en el mundo nueve países contribuyen con más del 80 %, entre los que sobresalen México y Perú como los mayores productores, seguidos de cerca por China y Chile (figura 3).

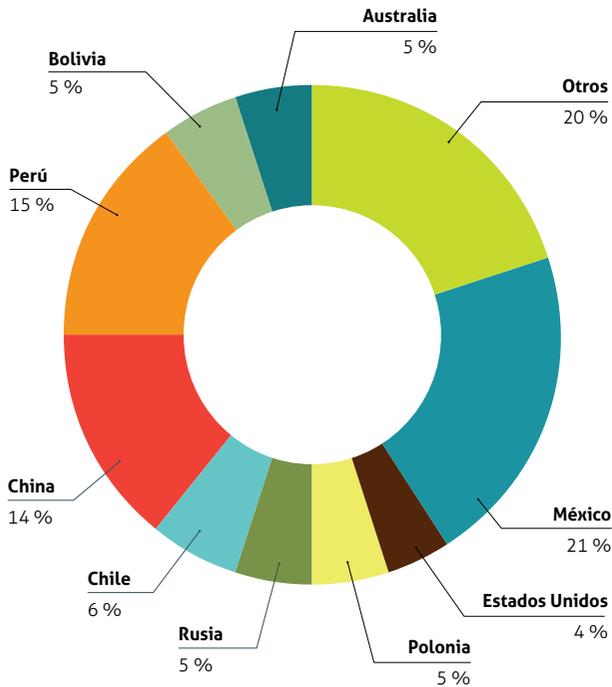


Figura 3. Participación mundial de producción de plata en el 2016

Fuente: USGS (2016)

En la figura 4 se observa la producción mundial en el periodo 1996-2016, la cual se ha duplicado hasta obtener en el 2016 un total de 26 800 tm del metal; América Latina con México, Perú, Bolivia y Chile se consolida como la principal región productora de plata. En la tabla 2 se observan a los cuatro principales países productores del 2016.

Tabla 2. Producción mundial de plata en el periodo 1996-2016

País	1996	2001	2006	2011	2016
Estados Unidos	1800	1800	1100	1160	1100
Australia	900	2060	2150	1900	1400
Bolivia				1350	1300
Canadá	1200	1200	1310	700	
Chile			1400	1400	1500
China			2550	4000	3600
México	2400	2600	3000	4500	5600
Perú	2000	2500	3200	4000	4100
Polonia			1300	1200	1400
Rusia				1400	1400
Otros	6540	8160	3589	2200	5400
Total	14 840	18 320	19 599	23 810	26 800

Datos en toneladas métricas (tm)

Fuente: USGS (2016)

En cuanto al comercio en el 2016 y en años anteriores, la producción mundial de plata de mina fue menor que la demanda: solo en los años 2011 y 2012 la producción fue mayor, como se observa en las figuras 5 y 6. En los últimos años se ha incrementado la demanda de plata debido al aumento de la compra de barras y monedas de plata como producto de inversión a futuro.

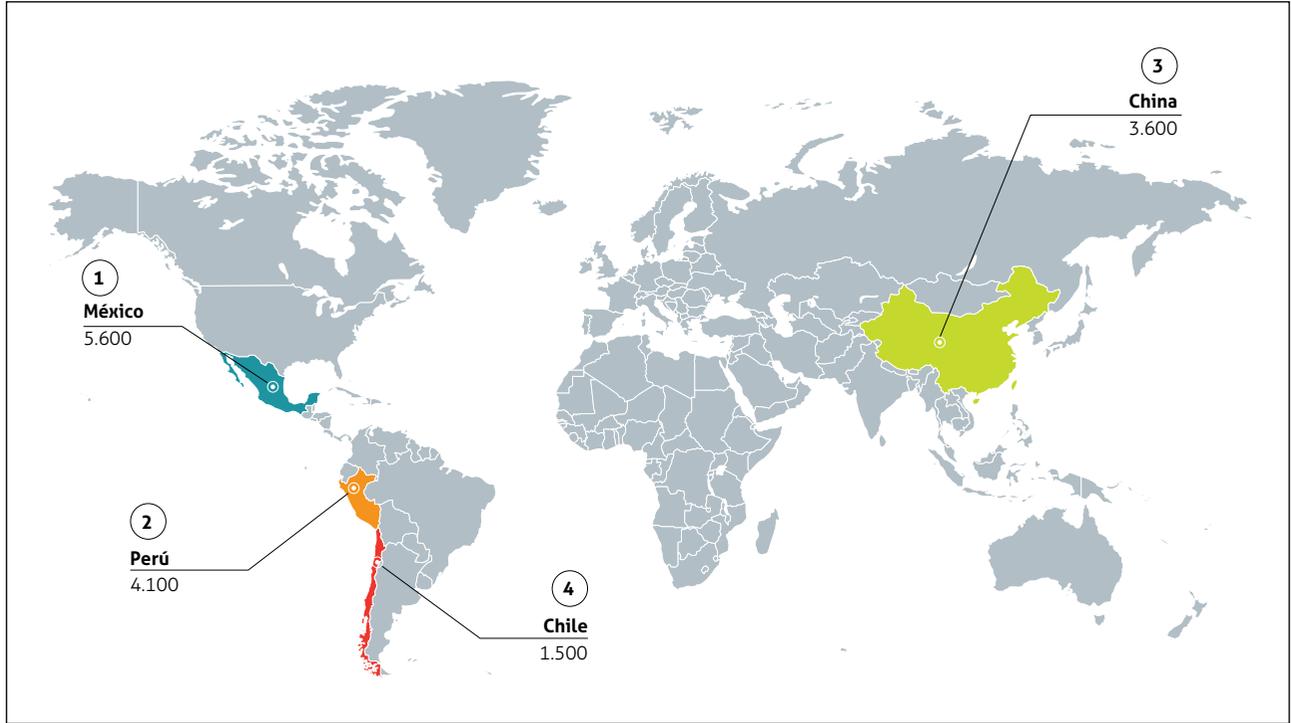


Figura 4. Principales países productores de plata en el 2016

Fuente: USGS (2016)

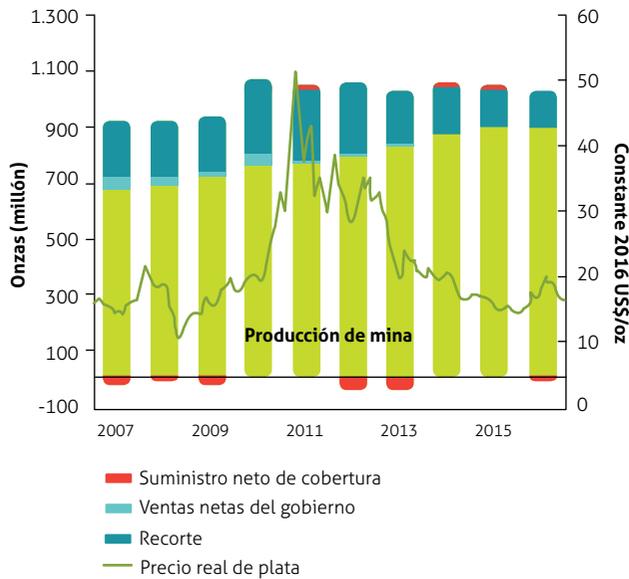


Figura 5. Oferta mundial de plata en el periodo 2007-2016

Fuente: Thomson Reuters (2017)

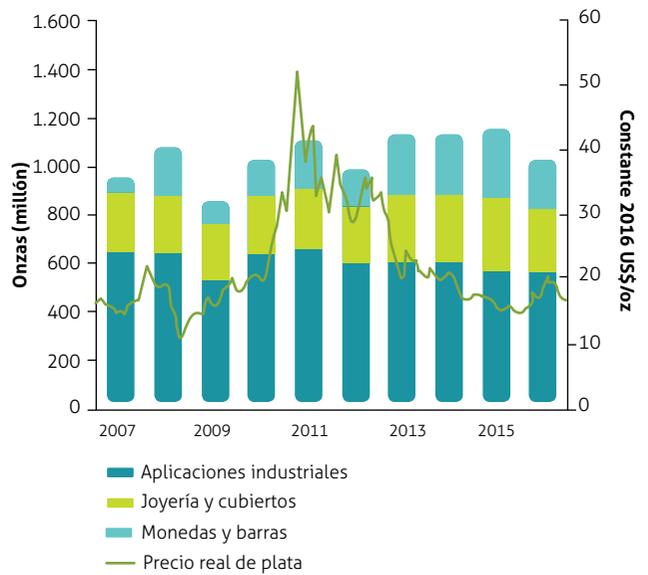


Figura 6. Demanda mundial de plata en el periodo 2007-2016

Fuente: Thomson Reuters (2017)

El precio de la plata se tasa en el ámbito mundial preferentemente en el London Bullion Market (LBM) y en el Commodity Exchange (Comex, filial del The New York Mercantile Exchange [NYMEX]). El primero es el mercado terminal de transacción física de la plata más importante del mundo, siendo el principal centro para las operaciones OTC (*over-the-counter*, principal a principal), y es aquí donde el proceso de negociación genera un precio de referencia diario, conocido como *fix*. La segunda es una bolsa de futuros y opciones que concentra la mayor parte de la actividad de los fondos de inversión. En ambos centros los precios se expresan en dólares por onza Troy (Cochilco, 2006).

Como la mayoría de los metales, su precio ha venido ascendiendo desde el 2001, cuando tuvo su valor más bajo de los últimos 20 años, cotizándose en USD \$4.39; desde entonces viene registrando una fuerte recuperación, luego de un periodo de altibajos, alcanzando en el 2012 una de las mayores cotizaciones alrededor de los USD \$50/Oz (figura 7). Para el 2016 el precio promedio anual fue de USD \$17.14/Oz. En la tabla 3 se indica la variación de precios de la plata en el periodo 1986-2016.

Entre el 2001 y el 2016 el precio de la onza de plata ha cuadruplicado su valor, lapso en que varió de USD \$4.39 a USD \$17.14. La variación ascendente de los precios es respuesta a la inversión y la demanda de usos y fabricación, especialmente en joyería y platería (Thomson Reuters, 2017).

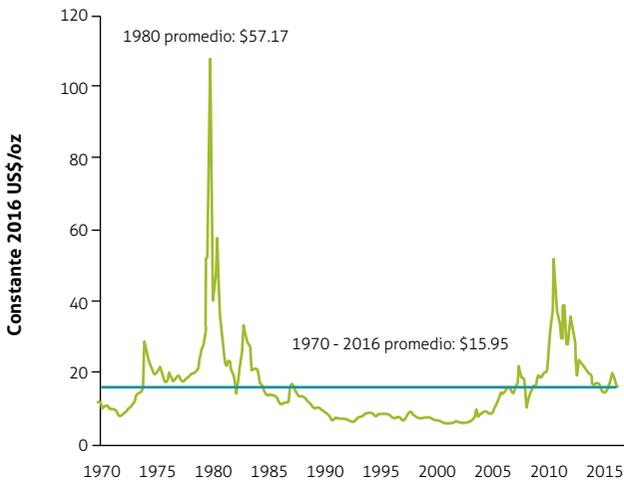


Figura 7. Variación del precio de la onza Troy de plata, 1970-2016
Fuente: Thomson Reuters (2017)

Tabla 3. Precio internacional de la plata entre 1986-2016 (USD \$/onza)

Precio de la plata en dólares				
	1986	1996	2006	2016
Promedio anual	5.46	5.20	11.55	17.14
Máximo	6.31	5.83	14.94	20.71
Mínimo	4.85	4.71	8.83	13.58
Rango: Promedio	27%	21%	53%	42%

Fuente: Thomson Reuters (2017)

2.6. Perspectivas

Un alto potencial como fuentes futuras del metal son los recursos y reservas de aquellos yacimientos donde la plata se recupera como subproducto de la minería de yacimientos de metales básicos (USGS, 2005), especialmente de pórfidos, vetas, brechas, *skarns*, mantos y sulfuros masivos estrato confinados.

Con respecto a la economía mundial, hay un leve crecimiento y cambios marcados en temas geopolíticos que pueden llevar a una mejora en el tema de inversión en *commodities*: países como Japón y China están estimulando la mejora en infraestructura, motivo por el cual se incrementará el consumo de este metal (Thomson Reuters, 2017).

3. Plata en Colombia

La plata en Colombia se obtiene, en su gran mayoría, como un subproducto de la explotación de oro, la cual contiene en promedio un 19 % de plata.

3.1. Geología regional

La plata, casi al igual que el oro en Colombia, se encuentra distribuida en la Amazonía-Orinoquía; las cordilleras Oriental, Central, Occidental, y los valles del Magdalena, Cauca y la costa Pacífica. Desde el punto de vista geológico se encuentra asociada al oro y otros metales en todos los ambientes generadores de roca, pero sustancialmente con menor grado de conocimiento que el oro, su principal acompañante. A continuación se presenta la descripción de las diferentes zonas argentíferas o potencialmente argentíferas y su relación con las zonas generadas en ambientes continentales y oceánicos, ubicadas de oriente a occidente.

3.1.1. Cratón Amazónico

En el Cratón Amazónico la plata no ha sido reportada oficialmente junto al oro como metal de valor industrial en rocas metamórficas (departamentos de Guainía y Vichada) (Renzoni, 1990). Las rocas metamórficas que afloran en el área están agrupadas en las unidades Complejo Mitú y Grupo Tunui. Atendiendo a las condiciones geológicas análogas con los depósitos auro-argentíferos sudafricanos de Witwatersrand, es de esperar aquí su presencia.

3.1.2. Bloque Norandino, dominio continental

El Bloque Norandino se encuentra conformado por una serie de terrenos, provincias o dominios de diferente composición litológica y edad adosados a la margen noroccidental del Cratón Amazónico a partir del Neoproterozoico.

3.1.2.1. Zona Cordillera Oriental

En la Cordillera Oriental la única región donde se conocen yacimientos de oro primario con plata relativamente abundante (relación Au/Ag 1:5) es el Macizo de Santander, correspondiente a la zona Santander-Perijá. Las rocas asociadas con la mineralización son rocas ígneas de composición granodiorita y edad Jurásico que intruyen metamorfitas del pre-Cámbrico y del Paleozoico. En la Cordillera Central los intrusivos se distribuyen desde los departamentos de Nariño y Putumayo, en el extremo sur, hasta Antioquia y Bolívar al norte, y corresponde a batolitos y *stocks* de composición principalmente granodiorita de edades Jurásico y Cretácico, y en menor proporción de rocas hipoabisales y volcánicas de edad Paleógeno y Neógeno. Como rocas encajantes principales se presentan esquistos negros y verdes de edad paleozoica, y vulcanitas continentales y calizas del Triásico. La actividad magmática en esta provincia ha originado filones hidrotermales, yacimientos metasomáticos y algunos disseminados.

3.1.2.2. Zona Segovia-San Lucas

Correspondiente a la parte norte de la cordillera, es la región con el mayor potencial auro-argentífero (Au-Ag) del país. Comprende el noreste de Antioquia y el sur de Bolívar, entre las fallas de Otú y Mulatos, con eventos magmáticos que van del Jurásico al Paleógeno y se relacionan con yacimientos de filón (Zaragoza, Segovia, Remedios), con roca de caja ígnea, metamórfica y sedimentaria; en esta zona se localizan los mayores placeres auríferos y argentíferos (Bagre, Nechí, Cuturú, Cacerí) (Salinas *et al.*, 1999).

3.1.2.3. Zona Antioquia-Sonsón-Silvia

Se destaca la parte central de Antioquia, Caldas y norte del Tolima. Los eventos magmáticos son en su mayoría de edad Cretácico y Paleógeno, y algunos de edad Neógeno; ocurren yacimientos de oro de filón y algunas mineralizaciones disseminadas. Las masas intrusivas sobresalientes por tamaño y relación genética con los yacimientos son los batolitos de Mocoa, Ibagué, El Bosque, Sonsón, Antioquia, además de algunos *stocks* (Payandé, Manizales).

3.1.2.4. Zona Ibagué-Mocoa

Se extiende entre los límites con Ecuador y la traza de la Falla de Ibagué, donde se presentan eventos magmáticos de edades Jurásico y Cenozoico. Los intrusivos de mayor tamaño son los batolitos de Ibagué y Mocoa, de composición cuarzomonzonita a granodiorita; las mineralizaciones son de filón y enrejado, pero relativamente escasas si se comparan con las otras dos zonas descritas. Hay prospectos disseminados tipo porfirítico en Cajamarca, El Pismo y Mocoa, y se han explotado algunos depósitos pequeños de *skarn*.

Las rocas ígneas asociadas con la mineralización primaria presentan una composición que varía entre félsica e intermedia, y se presentan en cuatro rangos de edades: Jurásico, Cretácico, Paleógeno y Neógeno.

En el Bloque Norandino, transición entre el dominio continental y el dominio oceánico, se encuentra la zona Cauca-Romeral, la cual corresponde a una franja de unos 50 km de ancho en promedio, localizada entre los sistemas de fallas del Cauca y Romeral. En esta zona se presentan rocas intrusivas (diques, *stocks*, batolitos) de edades Cretácico, Paleógeno y Neógeno, de composición félsica a intermedia (Ingeominas, 2006). De acuerdo con Salinas *et al.*, (1999), con los eventos magmáticos subvolcánicos del Neógeno se relacionan la mayor parte de las mineralizaciones de oro y plata de tipo vetiforme, disseminada y en enrejado.

Entre las regiones importantes están Marmato, Ginebra-Bolívar, San Pablo, Ancuyá, El Tambo- El Bordo, Fredonia-Titiribí, Mistrató y Quebradona (Jericó).

En el Bloque Norandino, dominio oceánico, se encuentra la zona Sierra Nevada-Guajira, en la que se reportan dos explotaciones de oro de filón hidrotermal de edad Neógeno, y unas pocas de aluvión (Salinas *et al.*, 1999); no hay datos sobre explotación económica de la plata. Esta provincia presenta condiciones geológicas comparables al Macizo de Santander, por lo que futuras investigaciones podrán definir la presencia o ausencia de plata.

3.1.3. Bloque Norandino, dominio oceánico, zona oceánica occidental

Está integrado por la Cordillera Occidental, la serranía del Baudó y la llanura del Pacífico, definiendo una franja localizada entre el litoral Pacífico y el sistema de fallas del Cauca; ha sido interpretada como una porción de litósfera oceánica acrecionada a la placa continental de Suramérica probablemente en el Neógeno.

En este dominio se presentan cuerpos intrusivos de composición félsica a intermedia (dacitas, riódacitas, cuarzodioritas) de edades Paleógeno y Neógeno (Ingeominas, 2006), entre los que se encuentran los batolitos de Mandé, Anchicayá y un conjunto de plutones localizados en los farallones del Citará, el páramo de Frontino, Morro Pelao, Morro Gacho, Cerro Plateado, Tamaná y Piedra Ancha.

Está compuesta por un basamento máfico de intraplaca oceánica que subyace a una secuencia volcano-sedimentaria del Cretácico inferior, con metamorfismo de bajo grado, conformada por metadiabasas y metasedimentitas (*chert*, calizas silíceas, limolitas y areniscas tobáceas).

La región ubicada al norte de la Falla de Garrapatas está conformada por el grupo Cañas Gordas y corresponde a la zona Mandé-Farallones. Los plutones e intrusivos subvolcánicos relacionados con las mineralizaciones primarias son en su mayoría de edad Neógeno, con algunos de edad Paleógeno, y los yacimientos son de filón en más de un 90 %; los restantes son en estoverca y estrato confinados. En esta provincia son muy importantes los placeres platino-auríferos.

La porción ubicada al sur de la Falla de Garrapatas corresponde al grupo Dagua e integra la zona Anchicayá-Piedra Ancha. Allí también los plutones e intrusivos subvolcánicos relacionados con las mineralizaciones primarias son en su mayoría de edad Neógeno y de tipo filoniano; uno de los aspectos diferentes, con respecto a la provincia norte, es la ausencia de placeres platiníferos.

3.2. Geología local

La minería de plata en Colombia ha estado ligada a la del oro y no se explotan yacimientos en los que la plata es el producto principal, sino que es subproducto. La plata se obtiene como subproducto de la explotación de depósitos auríferos hidrotermales emplazados en los intrusivos o en la roca encajante cerca de los contactos. La mineralización está controlada por fracturas que se orientan de manera preferencial en dirección noreste-suroeste y noroeste-sureste: las primeras son fallas normales y diaclasas formadas por distensión;

las segundas son de cizalla y coinciden con la orientación de la traza de los principales sistemas de falla.

Como se ha mencionado, en Colombia la plata se obtiene como un subproducto de la minería aurífera; por tanto, los datos de recursos no son reportados en ocasiones por las empresas productoras, salvo algunas de ellas. Por tal motivo, es difícil conocer un valor aproximado de cuánto representa este recurso en el país. En la figura 8 se representa la información obtenida del Mapa Metalogénico, versión 2016 en las provincias metalogénicas definidas por Salinas *et al.* (1999).

3.2.1. Filones epitermales

Se relacionan con vulcanismo subaéreo de edades Neógeno y Paleógeno, de composición félsica a intermedia y textura porfirítica y afanítica, principalmente asociados con rocas hipoabisales y volcánicas presentes en la Cordillera Occidental y algunas de la Cordillera Central. Estas menas presentan una mineralización más bien compleja, compuesta por abundante piritita + galena + esfalerita ± calcopiritita ± pirrotina ± arsenopiritita ± estibina, sulfosales de arsénico, selenio y teluro, con tetrahedrita, covelina y scheelita ocasional. El oro es de baja ley y la plata es más abundante.

Como ejemplo de filón epitermal se menciona el yacimiento Echandía (agotado), localizado en la parte apical del pórfido de Marmato. En esta mina hay predominio de plata nativa y minerales de plata; la plata se presenta en mayor cantidad que el oro (Shaw, 2000).

3.2.2. Filones hidrotermales no diferenciados

Por estar conectados con batolitos y *stocks*, que son cuerpos relativamente profundos, se infiere de manera tentativa una génesis magmática hidrotermal (no se diferencia su nivel de emplazamiento debido a que no muestran conexión con fuentes volcánicas). Estas masas de intrusivos, como se ha mencionado, se localizan en la Cordillera Central, en el Macizo de Santander y en la Sierra Nevada de Santa Marta, y presentan edades Triásico-Jurásico y Cretácico.

Presentan una mineralización constituida por piritita, galena, esfalerita ± calcopiritita ± pirrotina ± estibina ± pirrotina ± arsenopiritita ± tetrahedrita; raras veces proustitita, scheelita y uraninita. La ganga común es cuarzo ± feldespatos-K ± calcita. El oro se presenta en estado nativo y asociado a los sulfuros; la plata se recupera principalmente del *electrum* y de la galena. Acorde con la mineralización presente, pudieran representar depósitos de transición de meso a epitermales.

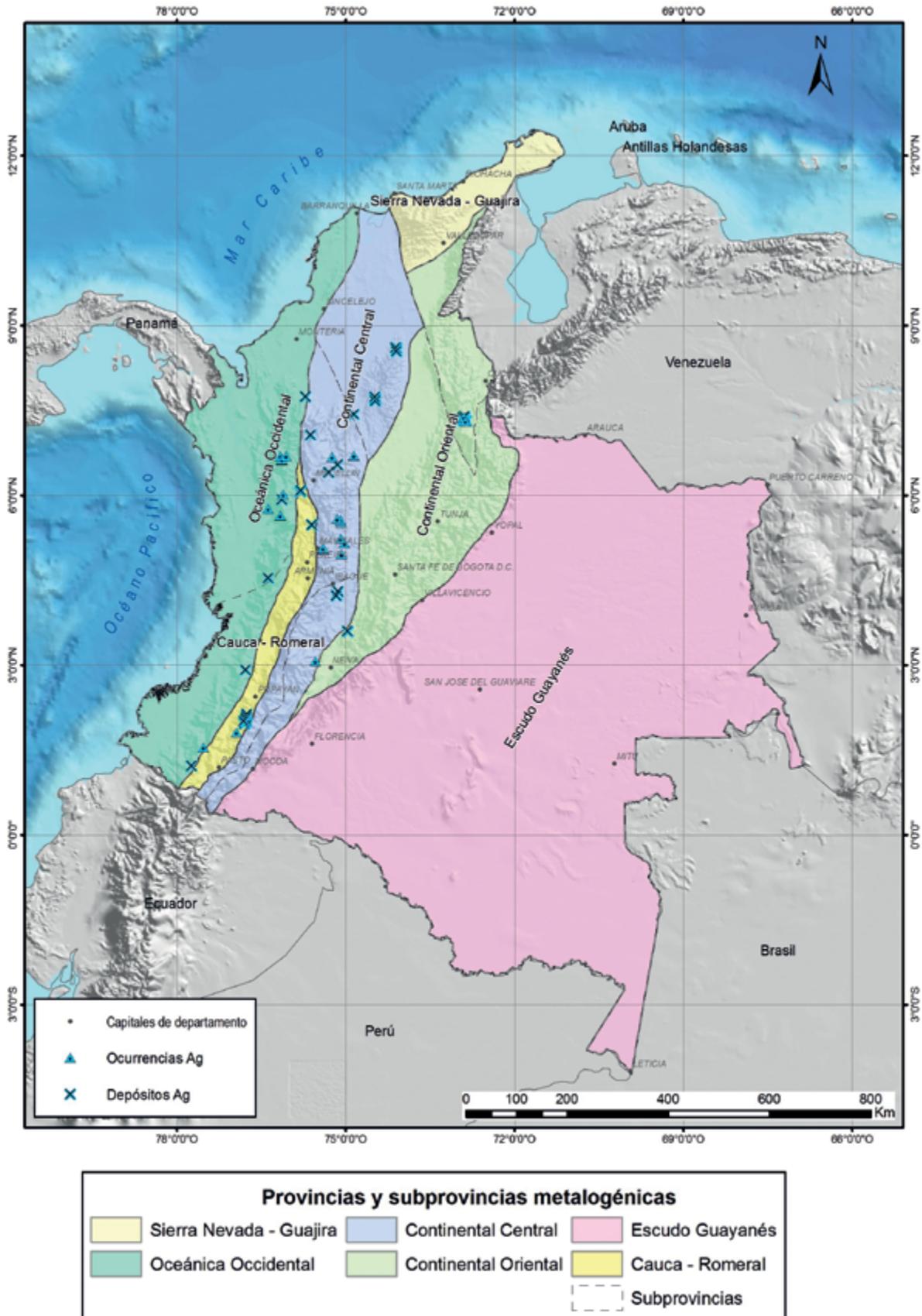


Figura 8. Mapa de manifestaciones de plata en Colombia

Fuente: Salinas *et al.* (1999); SGC (2016)

3.2.3. Zonas argentíferas

La plata es extraída actualmente como subproducto en las minas auríferas de Segovia y Remedios en el departamento de Antioquia; del sur del departamento de Bolívar; de las minas de Marmato en el departamento de Caldas; de la región central del departamento de Antioquia; del occidente de Antioquia; de la región Chocó-Antioquia; de las minas de Vetas y California en el departamento de Santander, y en los depósitos aluviales de los departamentos de Antioquia, Chocó y Nariño.

Segovia, Remedios, Zaragoza, Marmato y sur de Bolívar son las más importantes fuentes actuales de producción de plata; Vetas-California y la región Chocó-Antioquia son fuentes potenciales promisorias importantes.

3.2.3.1. Segovia-Remedios-Zaragoza

Comprende los municipios de Segovia, Remedios, Zaragoza y Vegachí en el departamento de Antioquia. Los depósitos filonianos con oro y plata están relacionados con plutones graníticos de los batolitos de Antioquia y Segovia. Este distrito es el más importante en minería de filón, destacando las minas El Silencio, Providencia y El Limón, que en general se explotan para oro y metales básicos.

Mina El Silencio. La roca encajante es la cuarzdiorita del Batolito de Segovia; la mineralización consta de oro nativo, pirita, esfalerita, galena, pirrotina, calcopirita, sulfosales de oro y plata y scheelita, con ganga de cuarzo y calcita.

Mina El Limón. En esta mina se explota un filón de 0.4 m; la roca huésped es un neis feldespático-micáceo y la mineralización está compuesta de oro nativo, galena, pirita, esfalerita, sulfosales de oro y plata en ganga de cuarzo.

Mina El Zancudo. Se localiza en Titiribí; los filones aparecen en zona de falla entre esquistos y conglomerados. Los minerales presentes en los filones de cuarzo son oro libre, pirita, esfalerita, galena, tetraedrita, proustita.

3.2.3.2. Región central de Antioquia

Comprende los municipios de Angostura, Alejandría, Belmira, Briceño, Gómez Plata, Guadalupe, San Carlos, San Rafael y Santa Rosa, Amalfi, Cisneros, Caracolí, Yolombó, Yalí, Anorí y Maceo. Las minas en la zona central son Berlín, El Zancudo y San Juan de Nepomuceno. En esta zona se encuentra localizado el proyecto de Nuevo Chaquiro, localizado en Jericó (Antioquia), el cual en sus reportes posee 78 000 000 de Oz de plata en sus recursos (Anglo-Gold, 2016).

3.2.3.3. Vetas y California

Se localiza en el municipio de California, departamento de Santander. Aunque actualmente su producción es relativamente baja, tiene un gran potencial. Este campo se conoce desde la Colonia y su explotación ha sido relativamente permanente. La actividad minera se localiza en las minas de Vetas y es la única región de la Cordillera Oriental con minería de filón hidrotermal; los filones tienen dirección general noreste-suroeste y constan de pirita, calcopirita, arsenopirita, galena, esfalerita, tetraedrita con oro y plata en ganga de cuarzo; en algunas minas se presenta uraninita.

3.2.3.4. Sur de Bolívar

Los yacimientos se localizan en la serranía de San Lucas, en los municipios de Barranca de Loba, Pinillos, San Martín de Loba y Achí. La mineralización ocurre en la zona de contacto entre el Batolito de Norosí, de edad Jurásico, y rocas volcánicas del Triásico; la composición del batolito es granodiorítica, diorítica y cuarzomonzonítica; la roca encajante son flujos riódacíticos, riolíticos, brechas y tobas (Ingeominas, 1983). La mineralización está asociada con los citados eventos magmáticos y se conocen filones tipo cuarzo-adularia epitermal (Au-Ag), en las zonas de contacto entre *stocks* graníticos y vulcanitas.

3.2.3.5. Marmato

La mineralización se concentra en filones epitermales de oro y plata, asociados con intrusivos hipoabisales de composición intermedia; los pórfidos andesíticos y dacíticos intruyen esquistos del Paleozoico. Se ha identificado filones que pueden llegar hasta los 7.5 m de espesor dentro del intrusivo y en ocasiones invaden el metamórfico. Las minas de Marmato son de las más ricas en plata en el país; contienen el 96% de pirita, el 1.5% de marmatita, < 1% de galena, algo de calcopirita y arsenopirita, en ganga de calcita y cuarzo, y pirrotina ocasional.

3.2.3.6. Chocó-Antioquia

Comprende un amplio sector de la Cordillera Occidental donde se localizan los arallones del Citará, los cerros Plateado y Tamaná, Morro Pelao y el Batolito de Mandé. A estos intrusivos se han asociado varias de las minas situadas en los municipios de Frontino, Andes, Betania, Bolívar, Dabeiba, Murindó, Salgar y Urrao en el departamento de Antioquia; Bagadó, El Carmen y Quibdó en el Chocó, y Mistrató en Risaralda.

El Batolito de Mandé es un intrusivo de naturaleza compleja, con una composición que varía desde granito, sienita, granodiorita, monzonitas y monzodioritas hasta

gabro-norita olivínica (Feldhaus *et al.*, 1992); se asocian intrusivos hipoabisales félsicos con sulfuros diseminados y diques básicos y dacíticos.

La mineralización se encuentra en fracturas dentro de la roca huésped, que puede ser el mismo intrusivo o la roca encajante. Los filones tienen diversa orientación, pero la tendencia que predomina es noroeste-sureste y noreste-suroeste, con espesores entre 0.4 y 2.5 m; en casos excepcionales se mencionan de 5 a 6 m. Esta orientación preferencial de los filones es de carácter regional, sugiriendo que dicho control estructural es de origen tectónico.

El proyecto La Equis se ubica en el municipio de Quibdó. Es uno de los más importantes de toda la Cordillera Occidental; aparece un filón con 2 m que contiene oro (12g/t), plata (19g/t) y esfalerita > 5%.

3.3. Situación actual de la minería

A continuación se hace una descripción de la situación actual de la minería de plata en el país.

3.3.1. Potencial

El país posee un gran potencial debido a la diversidad geológica del territorio, es así como, el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en el año 2011 realizó el Mapa de *Zonas con Potencial Integral de Colombia para Recursos Minerales* con el fin de determinar, calificar y clasificar zonas potenciales integrales para recursos minerales, de todos los grupos minerales, clasificándolas en zonas con potencial alto, medio y bajo (figura 9).

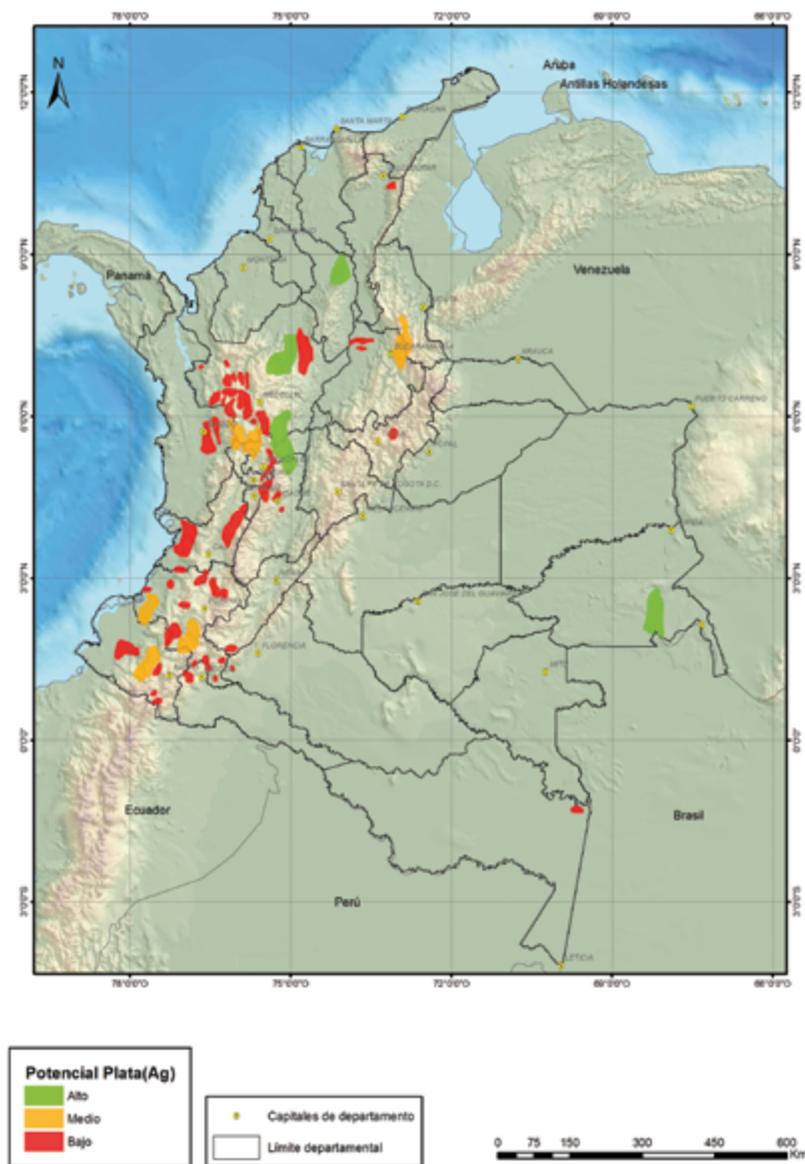


Figura 9. Mapa de potencial de plata en Colombia

Fuente: SGC (2011)

Desde el punto de vista de productividad y beneficios, la minería de la plata tiene muy poca incidencia en la economía del país; por una parte, por los bajos niveles de producción y, por otra, la nula actividad exploratoria específica para el metal en la actualidad y su dependencia casi absoluta de la minería del oro.

3.3.2. Comercio

Debido a la dependencia que tiene la plata del oro, la oferta de plata en Colombia está ligada esencialmente a la producción de oro, ya que no existe en el país una compañía que tenga como único propósito la producción de plata (UPME, Minercol e Ingeominas, 2001).

Entre 1991 y el 2016 la producción de plata de mina en Colombia se ha mantenido entre 5 y 10 t anuales (figura

10), presentando un valor máximo en el 2011 de 24 t y un mínimo de 3.5 t en 1997. Lo anterior mantiene a Colombia en el octavo lugar entre los productores de América Latina, pero con solo una participación del 0.1 % por lo que, en relación con el mundo, su producción actual es muy poco significativa.

La plata producida en el país se comercializa fundamentalmente en bruto semilabrada, y en menor proporción la producción se destina a la producción de joyas.

Como la producción de plata ha sido paralela a la del oro, los principales departamentos productores de oro lo son también de plata (tabla 4). En este caso vemos que Antioquia es el mayor productor de plata en Colombia, con un 73.82 % de la producción nacional, seguido de Caldas con el 15 % y Chocó con el 5 %.

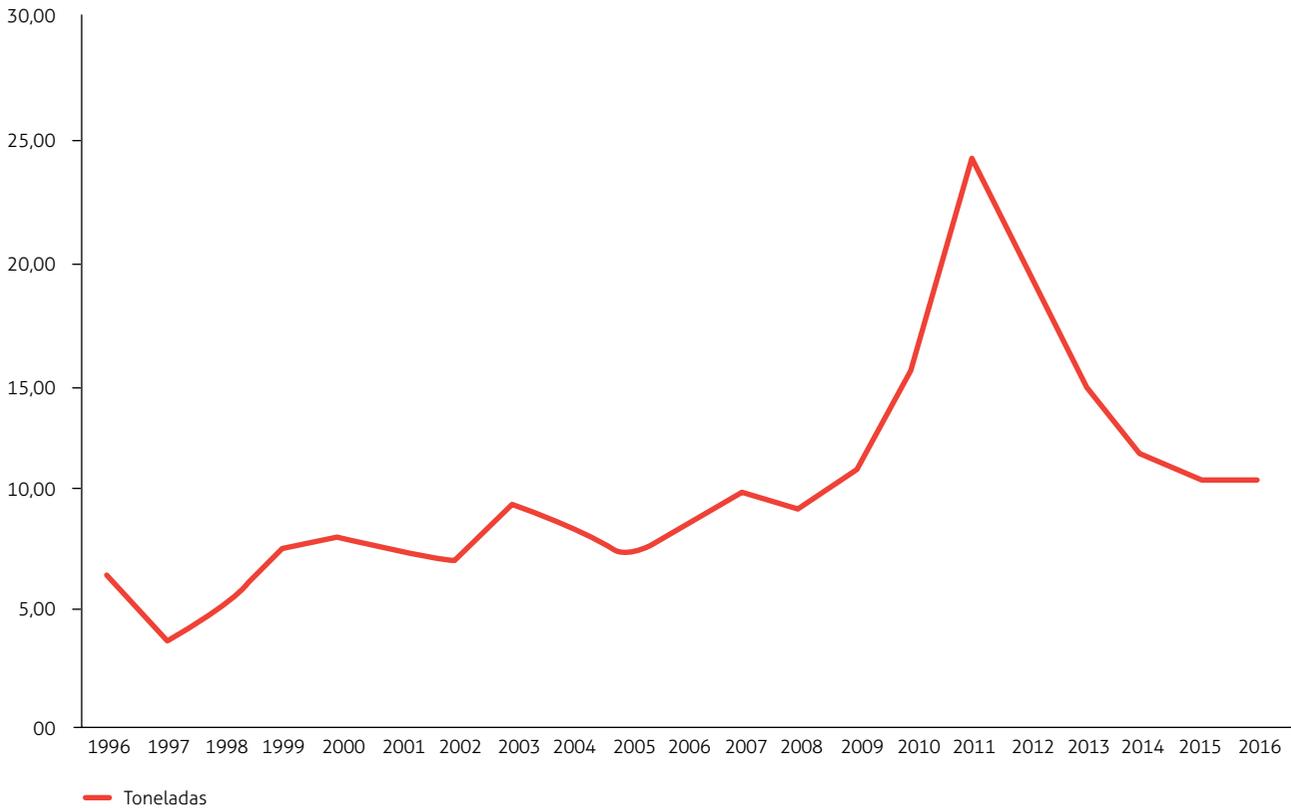


Figura 10. Variaciones de la producción de plata entre 1996 y 2016

Datos en toneladas

Fuente: UPME (2017)

Tabla 4. Producción de plata en Colombia por departamentos en el 1996-2016

Departamento	1996	2001	2006	2011	2016
Antioquia	2616.53	4260.36	5429.39	9223.21	7698.36
Bolívar	2627.48	161.54	285.54	5724.26	163.22
Caldas	484.31	1189.57	2246.76	2041.34	1553.20
Cauca	91.87	71.67	19.2	2.68	70.37
Chocó	58.86	85.93	217.49	6953.47	511.95
Córdoba	380.49	1383.54	61.21	1.01	17.71
Nariño	17.93	42.18	6.52	8.07	9.59
Risaralda	17.45	19.86	10.02	11.38	32.16
Santander	55.61	4.71	20.5	24.83	8.83
Tolima	10.68	15.13	93.31	42.41	301.7
Valle del cauca	37.62	6.34	1.24	1.15	6.02
Total	6406.9	7242.0	8399.0	24 045.1	10 427.4

Datos en kilogramos (kg)

Fuente: UPME (2017)

Para el año 2017 la Agencia Nacional de Minería informó la producción de plata en onzas Troy en el territorio nacional por departamentos (tabla 5).

Tabla 5. Producción de plata en Colombia por departamentos en el 2017

Departamento	Producción de plata en el 2017
Antioquia	215 837.21
Bolívar	18 905.78
Caldas	76 659.94
Caquetá	0.12
Cauca	2677.31
Chocó	24 899.54
Córdoba	872.06
Huila	187.02
Nariño	1533.70
Putumayo	0.00
Risaralda	633.77
Santander	270.78
Tolima	6 921.41
Valle del Cauca	90.86
Total	349 489.47

Datos en onzas Troy

Fuente: Agencia Nacional de Minería (2018)

Las exportaciones de plata también se hacen en bruto y semilabrado, y sumaron USD \$59 000 000 entre el 2010 y el 2016 (figura 11).

Sin embargo, surge la incertidumbre de su producción, debido a lo que se ha venido reiterando y es la dependencia de la plata de la minería del oro. De acuerdo con los datos de importación, exportación y producción, la demanda de plata en el país no tiene una oferta suficiente por parte de su producción interna, por lo que se deduce que en los próximos años las importaciones van a continuar en aumento.

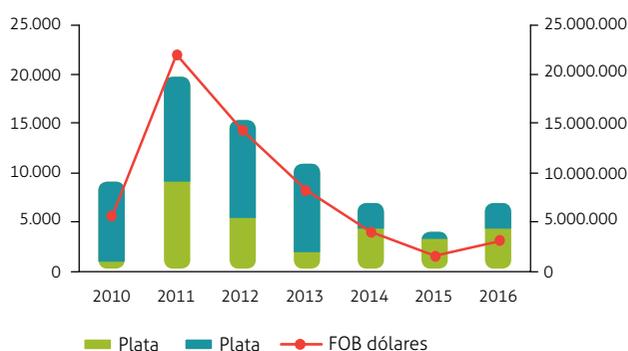


Figura 11. Exportación de plata
En millones de dólares en el periodo 2010-2016

Fuente: UPME (2017)

4. Aspectos ambientales y sustitutos

Las sales solubles de plata, especialmente el nitrato de plata (AgNO_3), son letales en concentraciones de hasta 2 g. Los compuestos de plata pueden ser absorbidos lentamente por los tejidos corporales, con la consecuente pigmentación azulada o negruzca de la piel (argiria).

Puede causar graves daños en la córnea si el líquido se pone en contacto con los ojos. Al contacto con la piel produce irritación, y cuando este es repetido y prolongado puede causar dermatitis alérgica. En cuanto a los peligros de la inhalación, la exposición a altas concentraciones del vapor puede causar mareos, dificultades para respirar, dolores de cabeza o irritación respiratoria. Concentraciones extremadamente altas pueden causar somnolencia, espasmos, confusión, inconsciencia, coma o muerte.

El líquido o el vapor pueden irritar la piel, los ojos, la garganta o los pulmones. El mal uso intencionado, consistente en la concentración deliberada de este producto e inhalación de su contenido, puede ser dañino o mortal.

Es moderadamente tóxico cuando se ingiere; puede causar molestias estomacales, náuseas, vómitos, diarrea y narcosis. Si el material se traga y es aspirado en los pulmones,

o si se produce el vómito, puede causar neumonitis química, que puede ser mortal (Química, s.f).

La sobreexposición crónica a un componente o varios componentes de la plata tiene los siguientes efectos en los órganos de los animales de laboratorio:

- Daños renales.
- Daños oculares.
- Daños pulmonares.
- Daños hepáticos.
- Anemia.
- Daños cerebrales.

En los humanos, la sobreexposición crónica a uno o varios componentes de la plata se supone tiene los siguientes efectos:

- Anormalidades cardíacas.
- Se ha informado de la relación entre sobreexposiciones repetidas y prolongadas a disolventes y daños cerebrales y del sistema nervioso permanentes.
- La respiración repetida o el contacto con la piel de la metil-etil-cetona puede aumentar la potencia de las neurotoxinas como el hexano, si la exposición tiene lugar al mismo tiempo.

Referencias

- Agencia Nacional de Minería. (2018). Así se movieron las cifras de producción de minerales en 2017. Disponible en <https://www.anm.gov.co/?q=asi-se-movieron-las-cifras-de-produccion-de-minerales-en-2017>
- AngloGold Ashanti. (2016). *Mineral resource and ore reserve report 2016*. Disponible en https://thevault.exchange/?get_group_doc=143/1502779473-2016MineralResourceandOre-ReserveReport.pdf
- Bateman, A. (1957). *Yacimientos minerales de rendimiento económico*. Barcelona: Omega.
- Comisión Chilena del Cobre (2006). *Mercado internacional de la plata y minería de la plata en Chile*. Disponible en <https://www.cochilco.cl/Paginas/Estudios/Mercados%20de%20metales%20e%20insumos%20estrat%C3%A9gicos/Mercado-Internacional-del-Oro-y-de-la-Plata-y-la-Miner%C3%A9-Da-en-Chile.aspx>
- Cornelius, S. y Hurlbut, C. (1981). *Manual de mineralogía* (2ª ed.). Barcelona: Reverté.
- Gestión de conocimiento para una minería artesanal. (s.f). *Procesos de beneficio de minerales*. Subproyecto “Asistencia técnica y capacitación para el desarrollo técnico y empresarial de Amalar”. Disponible en http://geco.mineroartesanal.com/tiki-download_wiki_attachment.php?attId=232
- Herrera, J. (2006). *Métodos de minería a cielo abierto*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Feldhaus, L., Muñoz, R., Salazar, G. y Schmidt, M. (1992). *Explicación del mapa geológico, escala 1:250.000, del flanco oeste de la Cordillera Occidental entre los ríos Andágueda y Murindó, Departamento de Antioquia y Chocó, República de Colombia*. Bogotá: Ingeominas.
- Ingeominas. (1983). *Evaluación de los recursos minerales no combustibles de Colombia. Evaluación del Proyecto Cooperativo Ingeominas-USGS*. Bogotá.
- Ingeominas. (2005). *Zonas potenciales para metales preciosos en Colombia*. Bogotá.
- Ingeominas. (2006). *Mapa geológico de Colombia, escala 1:2.800.000*. Bogotá.
- Ingeominas. (2011). *Mapa de zonas potenciales integrales de Colombia*. Bogotá.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1995). *Manual de arranque, carga y transporte en minería a cielo abierto*. Madrid.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (1997). *Manual de evaluación técnico- económica de proyectos mineros de inversión*. Madrid.
- Instituto Tecnológico GeoMinero de España. (2004). *Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería*. Madrid.
- Klein, C. y Hurlbut, C. (1997). *Manual de mineralogía, Cuarta edición. Basado en la obra de J. Dana*. Barcelona: Reverté, S.A.
- Mosier, D., Singer, D. y Berger, B. (1992). *Mineral Deposit Models*. Denver: United States Geological Survey (USGS).
- Química.com. (s.f). *Plata*. Disponible en <https://dequimica.com/web/tabla-periodica/plata/>
- Renzoni, G. (1990). *Secuencia aurífera de la serranía de Naquén: exploración geológica preliminar*. *Boletín Geológico*, 30(2), 45-89.
- Salinas, R., Rodríguez, C., Lozano, H., y Solano, F. (1999). *Mapa metalogénico de Colombia. Informe 2259*. Bogotá: Ingeominas.
- Sarmiento, L. (1987). *Minerales de plomo*. En *Recursos minerales de Colombia* (vol. I). Bogotá: Ingeominas.
- Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Mapa Metalogénico de Colombia. Versión 2016*. Bogotá.
- Shaw, R. (2000). *Gold Mineralisation in the Northern Andes: Magmatic Setting vs. Metallogeny. XI International Mining Congress*. Bogotá.
- Stanton, R. (1972). *Ore petrology*. Nueva York: McGraw-Hill.
- Thomson Reuters. (2017). *World Silver Survey*. Gold Fields Mineral Services (GMS). Disponible en <http://financial-risk-solutions.thomsonreuters.info/GFMS>
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME). (2017). *Boletín estadístico de minas y energía 2012-2016*. Disponible en http://www1.upme.gov.co/simco/Documents/Boletin_Estadistico_2012_2016.pdf
- Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), Minercol e Ingeominas. (2001). *MEDC 2000. Minerales estratégicos para el desarrollo de Colombia*. Bogotá: UPME.
- United States Geological Survey (USGS). (2005). *Silver: Minerals Yearbook*. Disponible en <https://search.usa.gov/search?utf8=%E2%9C%93&affiliate=usgs&sitelimit=&query=minerals+yearbook+silver&commit=Search>
- United States Geological Survey (USGS). (2014). *Minerals Yearbook. Silver [Advance Release]*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/myb1-2014-silver.pdf>
- United States Geological Survey (USGS). (2016). *Silver Statistics and Information. Minerals Information*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/silver/>
- United States Geological Survey (USGS). (2017). *Porphyry copper deposits of the world. Mineral Resources On-Line Spatial Data*. Disponible en <https://mrdata.usgs.gov/mineral-resources/porc.html>