

Oropimente y Rejalgar  
Servicio Geológico Colombiano  
Fotografía: Alejandra Cardona, SGC



# Arsénico

René F. Lugo Primelles y Rodolfo Gilart González

**Citación:** Lugo, R. y Gilart, R. (2019). Arsénico. En: *Recursos minerales de Colombia*, vol. 1. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

El arsénico ha sido uno de los elementos más mencionados desde la Edad Media hasta la moderna, aunque previamente fue conocido por chinos, romanos y griegos, y aun antes, por los babilonios. Así, en la biblioteca de ladrillos cuneiformes del palacio de Asurbanipal, en Nínive (668 a. C.), se describe prácticamente el sulfuro de arsénico. Los griegos usaron el actual óxido de arsénico como depilatorio, y no podemos olvidar que 4000 años antes de la era cristiana, el arsénico intervenía en la elaboración de los primeros bronce. Sin embargo, el arsénico se divulgó en las civilizaciones primitivas por medio de compuestos o sustancias que contenían dicho elemento, que por su color (amarillo o dorado) y aspecto (polvillo), según se pensaba, podían favorecer la conversión de los metales en oro, y por lo tanto entró de lleno en el campo de la alquimia como medio para elaborar la píldora de la inmortalidad, la conclusión de la Gran Obra o búsqueda de la piedra filosofal, que supuestamente servía para transmutar los elementos de partida en oro. Los nombres de los minerales de arsénico, rejalgal y oropimente, son tan viejos como sus usos por las civilizaciones antiguas.

Por muchos años el arsénico fue utilizado fundamentalmente en la industria del vidrio, en forma de  $As_2O_3$ , al que llamaban *arsénico blanco*. A mediados del siglo XX, con el desarrollo de los insecticidas, adquirió gran importancia, especialmente en forma de arsénico blanco, utilizado para la fabricación de arseniatos de calcio y plomo. Actualmente este empleo ha perdido relevancia con el desarrollo de los insecticidas orgánicos; sin embargo, se han diversificado sus usos, y por ello aún es un producto importante.

Los depósitos comerciales con minerales de arsénico tienen origen hidrotermal y es posible encontrarlos en yacimientos hipotermales, mesotermales y epitermales. Los principales depósitos productores de arsénico se enmarcan en los siguientes tipos: vetas clásicas de uranio, vetas pentaelementos de Ag-Ni-Co-As± (Bi, U), depósitos subvolcánicos de Cu-Au-Ag (As, Sb), epitermales de alta sulfuración de Au-Ag-Cu, depósitos de oro diseminado

hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin) y en fuentes termales subacuáticas de Au-Ag.

Lo anterior permite concluir que en Colombia existe potencialidad de localizar depósitos en la Provincia Litosférica Continental Mesoproterozoica Grenvilliana (PLCMG), Provincia Litosférica Oceánica Neoproterozoica Arquía (PLONA), Provincia Litosférica Oceánica Cretácica La Guajira (PLOGG) y Provincia Litosférica Oceánica Cretácica Occidental (PLOCO), que incluyen las provincias metalogénicas Continental Oriental, Continental Central, Cauca Romeral, Sierra Nevada-Guajira y Oceánica Occidental, asociados principalmente con mineralizaciones de metales preciosos y básicos.

## 1. Usos

El arsénico y sus compuestos son utilizados en la actualidad como pesticidas, herbicidas, insecticidas y en variadas aleaciones.

Entre los usos de mayor relevancia cabe mencionar el de preservante de la madera (arseniato de cobre cromado), uso que representa, según algunas estimaciones, cerca del 70 % del consumo mundial de este elemento.

Los siguientes son otros usos importantes del arsénico:

- Insecticida (arseniato de plomo), herbicidas (arseniato de sodio) y venenos.
- El arseniuro de galio es un importante material semiconductor empleado en circuitos integrados más rápidos y caros que los de silicio. También se usa en la construcción de diodos láser.
- Aditivo en aleaciones de plomo y latones.
- El disulfuro de arsénico se usa como pigmento y en pirotecnia.
- Decolorante en la fabricación del vidrio (trióxido de arsénico).

Históricamente se ha empleado con fines terapéuticos prácticamente abandonados por la medicina occidental, aunque recientemente se ha renovado el interés por su uso, como demuestra el caso del trióxido de arsénico para el tratamiento de pacientes con leucemia promielocítica aguda.

Atendiendo a sus propiedades nocivas para la salud, se recuerdan los síntomas que presenta el organismo cuando es expuesto al arsénico:

- La exposición ligera puede limpiar lesiones de la piel como el acné.
- Fatiga, malestar y náuseas van acompañadas de aliento a ajo. Se pueden presentar eczemas o dermatitis alérgicas con lesiones en la piel y membranas mucosas, con pérdida del color de la piel (hipopigmentación), pérdida del cabello, manchas blancas en las uñas, conjuntivitis, bronquitis y gingivitis.
- Salivación excesiva, estomatitis, dolor abdominal.
- Neuropatías, hemólisis, anemia, carcinomas.
- La exposición prolongada al arsénico puede acelerar la arteriosclerosis de la arteria carótida.

## 2. Ambiente geológico

En este capítulo se describen las características generales del arsénico, tales como la mineralogía y composición, los tipos de depósitos a nivel mundial, así como los métodos de prospección, sistemas de explotación y procesamiento de minerales; además, se hace un análisis de los recursos, reservas y comercio a escala mundial de este mineral.

### 2.1. Características

A continuación se describen las principales características del arsénico.

#### 2.1.1. Geoquímica

El arsénico es el 52.º elemento en abundancia de la corteza terrestre, con 2 ppm ( $5 \cdot 10^{-4}$  %), y es uno de los veintidós elementos químicos conocidos que se componen de un solo núcleo estable. El arsénico adopta la forma tetraédrica en su estructura molecular  $As_4$ , donde cada átomo está bordeado por otros tres que comparten sus electrones en enlace covalente. La forma más estable a temperatura ambiente es la metálica  $As^0$ , de color gris y brillo metálico. El arsénico puede comportarse como metal o como no metal, dependiendo de cómo forme sus agregados, según el balance del uso de la menor energía con la mayor entropía.

El arsénico se encuentra en forma nativa y, principalmente, en forma de arseniuros, sulfoarseniuros, en una gran variedad de minerales que contienen oro, cobre, plomo, hierro (arsenopirita), níquel, cobalto y otros metales.

El arsénico es el más común de los elementos traza asociados con la mineralización de oro en la mayoría de los depósitos de este metal hospedados en rocas sedimentarias. Por lo regular está presente en la pirita como sustituto isomórfico, en bordes de crecimiento y también en minerales independientes como arsenopirita, rejalgar, oropimente o arsénico nativo. El contenido de arsénico en la mina Carlin se encuentra en el rango de 400 a 500 ppm, con un valor máximo de 2.5 %. En algunos depósitos de oro hospedados en sedimentos en China se ha enriquecido el arsénico a niveles económicos; tal es el caso de Jinyia (As: 0.44-1.89 %) y de Pingding (As: 3.99-15 %).

Por lo anterior, el arsénico puede ser usado como elemento guía en la exploración de yacimientos de cobre, oro, plata, plomo, zinc, uranio y cobalto, mediante la investigación de suelos, aguas y sedimentos; también bajo condiciones especiales, el contenido de arsénico en plantas representa una herramienta de prospección de gran utilidad.

#### 2.1.2. Mineralogía

Al arsénico se lo encuentra, como ya se ha expresado, tanto nativo como en diferentes compuestos. Por lo general está en la superficie de las rocas combinado con azufre o metales como manganeso, hierro, cobalto, níquel, plata y estaño. El principal mineral del arsénico es la arsenopirita,  $FeAsS$  (figura 1); otros arseniuros metálicos son los minerales lollingita ( $FeAs_2$ ), nicolita ( $NiAs$ ), cobalto brillante ( $CoAsS$ ), gersdorfitita ( $NiAsS$ ) y esmaltita ( $CoAs_2$ ).

El mundo antiguo conoció solamente dos compuestos de arsénico: los sulfuros rejalgar,  $As_2S_2$ , y oropimente,  $As_2S_3$  (figura 2). El rejalgar es una sustancia clara, liviana y translúcida de color rojo anaranjado fuerte, que ha sido usado como pigmento. El oropimente, también usado como pigmento, es una sustancia clara, liviana y translúcida de color amarillo. La naturaleza tóxica del arsénico nunca fue descubierta por los antiguos.

El rejalgar y el oropimente son productos de alteración secundaria que se encuentran asociados al arsénico metálico nativo. En ellos, el arsénico actúa como metal, pero sus compuestos son principalmente covalentes. El arsénico nativo es raro, aunque se encuentra en algunos sitios del planeta, tales como las montañas Harz y Erzgebirge, en Alemania.

Los arseniatos y tioarseniato naturales son comunes, y la mayor parte de los sulfuros minerales contienen arsé-

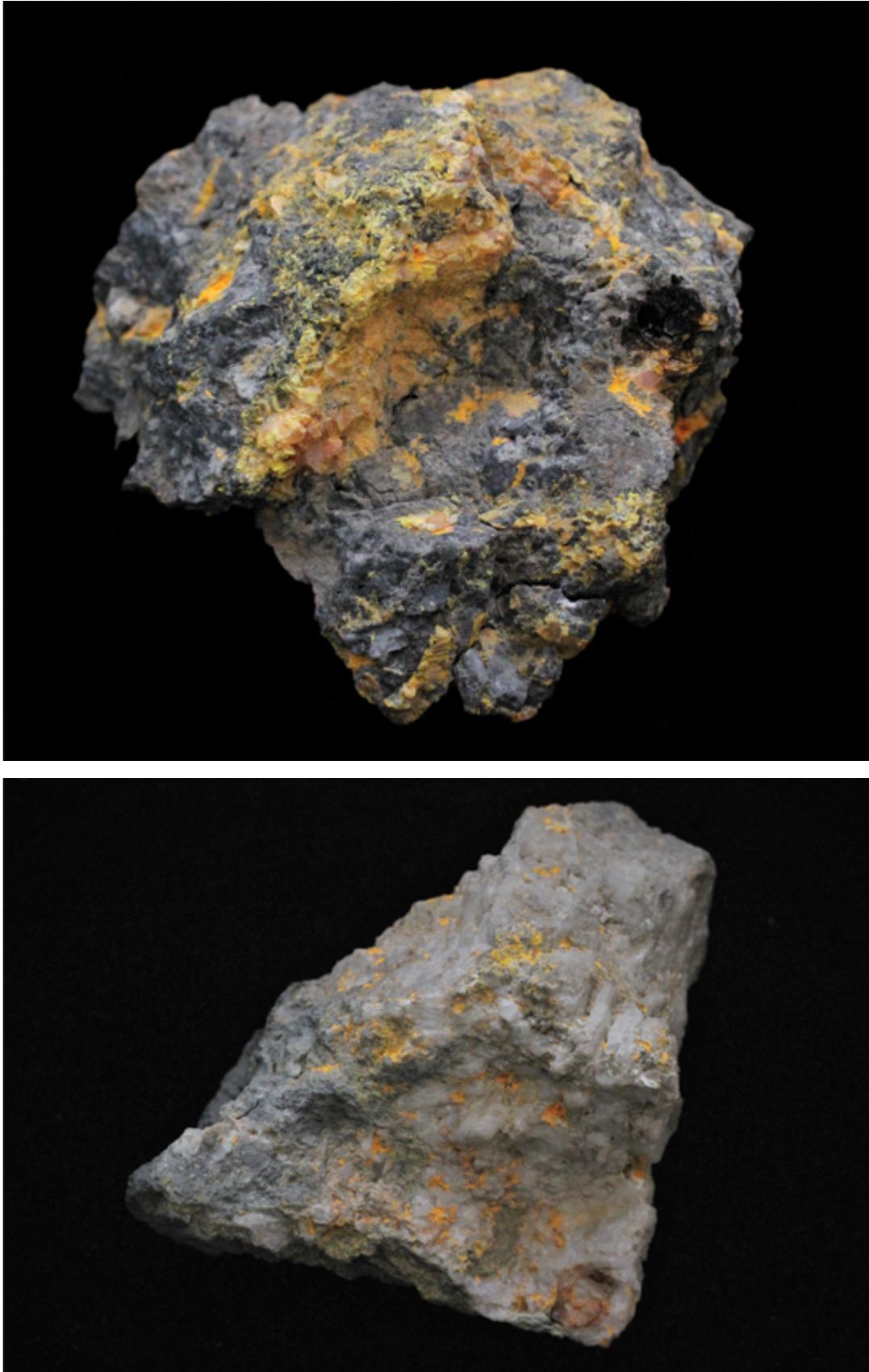
nico. El óxido, arsenolita,  $As_4O_6$ , se encuentra como producto de la alteración debida a los agentes atmosféricos de otros minerales de arsénico, y también se recupera de los polvos colectados de los conductos durante la extracción de níquel, cobre y estaño, igualmente, se obtiene al calcinar

los arseniuros de hierro, cobalto o níquel con aire u oxígeno. El elemento puede obtenerse por calcinación de arsenopirita, loellingita  $FeAsS$  o  $FeAs_2$  en ausencia de aire o por reducción de  $As_4O_6$  con carbonato, cuando se sublima  $As_4$ .



**Figura 1.** Arsénico

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Fotografía: Jair Ramírez, SGC



**Figura 2.** Fotografías de oropimente y realgar en cuarzo (arriba), y oropimente- realgar (abajo)

Fuente: Servicio Geológico Colombiano. Jair Ramírez, SGC

## 2.2. Tipo de depósito

El arsénico, nativo o en compuestos minerales, se encuentra asociado a un amplio número de depósitos minerales de variados tipos, donde en su gran mayoría se presenta como un subproducto de otros elementos principales, así como en cantidades no comerciales en algunos depósitos. Constituye concentraciones económicamente explotables en los tipos de depósitos siguientes: vetas clásicas de uranio, vetas pentaelementos de plata- níquel- cobalto- arsénico  $\pm$  (bismuto, uranio), depósitos subvolcánicos de cobre, oro, plata (arsénico, antimonio), epitermales de alta sulfuración de oro-plata-cobre, depósitos de oro diseminado hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin) y en fuentes termales subacuáticas de oro- plata Au-Ag (BCGS, 2002).

### 2.2.1. Vetas clásicas de uranio

Son vetas de pechblenda, coffinita o brannerita, con pequeñas cantidades de otros minerales metálicos asociados en una ganga de carbonato y cuarzo. Estos depósitos tienen afinidad con vetas pentaelementos y pueden gradar hacia ellas cuando presentan significativos contenidos de plata, arseniuros de cobalto- níquel, bismuto u otros minerales metálicos. Se desarrollan en ambientes continentales posorogénicos, asociados comúnmente con el plutonismo calcoalcalino félsico y rocas volcánicas. La secuencia encajante común son capas rojas y sedimentos de cuencas extensionales. Los depósitos económicos se ciñen a las áreas sobre basamento proterozoico. La mena se deposita en los espacios abiertos de las zonas de fractura (zonas de dilatación), brechas y estovercas asociadas comúnmente con los sistemas de fallas de ángulo abrupto, de orden principal o secundario, así como en zonas de cizalla. Existen depósitos desde el Proterozoico hasta el Terciario.

Hay una amplia variedad de rocas huéspedes que incluyen rocas graníticas, como granitos peraluminosos de dos micas y sienitas, rocas volcánicas félsicas, rocas sedimentarias antiguas y rocas metamórficas. Algunos depósitos presentan afinidad con diabasas, diques y silos de lamprófidos. Los cuerpos minerales son tabulares o prismáticos, con un espesor de hasta 15 m, y tienen una continuidad, en profundidad, de hasta 2 km.

Las vetas de uranio se encuentran generalmente en áreas de alto Clarke de uranio, y además, por lo general se desarrollan otros tipos de depósitos de Uranio en la vecindad. Las vetas pueden considerarse poligenéticas. El Uranio aparece como derivado de los diferenciados magmáticos finales de granitos y rocas alcalinas con altos contenidos de potasio y sodio. El uranio es separado de las

rocas parentales por soluciones acuosas que se pudrían originar bien como hidrotermales de baja temperatura, conatas o por fluidos meteóricos. Las opiniones están divididas sobre la fuente de los fluidos, pero algunos prefieren modelos que incorporan fluidos mixtos. Estudios de isótopos de carbono y oxígeno indican que las soluciones mineralizantes en muchos casos son fluidos hidrotermales que se han mezclado con agua meteórica. En algunos casos la temperatura excede los 400 °C durante el proceso de mineralización. Tipos de depósitos asociados son estratoconfinados, ocurrencias minerales diseminadas y pegmatíticas de uranio en rocas metamórficas, con arsénico no comercial. Otros casos son los depósitos de Uranio encajados en areniscas y depósitos superficiales.

Pertenecen a este tipo de depósitos: ocurrencias minerales Purple Rose, Fisher, Dixie, Cy 4, Mir 3 e IRA, Ace Fay-Verna y Gunnar, área Beaverlodge (Saskatchewan, Canadá); distrito Christopher Island-Kazan-Angikuni, área Baker Lake (Northwestern Territories, Canadá); Millet Brook (Nova Scotia, Canadá); Schwartzwalder (Colorado, EE. UU.); distrito Xiazhuang (China); área La Crouzille, distrito Macizo Central y Vendée, macizo Armoricano (Francia); distritos Jáchymov y Příbram (República Checa); Shinkolobwe (provincia Shaba, Zaire).

### 2.2.2. Vetas pentaelementos de plata-níquel-cobalto-arsénico $\pm$ (bismuto, uranio)

Son vetas carbonatadas con plata nativa asociada a una amplia paragénesis mineral que raramente se encuentra en otros ambientes, tales como arseniuros de níquel- cobalto- hierro, sulfoarseniuros de níquel- cobalto- hierro- antimonio y minerales de bismuto. En muchos casos, solo algunos de estos minerales están presentes, aunque los mejores ejemplos contienen tenores significativos de plata- níquel- cobalto. La uraninita (pechblenda) es un mineral presente en buena cantidad en algunos depósitos. Ocurren virtualmente en áreas sobre la corteza continental, en ambientes postectónicos, en algunos casos en cuencas de subsidencia y elevación (*rifting*) continental. Se considera que las vetas se emplazan a profundidades someras a lo largo de sistemas de fallas de ángulo abrupto.

Las rocas huéspedes más comunes son metasedimentos, rocas intrusivas metamorfizadas y secuencias graníticas. En el campo mineral, los silos de diabasas son muy importantes, en tanto que en Thunder Bay (Canadá) se encuentran en diques de gabro. Los depósitos están conformados por vetas simples o por grupos de vetas, centimétricas a métricas en espesor, en tanto que su continuidad normalmente no excede los 500 m de profundidad.

Comúnmente, cuando se forman rellenan espacios con múltiples episodios de deposición, en los que los sulfuros se distribuyen de forma irregular en cuerpos podiformes, bandas, dendritas, placas y diseminaciones.

Los minerales de la mena son plata nativa, arseniuros de níquel- cobalto (rammelsbergita, safflorita, nicolita, etc.), sulfoarseniuros de cobalto, níquel, hierro y antimonio, bismuto nativo, bismutinita, argentita, pirita, uraninita, y otros menores, como calcopirita, bornita y calcocita. Estas vetas se caracterizan por la ausencia de oro. Calcita y dolomita son los minerales más comunes de ganga, que además incluye cuarzo, jaspe, barita, y fluorita en menor proporción.

Las vetas ocupan fallas con una o dos direcciones preferentes en un distrito dado, donde las bonanzas aparecen en las bandas de dilatación dentro de las vetas. En las zonas de extensión cortical, las fallas controlaron el ascenso de fluidos hidrotermales hasta sitios favorables para la deposición de metales a profundidades aproximadas de 1 a 4 km bajo la superficie. Los fluidos fueron salmueras fuertemente salinas a temperaturas de 150-250 °C, que pueden haberse derivado de los últimos estadios de diferenciación magmática, circulación convectiva de aguas en las rocas encajantes provocada por el enfriamiento de fases intrusivas o la formación de salmueras que migraban hacia arriba o hacia los bordes de las cuencas sedimentarias. Fuentes potenciales de metales son los estratos ricos en sulfuros y *shales* carbonáceos. Tipos de depósitos asociados con estas vetas son vetas clásicas de Uranio y vetas polimetálicas.

Son ejemplos de este tipo de depósitos Beaver y Timiskaming, Cobalt Camp, Silver Islet, distrito Thunder Bay (Ontario, Canadá); Echo Bay y Eldorado (Port Radium, Northwest Territories, Canadá); distrito Black Hawk (New Mexico, EE. UU.); distrito Batopilas (México); Johanngeorgenstadt, Freiberg y Jáchymov, distrito Erzgebirge (Alemania); Kongsberg-Modum (Noruega).

### 2.2.3. Depósitos subvolcánicos de cobre-oro-plata (arsénico, antimonio)

Se desarrollan vetas piríticas, estovercas y brechas en cuerpos intrusivos subvolcánicos, con reemplazamientos discordantes a estratoconfinados de pirita masiva, vetas, estovercas, diseminaciones y brechas hidrotermales relacionadas con las rocas huéspedes. Estos depósitos se localizan cerca o sobre los de tipo porfídico y contienen mineralización aurífera polimetálica pirítica, con sulfosales de plata y otros minerales de arsénico y antimonio. Los cinturones volcano-plutónicos de arcos de islas y márgenes continentales, arcos volcánicos continentales e intrusiones

subvolcánicas son los ambientes geotectónicos más abundantes. Los más altos niveles de sistemas intrusivos y las rocas encajantes fracturadas y permeables de terrenos volcánicos con estratovolcanes erosionados, domos y complejos flujo-dómicos son los ambientes de presentación de la mineralización. Se distinguen *stocks* y complejos flujo-dómicos riodacíticos a dacíticos, gruesos a fino granulares, con intrusiones cuarzo-porfídicas. Si las rocas volcánicas son coetáneas, ellas varían desde andesitas hasta riolitas. Son principalmente de edad Terciaria, aunque se han identificado algunos depósitos más antiguos.

La pirita presente es comúnmente aurífera, a la que se asocia calcopirita, tetraedrita-tennantita, enargita-luzonita, covelina, calcocita, bornita, esfalerita, galena, arsenopirita, argentita, sulfosales, oro, estibnita, molibdenita, wolframita o scheelita, pirrotina, marcasita, rejalgar, oropimente, hematita, estaño y minerales de bismuto; que son la paragénesis mineral de estos depósitos. Se distingue una zonación hacia la profundidad: la enargita cerca de la superficie, que pasa gradualmente a tetraedrita-tennantita + calcopirita y a calcopirita en el ambiente porfídico. La ganga está constituida por pirita, cuarzo, sericita, caolinita, alunita, jarosita (supergena). En zonas cercanas a la superficie pueden presentar mantos limoníticos de meteorización con abundante jarosita y goethita, y localmente, alunita.

Estos depósitos representan una transición de los de tipo porfídico hacia las condiciones epitermales con una entremezcla de las características porfídicas y epitermales. La mineralización se relaciona estrechamente con sistemas evolutivos hidrotermales derivados de intrusiones porfíricas subvolcánicas. Es típica la zonación vertical y la sobreimpresión de tipos diferentes de menas, debido en gran parte al telescopaje de los estadios de mineralización. Los fluidos mineralizantes con cantidades variables de aportes de fluidos magmáticos tienen temperaturas generalmente mayores a las de los sistemas epitermales, en el orden de 300 °C y mayores. Tienen, además, alta salinidad, mayor al 10% en peso equivalente de cloruro de sodio.

La mineralización está controlada por zonas fuertemente fracturadas y ripladas en las cúpulas y partes internas de intrusiones y complejos flujo-dómicos. Además, por las litologías con permeabilidad primaria o secundaria de las rocas encajantes. Depósitos asociados son los porfidos de cobre-oro±molibdeno, epitermales de alta y baja sulfuración, vetas cuarzo-piríticas auríferas y sulfuros masivos enargíticos.

Depósitos de este tipo son Equity Silver, Prospecto Thorn, distrito Rochester (Nevada, EE. UU.); Kori Kollo

(Bolivia); las zonas de oro epitermal de Lepanto (Filipinas); partes de Recksk (Hungría) y Bor (Serbia).

#### 2.2.4. Depósitos epitermales de alta sulfuración de oro-plata-cobre

Se presentan vetas, brechas vesiculares y reemplazamientos de sulfuros desde podiformes hasta lentes masivos en secuencias volcánicas asociadas a los niveles altos de sistemas hidrotermales marcados por la lixiviación ácida y las alteraciones argílica avanzada y silíceas. Se forman en ambientes extensionales y transtensionales, comúnmente en margen continental volcánico-plutónico, arcos oceánicos y zonas de retroarco; en las zonas de emplazamientos magmáticos someros donde están construidos estratovolcanes y otros tipos de edificios volcánicos sobre plutones. Su ambiente de deposición es subvolcánico a volcánico en calderas, complejos flujo-dómicos, raramente *maars* y otras estructuras volcánicas, asociadas frecuentemente con *stocks* volcánicos, diques y brechas. Recubren y están genéticamente relacionados con los sistemas porfídicos en intrusiones mineralizadas más profundas.

Comúnmente son de edad Terciaria a Cuaternaria, menos frecuentes del Mesozoico y raramente de cinturones volcánicos del Paleozoico. La preservación escasa de los depósitos más antiguos refleja una tasa rápida de erosión antes del enterramiento de los volcanes subaéreos en arcos tectónicamente activos. Las rocas encajantes volcánicas lávicas y piroclásticas generalmente van de andesitas hasta riolitas subaéreas junto con sus equivalentes subvolcánicos. También pueden ser huéspedes de la mineralización los sedimentos permeables entre unidades volcánicas. Vetas, lentes y cuerpos podiformes de sulfuros masivos de reemplazamiento, estovercas y brechas son las morfologías frecuentes. Se observan también formas irregulares, determinadas por la permeabilidad de la roca huésped y la geometría de las estructuras controladoras, así como vetas entrelazadas. En ellos es característica la sílice porosa vesicular (*vuggy*) como producto residual de la lixiviación ácida, drusas, vetas bandeadas, brechas hidrotermales y reemplazamientos masivos de la roca huésped por cuarzo fino granular.

Como paragénesis mineralógica se presentan piritita, enargita-luzonita, calcocita, covelina, bornita, oro, electrum; calcopirita, esfalerita, tetrahedrita-tennantita, galena, marcasita, arsenopirita, sulfosales de plata, telururos incluyendo goldfieldita. Se separan dos tipos de mena: enargita-piritita masiva (mena sulfurada) y cuarzo-alunita-oro (mena oxidada). La ganga es de piritita y cuarzo, en ocasiones barita. Los carbonatos están ausentes. La mine-

ralogía de alteración es amplia: cuarzo, caolinita/dickita, alunita, barita, hematita, sericita/illita, arcillas y sílice, pirofilita, andalucita, diásporo, corindón, turmalina, zunyita, etc. Las rocas meteorizadas pueden contener abundante limonita (jarosita-goethita-hematita) en una masa de caolinita y cuarzo.

La mineralización está controlada por la estructura anular y fracturas radiales de los edificios volcánicos-calderas, grupos de fracturas en domos resurgentes y complejos flujo-dómicos, tubos de brechas hidrotermales y diatremas, además de fallas y brechas dentro y alrededor de centros intrusivos, y litologías permeables. Los depósitos se encuentran en un amplio rango de profundidad, desde las solfataras de la paleosuperficie hasta las cúpulas de cuerpos intrusivos en profundidad.

Investigaciones recientes, fundamentalmente en el suroeste del Pacífico y los Andes, muestran que estos depósitos se formaron en complejos (volcánicos subaéreos o volcanes compuestos de arcos de islas sobre las zonas de degasificación de las cámaras magmáticas). Es común que ellos estén relacionados genéticamente con intrusiones someras. Son comunes los estadios múltiples de mineralización, relacionados presumiblemente con el tectonismo periódico propio de la actividad intrusiva y la generación del fluido magmático hidrotermal. A estos depósitos se asocian los de tipo porfídico (cobre-molibdeno-oro), subvolcánicos de cobre-plata-oro (arsénico, antimonio), epitermales de baja sulfuración oro-plata, fuentes termales de oro-plata y depósitos de placeres.

Los siguientes son ejemplos de depósitos: Mt. McIntosh/Hushamu, depósitos Taseko River-Westpine, Taylor-Windfall y Battlement Creek (Columbia Británica, Canadá); Goldfield y Paradise Peak (Nevada, EE. UU.); Summitville (Colorado, EE. UU.); Nansatsu (Japón); El Indio (Chile); Temora (Nueva Gales del Sur, Australia); Pueblo Viejo (Rep. Dominicana); Chinkuashih (Taiwan); Rodalquilar (España); Lepanto y Nalesbitan (Filipinas).

#### 2.2.5. Depósitos de oro diseminado hospedados en rocas sedimentarias (tipo Carlin)

En la producción mundial, es el tipo de depósito más importante en cuanto al aporte de arsénico. Los principales distritos minerales del mundo se encuentran en los Estados Unidos (estado de Nevada) y en China, en las provincias de Guizhou, Sichuan, Yunnan, Guangxi, Shanxi, entre otras. El principal productor mundial de arsénico es el depósito de Qiaoqiaoshang, de la provincia Sichuán, donde se acumulan los concentrados minerales de rejalgar y oropimente para luego ser procesados en Ghizhou.

Se caracterizan por su granulometría muy fina, el oro en fracción micrométrica y los sulfuros diseminados en las zonas de descarbonatación de las rocas calcáreas y jaspeoides asociados. La ocurrencia del oro es a través de las rocas huéspedes en forma de cuerpos concordantes con la estratificación y en brechas discordantes. Pertenecen a ambientes tectónicos de márgenes continentales pasivos con deformación subsecuente y actividad intrusiva y, posiblemente en terrenos de arcos de islas. Las rocas huéspedes de los depósitos de Nevada, EE. UU., se depositaron en ambientes transicionales de *shelf*-cuenca, y se formaron predominantemente turbiditas carbonatadas (más de 150 m espesor), caracterizadas por sedimentación lenta. Existen plutones félsicos del Mesozoico a Terciario cercanos a muchos depósitos. Son del Terciario en general, aunque pueden tener cualquier edad. Las rocas encajantes son comúnmente calizas o dolomitas finamente estratificadas, arenáceas, o arcillosas carbonosas asociadas con *shales* carbonosos. Aunque menos productivas, las rocas siliciclásticas no carbonatadas y raramente metavolcánicas son huéspedes localmente. En algunos depósitos también se presentan mineralizados los plutones félsicos y diques.

La forma de los depósitos es generalmente tabular, cuerpos estratiformes irregulares, que se localizan en los contactos entre litologías contrastantes. Algunas zonas minerales (a menudo de alto tenor) son discordantes, a partir de brechas en zonas de fallas de ángulo abrupto. Los sulfuros (pirita principalmente) y el oro están diseminados en ambos casos. El reemplazamiento de sílice en el carbonato va acompañado de una pérdida de volumen, por lo que es común el brechamiento de las rocas de caja. Generalmente la fina diseminación de sulfuros es menor de 1 %.

La mena está compuesta por oro nativo (micrónico), pirita con bordes de arsénico, arsenopirita, estibnita, rejalgá, oropimente, cinabrio, fluorita, barita, y minerales raros de talio. La ganga es de cuarzo de grano fino, barita, minerales arcillosos, materia carbonácea (vetas de calcita del último estadio). En los depósitos de Nevada se observa una profunda alteración supergénica, conformada principalmente por alunita y caolinita, acompañadas de hematita.

En la actualidad se consideran tres modelos genéticos para este tipo de depósitos:

- Modelo epitermal: ampliamente aceptado, pero todos los depósitos conocidos no encajan en él. Según este modelo, la mineralización es consecuencia del magmatismo somero del Mioceno, relacionado con procesos de extensión de cuencas y sierras. Nuevos descubrimientos de cuerpos profundos, sobreimpuestos a la

deformación de cuencas y sierras y el reconocimiento del origen supergénico de la alunita han puesto en duda la exactitud del modelo.

- Modelo de *skarn* distal: muy popular actualmente, ya que muchos depósitos ocurren cerca de intrusiones, *skarns* y rocas calcosilicatadas. El oro es relacionado con el colapso de la estructura de un sistema de intrusión central (sistema hidrotermal de tipo porfídico). Aun cuando es aceptable para muchos depósitos, falla en la explicación de ciertos distritos (p. ej., Jerritt Canyon, EE. UU.; Guizhou, China), donde no se ha observado el magmatismo asociado.
- Modelo de fluido crustal profundo: propuesto de forma reciente para señalar una mezcla profunda inferida de diferentes fluidos provenientes de reservorios diferentes, según el análisis de los datos de isótopos estables ligeros y de inclusiones fluidas. Variantes de este modelo solo implican relaciones indirectas con el magmatismo, sugieren una edad única —Paleógeno para los depósitos de Nevada—, que se relaciona con un solo período de extensión crustal de cuencas, sierras y fallas asociadas, que estuvieron controladas por estructuras paleozoicas y mesozoicas preexistentes.

#### 2.2.5.1. Controles de la mena

Reemplazamiento selectivo de rocas carbonatadas carbonosas adyacentes y a lo largo de fallas de ángulo abrupto, fallas regionales de cabalgamiento o por la estratificación.

Presencia de pequeños plutones félsicos (diques) que pueden haber causado la actividad geotermal e intruido un reservorio somero de hidrocarburos o un área de rocas enriquecidas en hidrocarburos, a raíz de lo cual se habría impuesto un sistema geotermal convectivo sobre el acuífero subterráneo local.

Se asocian a este tipo de depósitos los porfídicos, *skarns* de oro, wolframio y molibdeno, así como mantos polimetálicos.

Ejemplos de estos depósitos son Golden Bear, partes de Brewery Creek (Yukón, Canadá); Carlin, Getchell, Cortez, Gold Acres, Jerritt Canyon, Post and Gold Quarry (Nevada, EE. UU.); Mercur (Utah, EE. UU.); Mesel (Indonesia); distrito de Guizhou (Lannigou, con más de 100 t oro, Getang, Zimudang) China.

#### 2.2.6. Depósitos de fuentes termales subacuáticas de oro-plata

Sulfuros en vetas, reemplazamientos y cuerpos estratificados sedimentarios son depositados en rocas volcánicas y sedimentos asociados con las áreas de aguas lacustres

someras, fluviales o marinas, o en subsuelos glaciares, cuyos ambientes favorables son los arcos volcánicos activos (arcos de islas oceánicas y arcos de margen continental). Se distinguen dos ambientes deposicionales: 1) reservorios rellenos de agua en áreas volcánicas continentales activas (lagos de cráter, lagos de playa, planos de flujos de corrientes, subsuelos glaciares); 2) calderas brechadas al pie del mar o sedimentos marinos someros no consolidados al pie de un volcán. Ocurren presumiblemente a cualquier edad, aunque el ejemplo más antiguo es del Jurásico. La mineralización se hospeda en flujos de lavas y tobas de composición félsica a intermedia con intercalaciones menores de rocas sedimentarias. Lavas almohadilladas, flujos de derrumbe (*debris flows*) epiclásticos gruesos y diques indiferenciados de canales de alimentación subvolcánica forman parte de la secuencia estratigráfica local.

La morfología del depósito es altamente variable: estoverca o red de venillas (*stringers*) hacia el yacente, cuerpos podiformes de sulfuros masivos, amplios y sin textura; capas y lentes de sulfuros, estratiformes, finamente laminados; capas sedimentarias de sulfuros clásticos retrabajados y vetas de brechas de estilo epitermal con amplias vesículas, sulfuro grueso y sílice tipo calcedonia. Todos los tipos pueden coexistir en el mismo depósito. Las texturas varían desde sulfuros clásticos finos y precipitados químicos framboidales hasta agregados de sulfuros de grano muy grueso en vetas de brechas. Los estilos estructurales incluyen vetas estovercas, vetas de brecha principales, lentes y capas de sulfuros estratiformes e irregulares.

La mineralogía de la mena comprende esfalerita, tetrahedrita, boulangerita, bournonita, oro nativo, plata nativa, amalgama, galena, calcopirita, enargita, pirita, estibnita, rejalgar, arsenopirita, oropimente; arsénico metálico, Hg-wurtzita, cinabrio, minerales de plata-plomo-arsénico-azufre, krennerita, coloradoita, marcasita, magnetita, escorodita, jarosita, limonita, anglesita, azufre nativo. La ganga incluye cloruro de magnesio, moscovita (sericita), calcedonia, sílice amorfa, calcita, dolomita, pirobitumen, yeso, barita, feldespatos potásico, alunita, grafito, halita y cristobalita. Por su parte, la mineralogía de alteración resulta amplia: roca de clorita masiva (clinocloro)-illita-cuarzo-yeso-barita o de cuarzo-moscovita-pirita, que se asocian con las zonas profundas de estoverca del yacente, donde los minerales de alteración están restringidos a zonas de fracturas. La mineralización estratiforme irregular está acompañada de cloruro de magnesio, moscovita, calcedonia, calcita, dolomita y pirobitumen. En los depósitos de fuentes termales de Osorezan (Japón), la sílice pervasiva y microvenillas de alunita son las fases dominantes de alteración.

El modelo genético propone que los depósitos se formaron por fluidos de fuentes termales que acceden por ventanas estructurales a un ambiente acuoso somero. Los fluidos tienen más carácter magmático que meteórico. Este concepto contrasta con algunas características del modelo de procesos para los sulfuros masivos vulcanogénicos. La zonación lateral y vertical ha sido reconocida en un mismo lente. La zonación lateral muestra cambios desde un grupo de minerales ricos en antimonio-arsénico-mercurio, hasta paragénesis ricas en zinc, plomo y cobre. La zonación vertical se expresa con un sistemático incremento de los tenores de oro, plata y metales básicos hacia arriba en la sección. Los conductos de fluidos son fisuras generadas por el choque sísmico gradual del volcán sobre una cámara magmática expandida tardíamente, o por la fracturación en respuesta a la tectónica compresional regional. Un cuerpo magmático subvolcánico cerca de la superficie es una fuente esencial de metales, fluidos y calor.

Depósitos que se asocian son los de fuentes termales de mercurio, de oro-plata, vetas epitermales y sulfuros masivos vulcanogénicos exhalativos. Ejemplos de depósitos de fuentes termales subacuáticas de oro-plata son Eskay Creek, Lulu (Canadá); Osorezan, islas de los Volcanes y campo hidrotermal Jade (Japón); volcán Mendeleev (islas Kuriles, Rusia); Rabaul (Papúa Nueva Guinea); isla White (Nueva Zelanda); Bacon-Manito y Surigao del Norte (Filipinas).

### 2.3. Métodos de prospección

La prospección debe realizarse siguiendo las siguientes etapas: reconocimiento, prospección, exploración general y exploración detallada.

En la etapa de reconocimiento se identifican las áreas con potencial de mineralización, con base en los resultados de los estudios geológicos regionales, que incluyen comprobación de la fotointerpretación y de anomalías geoquímicas y geofísicas antiguas. La inspección preliminar de campo se ejecuta con muestreos de sedimentos activos de corrientes, así como de rocas, y otros trabajos regionales, como pueden ser estudios aerogeofísicos, en especial mediante el empleo de métodos magnéticos y electromagnéticos.

La prospección se realiza con el propósito de identificar el posible blanco para la exploración, mediante trabajos de cartografía geológica, muestreo de afloramientos, muestreo geoquímico de suelos, labores mineras superficiales (trincheras y apiques) y trabajos geofísicos, preferentemente mediante métodos magnéticos y geoelectrónicos. Se

deberán obtener las dimensiones y 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, cuya magnitud ofrecerá la posibilidad de continuar estudios más avanzados. Teniendo en cuenta que el arsénico se obtiene principalmente como subproducto en depósitos de metales preciosos, básicos y otros, como cobalto y níquel, los elementos guías para la exploración geoquímica varían de uno a otro tipo de depósitos, pero incluyen en general arsénico, antimonio, mercurio, plata, oro, cobre, zinc, plomo, talio, wolframio, selenio, telurio. Se debe establecer una malla espaciada entre las labores de prospección (trincheras, apiques, túneles y perforaciones diamantinas), que puede oscilar entre 200-240 m las distancias entre perfiles de investigación, en tanto que la separación entre labores de muestreo en cada perfil se ejecuta hasta 100-120 m, que son redes propias para investigar los elementos principales.

La exploración general permite la delimitación inicial 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 y geoelectrónicos más detallados, así como también la realización de apiques y algunas perforaciones, que conformarán una malla relativamente espaciada por toda el área de desarrollo del campo mineral. Se delimitarán mejor los contornos de los cuerpos minerales, su situación estructural, sus tenores y demás características. Por lo general, al concluir estos trabajos, las distancias entre perfiles de investigación alcanzan 100-120 m, en tanto que la separación entre labores de muestreo en cada perfil se reduce hasta 50-60 m. Se realizarán los estudios metalúrgicos preliminares, de primordial importancia para definir la viabilidad ulterior del proyecto. Se realizarán los estudios de prefactibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para continuar hacia la etapa detallada siguiente. Se calcularán recursos indicados e inferidos y reservas probables.

La exploración detallada permite la delimitación tridimensional pormenorizada 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 beneficio mineral. Ya para esta etapa, las distancias entre perfiles se reducen hasta 50-40 m (uno o dos perfiles intermedios entre los de la exploración general, atendiendo al grado de heterogeneidad de la mineralización) y entre labores en el

perfil de hasta 25-20 m. Se realizarán los estudios metalúrgicos necesarios de esta etapa. Se realizarán los estudios de factibilidad económica, que permitirán la toma de decisiones para la planificación de la explotación minera. Se calcularán recursos medidos, indicados e inferidos y reservas probadas y probables.

#### 2.4. Sistemas de explotación y procesamiento de minerales

A continuación se describen los procesos de extracción y procesamiento de los minerales que contienen arsénico.

##### 2.4.1. Sistemas de explotación

Desde el punto de vista de su explotación, se aplican diversos sistemas, atendiendo a diferentes criterios, entre los que se destacan la forma del yacimiento, el relieve del terreno original, su proximidad a la superficie, la complejidad o el número de mineralizaciones, la distribución de la calidad del mineral en el yacimiento y el tipo de roca dominante.

Teniendo en cuenta estos criterios, se distinguen dos grandes grupos de métodos de explotación: de superficie o a cielo abierto y subterráneo. Los de superficie se caracterizan por los grandes volúmenes de materiales que se deben mover; en la minería subterránea, la extracción del estéril suele ser insignificante a lo largo de la vida de la mina, procede de las labores de acceso y preparación de la misma.

Considerando el hecho de que la mayoría de la producción de arsénico procede de minas de oro, plata, cobalto, níquel, uranio y otros, el sistema que se adopta para la explotación responde a la explotación óptima del elemento principal.

##### 2.4.2. Procesamiento de minerales

El proceso de obtención del arsénico se inicia con la extracción de la mena desde el depósito ya sea mediante explotación subterránea o a tajo abierto; una vez arrancado el mineral en la mina, se transporta a la planta de tratamiento, donde es sometido a los siguientes pasos:

**Trituración:** grandes máquinas reducen las rocas a un tamaño uniforme de no más de ½ centímetro.

**Molienda:** diferentes molinos continúan reduciendo el material, hasta llegar a una granulometría muy fina.

Dependiendo de la mena con la que se asocia el mineral, así será el proceso de extracción, en primera instancia del mineral principal y posteriormente del arsénico, por algún proceso que permita su recuperación.

Según *Realidad Minera (s.f.)* se encuentra comúnmente en forma de impureza en los minerales metálicos y

que se produce a escala comercial, y en ocasiones alcanza contenidos tan elevados que impiden la explotación del yacimiento. El arsénico también puede ser arrastrado de algunos yacimientos de metales por acción de cianuros o del drenaje ácido de roca, pero es posible atraparlo y eliminarlo de las aguas residuales antes de su liberación al medio ambiente.

Durante la flotación de sulfuros metálicos se utiliza cianuro para deprimir la arsenopirita; esta se concentra en las colas de flotación y termina en los botaderos (desechos de la actividad minera), donde también se intemperiza. Sin embargo, parte del arsénico flota al presentarse en forma de sulfosales con contenidos de plata.

En los concentrados de cobre se imponen penalidades cuando se rebasa 0.1 % de arsénico, y en los de sulfuro de plomo, el 0.5 %. En la pirometalurgia del cobre una parte del arsénico se separa en los polvillos de tostación oxidante parcial, y otra queda soluble en la mata. En la conversión de mata a cobre *blister*, algo de arsénico pasa a la escoria, por lo que es necesaria una pirorrefinación del cobre *blister* y, aún así, el arsénico llega hasta el proceso de electrorrefinación, y aquí se separa por precipitación química.

En el caso del concentrado de plomo, una parte del arsénico se elimina durante la tostación oxidante total (sinterización) y, al reducirse el óxido de plomo, otra parte se concentra en las fases de plomo, mata y speise. Durante la pirorrefinación, el arsénico se separa del plomo en forma de arseniato de sodio, por oxidación con aire o aire enriquecido con oxígeno e hidróxido de sodio. Las fases de mata y *speise* se mandan a la planta de refinación de cobre, donde el arsénico se recupera como  $As_2O_3$ .

En la metalurgia del zinc, el arsénico se separa del mineral en gran parte durante la tostación oxidante total, pero pequeñas cantidades de arsénico oxidado pasan a solución durante la lixiviación neutra, y allí se le adiciona polvo de zinc para eliminarlo como arsina  $AsH_3$  (gas muy tóxico).

Para eliminar iones férricos, la solución ácida caliente se neutraliza con producto de tostación que contiene arsénico; este último formará parte de los botaderos de jarosita. Todos los residuos de arsénico, confinados en presas de colas de flotación o lixiviación, son intemperizados formando óxidos que son solubles en medio ácido. Por ello, es necesario encontrar alternativas para formar compuestos de baja reactividad que puedan ser confinados de manera segura.

Según USGS (2017), en la fusión de minerales de cobre, plomo, cobalto y oro se obtiene trióxido de arsénico que se volatiliza en el proceso y es arrastrado por los gases de la chimenea, que pueden llegar a contener más de un 30 % de trióxido de arsénico. Los gases de la chimenea se refinan posteriormente mezclándolos con pequeñas cantidades de galena o piritita para evitar la formación de arsénico, y por tostación se obtiene trióxido de arsénico entre el 90 y 95 % de pureza, que, mediante sublimaciones sucesivas, puede incluso llegar al 99 %.

Reduciendo el trióxido de arsénico con carbón se obtiene el metaloide; sin embargo, la mayoría del arsénico se comercializa como óxido. Prácticamente la totalidad de la producción mundial de arsénico metálico es de China, que es también el mayor productor mundial de trióxido de arsénico.

### 2.5. Recursos, reservas y comercio

No se reportan estadísticas en relación con las reservas mundiales de arsénico, al parecer debido a que su producción mayoritaria resulta como subproducto de la minería y metalurgia de otros elementos metálicos principales en las menas que se explotan en los diferentes países. A ello se añade que sus usos principales se han visto reducidos por su influencia negativa sobre la salud humana, hecho que ha incidido directa y poderosamente sobre la producción y comercialización del citado elemento.

Se considera que las reservas mundiales de arsénico están directamente relacionadas con la producción anual del metal, en el orden de 20 a 30 veces el valor de dicha producción (USGS, 2017). las minas de cobre y plomo contienen aproximadamente 11 millones de toneladas de arsénico, especialmente en Perú y Filipinas, y el metaloide se encuentra asociado a depósitos de cobre-oro en Chile y de oro en Canadá. En China, el mayor productor lo extrae fundamentalmente de las menas auríferas, y menos de menas polimetálicas de plomo- zinc.

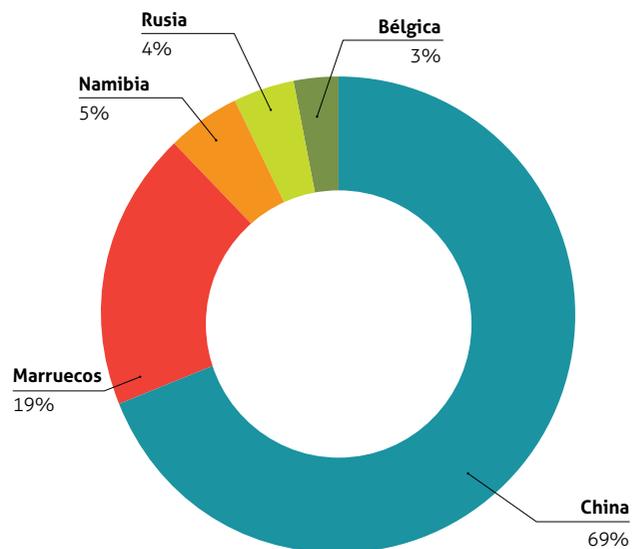
La producción mundial de arsénico en el periodo 1996-2016 se muestra en la tabla 1, donde se observa el decrecimiento de la producción debido a sus efectos nocivos sobre la salud humana. China domina la producción mundial con 25 000 t al año, lo que representa un 69 % del global de los países productores, seguida por Marruecos, con un 19 %. En la figura 3 se observa la distribución de la producción durante el año 2016.

**Tabla 1.** Producción minera estimada de trióxido de arsénico en los principales países

País	1996	2001	2006	2011	2016
Bélgica	2000	1500	1000	1000	1000
Bolivia					50
Chile	6500	8000	11 500	11 500	
China	13 000	16 000	30 000	25 000	25 000
Francia	4000	1000	1000		
Kazajistán	1500	2000	1500		
Japón					45
México	4500	2600	1300		
Marruecos			6900	8000	7000
Namibia	2300				1900
Filipinas	2000				
Perú			3500	4500	
Rusia	1500	1500	1500	1500	1500
Otros	3000	2000	1000	300	
Total	40 300	34 600	59 200	51 800	36 495

Datos en toneladas

Fuente: USGS (2017)

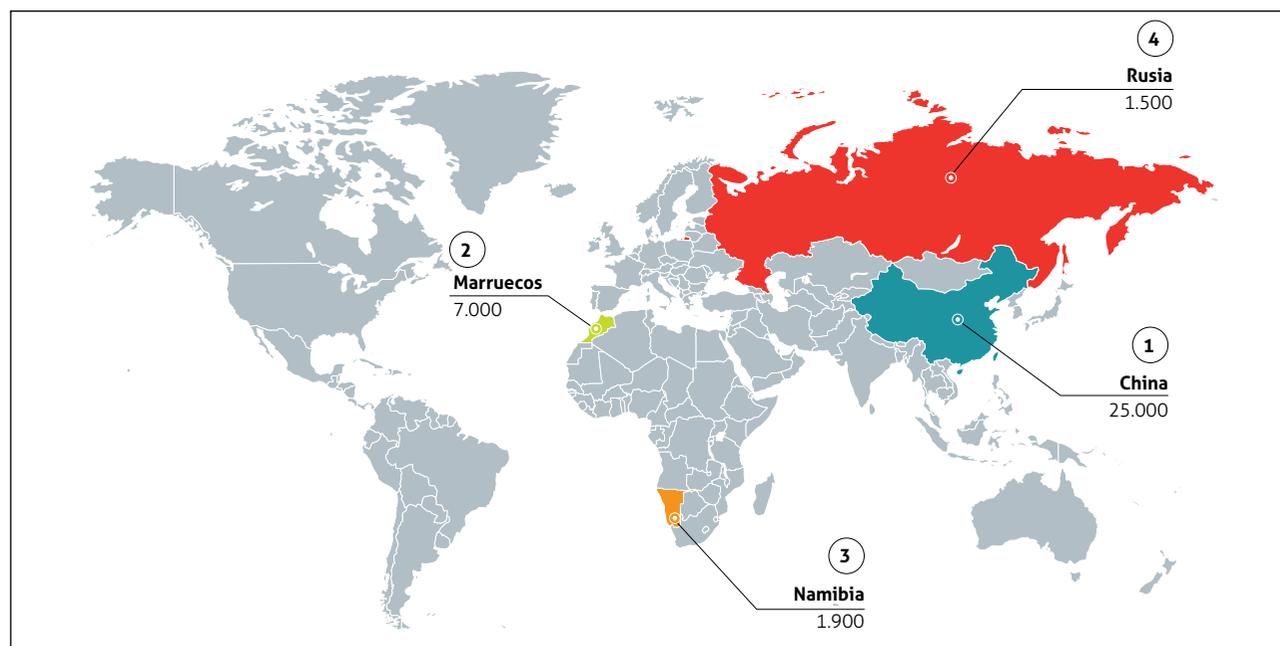


**Figura 3.** Distribución mundial de producción de arsénico en 2016

Fuente: USGS (2017)

En la figura 4 se observa la distribución de los principales países productores de arsénico a escala mundial. China es el principal productor, con 25 000 t, seguida de Marruecos, con 7 000 t, Namibia, con 1 900 t, y Rusia, con 1 500 t (USGS, 2017).

El precio del trióxido arsénico en el año 2015, según el USGS (2015), fue de USD 0.29 por libra, mientras que el metal de arsénico estaba alrededor de los USD 0.84 por libra.



**Figura 4.** Producción mundial por países en el total de la producción mundial de trióxido de arsénico en el año 2016

Fuente: USGS (2017)

## 2.6. Perspectivas

El uso de preservantes alternativos para la madera o alternativas de sustitución de este material, tales como el concreto, plásticos o compuestos a base de madera, continuará aumentando debido a preocupaciones ambientales y de la salud por el uso del arseniato de cobre cromado (ACC) como preservativo de esta. La decisión voluntaria de la industria preservativa de madera de eliminar el arseniato de cobre cromado para algunos productos específicos, a finales de 2003, ha conducido a la declinación de la demanda en los Estados Unidos, y ha afectado la producción de trióxido de arsénico en China. La madera tratada con arsénico, sin embargo, continuará siendo utilizada en usos industriales específicos, por ejemplo, la madera de construcciones marinas, la madera contrachapada utilizada en techos y la usada en postes de uso general.

El arsénico de alta pureza continuará siendo utilizado por la industria de la electrónica en semiconductores de arseniuro de galio, usados en la industria automotriz, en aplicaciones militares y del espacio, así como como en las células solares y en telecomunicaciones.

Las actuales fuentes mundiales de arsénico, sea en la modalidad de trióxido o de metal, disponibles en los depósitos de metales no ferrosos y preciosos que se procesan en catorce países, son suficientes para cubrir las necesidades proyectadas.

## 3. Arsénico en Colombia

Aun cuando en Colombia se han encontrado algunas manifestaciones de arsénico, hasta el momento no han tenido mayor importancia comercial; sin embargo, su presencia confirma la existencia de ambientes favorables tanto para depósitos primarios como secundarios.

### 3.1. Geología regional

En Colombia existen unidades litológicas con ambientes de depósito similares a los descritos de otras partes del mundo, en las provincias litosféricas Continental Mezoproterozoica Grenvilliana (PLCMG) y Continental Paleoproterozoica Amazónica (PLCPA) (Gómez et., al, 2006), en las áreas donde se localizan los depósitos filonianos o polimetálicos, así como también en estas provincias litosféricas oceánicas: Neoproterozoica Arquía (PLONA), Cretácica La Guajira (PLOGC), en la Sierra Nevada de Santa Marta y la

península de la Guajira, y Cretácica Occidental (PLOCO), en minerales metálicos (hierro, cobre, plomo, zinc, molibdeno, wolframio, oro y plata). Es decir, hay arsénico en concentraciones industriales en las seis provincias metalogénicas en que está dividido el país: Escudo Guayanés, Sierra Nevada-Guajira, Continental Oriental, Continental Central, Cauca-Romeral y Oceánica Occidental.

### 3.2. Geología local

Aun cuando en la actualidad en Colombia no se conoce la existencia de minas donde se explote formalmente el arsénico, se sabe de su presencia en la mayoría de explotaciones de filones de oro y plata, y en los depósitos polimetálicos. En muchos de estos es atacado metalúrgicamente por sus procesos, que afectan la calidad de los metales principales que se busca recuperar, como el oro.

Como se mencionó, el arsénico puede encontrarse en todas las provincias metalogénicas en que está distribuido el territorio colombiano. Según Prieto (2005), en el trabajo de muestreo de ultrabaja densidad se encuentra asociado a las zonas de producción de minerales tipo filonianos y de depósitos polimetálicos (figura 5).

El Servicio Geológico Colombiano en el año 2016 publica el *Atlas Geoquímico de Colombia, versión 2016*, con el cubrimiento aproximado del 35% del país; para el Arsénico se basó en su concentración en sedimentos mg/kg de 21 101 muestras analizadas (SGC, 2016) (figura 6).

### 3.3. Situación actual de la minería

No se conocen explotaciones colombianas asociadas exclusivamente al arsénico. En cuanto a las solicitudes y títulos mineros se refiere, no hay asociado ninguno de manera específica a este tipo de mineral.

#### 3.3.1. Potencial

En Colombia hay un buen potencial para la exploración de arsénico en los depósitos polimetálicos y los filonianos de oro y plata, pero no se les ha reconocido importancia, debido a que en muchos procesos de beneficio, este mineral es atacado por generar mermas en la ley final de los productos principales.

#### 3.3.2. Comercio

En la actualidad no hay datos de importación y exportación de arsénico.

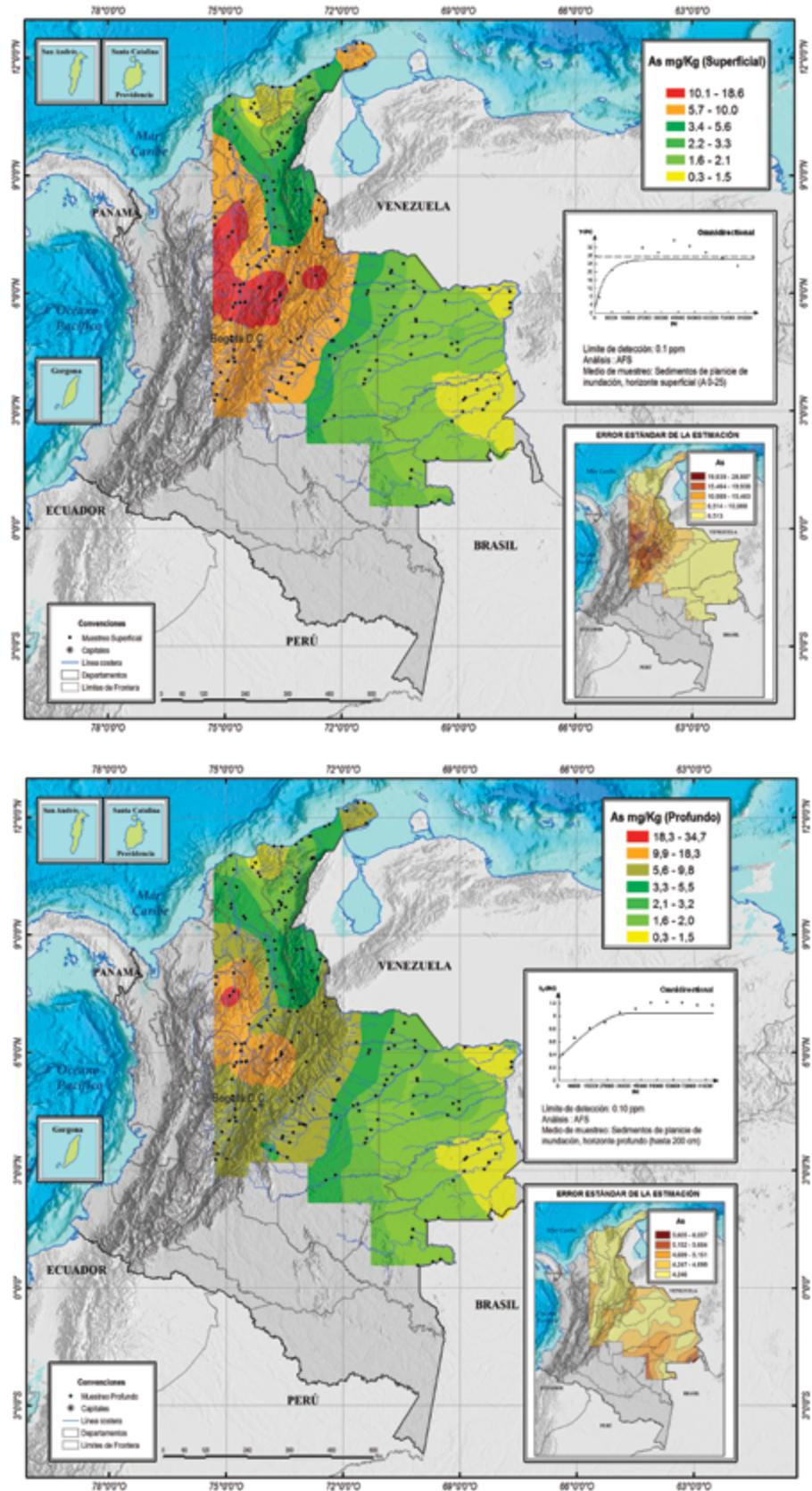
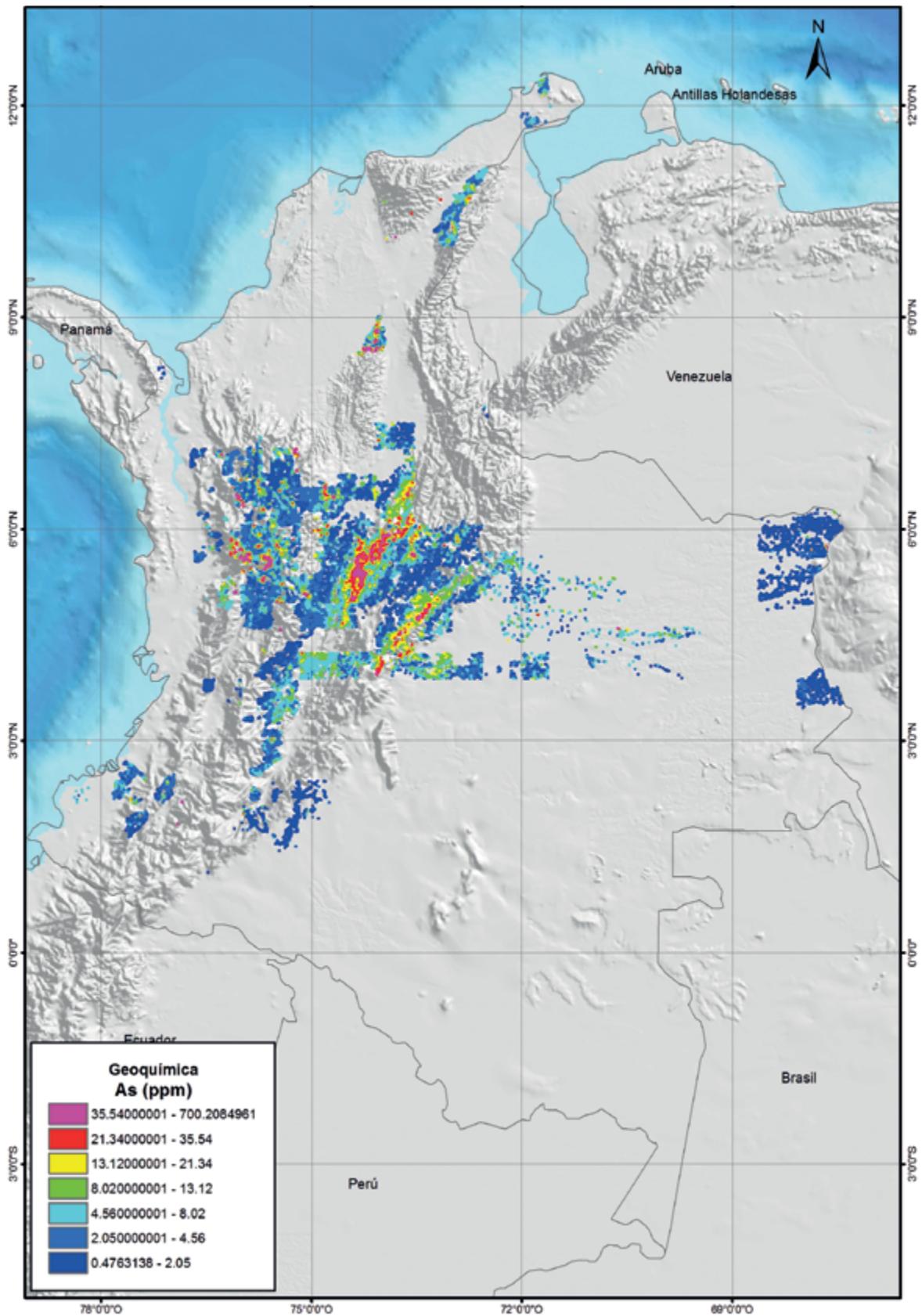


Figura 5. Distribución de arsénico en el muestreo de ultrabaja densidad

Fuente: Prieto, *et al.* (2005)



**Figura 6.** Concentración de Arsénico en Colombia

Fuente: SGC (2016)

#### 4. Aspectos ambientales y sustitutos

En la industria se puede sustituir el arsénico en las siguientes aplicaciones: en la fabricación de vidrio y aleaciones se puede sustituir con níquel, manganeso, wolframio o zinc; en artículos electrodomésticos se puede reemplazar con silicio, germanio, aluminio, cobre o plomo; en el sector de los herbicidas e insecticidas se puede cambiar por boro, bromo y selenio, y finalmente, en el sector de preservantes de madera se puede suplir con carbón (creosota o brea de alquitrán) y cobre (arseniato de cobre cromatado).

En cuanto a los riesgos para la salud, cuando una persona llega a inhalar arsénico, la cantidad que el sistema sanguíneo absorbe depende de dos factores: su solubilidad y el tamaño de las partículas en el aire que lo contengan. Buena parte del arsénico que aparece en el cuerpo proviene más bien de alimentos. En la mayoría de los casos, los compuestos de arsénico son transformados y eliminados rápidamente a través de la orina (Peña, 2017).

Según la Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades (ATSDR, por sus siglas en inglés), el

arsénico puede representar los siguientes riesgos para la salud:

- La inhalación de altos niveles de arsénico inorgánico puede producir dolor de garganta e irritación en los pulmones.
- Su ingestión en niveles altos puede causar la muerte. La exposición a niveles bajos produce náusea, vómitos, disminución del número de glóbulos rojos y blancos, ritmo cardíaco anormal, fragilidad capilar y sensación de hormigueo en manos y pies.
- La ingestión o inhalación prolongada de niveles bajos de arsénico inorgánico produce oscurecimiento de la piel y aparición de callos o verrugas en las palmas de las manos, plantas de los pies y el torso.
- En contacto con la piel, el arsénico inorgánico puede producir enrojecimiento e hinchazón.

## 5. Bibliografía

- BCGS. (2002). *Selected British Columbia Mineral Deposit Profiles*. Victoria: British Columbia Geological Survey.
- Gómez, T., Nivia, G., Jiménez, M., Montes, R., Sepúlveda, O., Osorio, N. *et al.* (2006). *Mapa geológico de Colombia escala 1:2.800.000*. Bogotá: Ingeominas.
- Peña, M. (2017). *Riesgos en la salud por exposición al arsénico*. Disponible en <http://www.salud180.com/salud-z/riesgos-en-la-salud-por-exposicion-al-arsenico>
- Prieto, G. (2005). *Atlas Geoquímico de Colombia - Mapeo de UltraBaja Densidad*. Bogotá: Ingeominas.
- Realidad Minera. (s.f). *¿Qué papel juega el arsénico en la industria minera?* Disponible en <https://www.miningfacts.org/Ambiente/Que-papel-juega-el-arsenico-en-la-industria-minera/>
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). *Atlas Geoquímico de Colombia. Versión 2016*. Bogotá.
- USGS. (2015). *Minerals Yearbook- Arsenic Advance release*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/myb1-2015-arsen.pdf>
- USGS. (2017). *Mineral Commodity Summaries 2017. Arsenic*. Disponible en <https://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/arsenic/mcs-2017-arsen.pdf>