



**Escola Politècnica Superior  
d'Enginyeria de Manresa**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **CONTAMINACIÓN MINERA EN EL ÁREA SUR- MEDIO DEL PERÚ POR LA MINERÍA DEL ORO A PEQUEÑA ESCALA**

**Presentado Por** Elsa Elida Ccolqqe Fernandez  
**Tutora** Pura Alfonso Abella  
**Titulación** Máster en Ingeniería de Minas

Manresa, 10 de octubre de 2019

## Resumen

En este trabajo de investigación se ha determinado la mineralogía y las técnicas de procesamiento del oro de la mina San Luis, se ha evaluado los métodos de extracción, además, se ha hecho un análisis de la composición química de las aguas procedentes del Sur Medio del Perú y finalmente se ha realizado una comparación del contenido de mercurio en los cabellos humanos recogidos en Misky con respecto a otros estudios de la zona.

Por otro lado, el Sur Medio del Perú, pertenece al cinturón de oro Nazca-Ocoña, cuyos depósitos son oro del tipo intrusivos relacionados con oro (IGR). En el caso de la mina San Luis, la mineralización se halla principalmente en vetas de cuarzo con abundancia de óxidos de Fe. La ocurrencia del oro en la mina San Luis es principalmente en granos de oro nativo contenida en cuarzo y óxidos de Fe; en la veta San Luis, el oro también aparece asociado a la pirita, en donde a menudo se encuentra en la forma de telururo. Los Telururos son de oro y también de plata, plomo y bismuto. Por otro lado, el electrum se presenta en menor medida en la veta San Luis.

Respecto a la recuperación del oro, las técnicas más empleadas por los mineros artesanales del sur Medio del Perú son la amalgamación y la cianuración. Siendo la técnica de amalgamación con mercurio la más perjudicial para la salud y el medio ambiente. Dicha técnica ha sido empleada en el pasado y aún continúa siendo usada en algunas de las minas pertenecientes al sur medio del Perú. Es por ello que se ha realizado el análisis de la composición química de las aguas procedentes de los ríos San Luis, Relave, Majes y Ocoña para determinar la presencia y la concentración de los elementos potencialmente tóxicos en estos; los elementos potencialmente tóxicos encontrados en estos ríos son: el mercurio, el arsénico y el plomo. Respecto a las concentraciones del mercurio, ésta excede 30 mil veces el límite máximo de concentración establecido por la ECA en la categoría de población (agua para producción de agua potable); 60 mil veces más en la categoría de riego y consumo de animales; y 600 mil veces más en la categoría de conservación del ambiente acuático para ríos de la Costa y Sierra. Por otro lado, las concentraciones en arsénico y plomo también exceden los límites máximos permisibles, pero en menor medida que las de mercurio.

Finalmente, la comparación del análisis de las concentraciones de mercurio en los cabellos humanos provenientes de Misky con respecto a otros estudios dio como resultado que las mujeres presentan mayores concentraciones de mercurio en sus cabellos.

**Palabras clave:** Mercurio, Amalgama, Minería artesanal, Oro, Telururos, Contaminación.

## Abstract

In this research the mineralogy and gold processing techniques of the San Luis mine were determined, the extraction methods were evaluated, and the analysis of the surface water of the Middle South of Peru was carried out.

On the other hand, the Middle South of Peru belongs to the Nazca-Ocoña gold belt. The gold deposits of the area belong to the intrusion-related gold deposits type (IGR). The gold mineralization occurs in quartz veins rich in Fe oxides. The occurrence of gold in the San Luis mine is mainly in grains of native gold contained in quartz and Fe oxides. In addition, in the San Luis vein gold also occurs as tellurides hosted in pyrite. Tellurides are mainly contained in veins of quartz and pyrite mostly, and to a lesser extent in iron oxides. On the other hand, the electrum is presented in a lesser extent in the San Luis vein.

The most used techniques for recovery of gold by artisanal miners in southern Peru are amalgamation with mercury and cyanidation, being the amalgamation the most harmful technique to human health and the environment. This technique has been used in the past and still continues to be used in some of the mines. The chemical composition of the waters from the San Luis, Relave, Majes and Ocoña rivers has been carried out to determine the presence and concentration of potentially toxic elements. The potentially toxic elements found in these rivers are mercury, arsenic and lead. the mercury concentration exceeds 30 thousand times the maximum concentration limit established by the ECA in the population categories (water for drinking water production); 60 thousand times more in the category of irrigation and consumption of animals; and 600 thousand times more in the category of conservation of the aquatic environment for rivers of the Coast and Sierra. On the other hand, the threshold in arsenic and lead also exceed the maximum permissible limits from ECA, but to a lesser extent than those of mercury.

Finally, comparing the analysis of mercury concentrations in human hair from Misky with respect to other studies resulted in women having higher volumes of mercury in their hair.

**Keywords:** Mercury, Amalgam, Artisanal mining, Gold, Tailings, Tellurides, Contamination.

## Agradecimientos

A Dios.

A mi querida familia, mis padres Cirilo y María. A mi hermana Silvia y amigos por todo su apoyo durante el desarrollo de este trabajo.

A PRONABEC, quienes me han brindado la oportunidad de continuar preparándome a través del programa de becas del Estado Peruano, con cuyo apoyo financiero ha sido posible realizar este trabajo.

A Minería Para el Desarrollo (MPD), al Centro de Cooperación para el Desarrollo (CCD), a mi tutora Pura Alfonso por su apoyo y gran paciencia para guiarme en la elaboración de este trabajo. Agradecer a mis compañeros de viaje Roger por su apoyo durante la toma de muestras y a Arnau Martínez, autor de las fotografías que han anexado en este trabajo.

Agradecer de manera especial a la Minera Artesanal "San Luis S.A." y a los trabajadores de la minera por su acogida tan amable y apoyo durante la recogida de muestras.

# Contenido

Resumen .....	2
Abstract.....	3
Agradecimientos .....	4
Capítulo 1 Introducción.....	8
1.1. Generalidades .....	8
1.2. Planteamiento del Problema .....	12
1.3. Objetivos .....	13
1.4. Justificación de la investigación.....	14
Capítulo 2 Fundamentación Teórica.....	15
2.1. Mercurio.....	15
2.1.1. Características generales.....	15
2.1.2. El mercurio en la naturaleza .....	16
2.1.3. El mercurio en la producción del Oro .....	16
2.1.4. Contaminación por mercurio .....	17
2.2. Metilmercurio .....	21
2.3. Problemática asociada a la minería del oro por el uso del mercurio .....	22
2.3.1. Efectos sobre la Salud.....	23
2.3.2. Contaminación de los cursos de agua .....	25
2.4. Cianuro .....	26
2.4.1. Presencia del cianuro en la naturaleza .....	26
2.4.2. Cianuro en el hombre.....	27
2.4.3. Cianuro en la obtención del oro .....	28
2.5. Tipos de minería .....	30
2.5.1. Minería ilegal e informal .....	30
2.5.2. Minería artesanal .....	30
Capítulo 3 Descripción general de la zona de estudio .....	31
3.1. Ubicación.....	31
3.2. Geomorfología .....	32
3.3. Hidrografía .....	33
3.4. Clima .....	34
3.5. Centros poblados .....	34
3.6. Marco geológico.....	34
3.6.1. Encuadre .....	34
3.6.2. Geología estructural .....	36
3.6.3. Geología económica .....	36

Capítulo 4 Minería en la Zona Sur-Medio de Perú .....	39
4.1. Minería artesanal en el Sur medio del Perú .....	39
4.2. Proceso productivo minero artesanal.....	41
Capítulo 5 Materiales y Metodología de trabajo.....	44
5.1. Trabajo de campo.....	44
5.1.1. Muestreo en Mina San Luis .....	44
5.1.2. Muestreo de aguas.....	45
5.1.3. Muestreo de cabellos .....	46
5.2. Trabajo de laboratorio.....	47
5.2.1. Preparación de muestras para microscopía .....	47
5.2.2 Difracción de rayos X.....	48
5.2.3. Microscopía óptica .....	48
5.2.4. Microscopía electrónica .....	49
Capítulo 6 Resultados y discusión .....	50
6.1. Composición química de las aguas .....	50
6.2. Mineralogía del yacimiento de San Luis .....	52
6.3. Aaálisis mineralógico de los relaves .....	57
7. Conclusión y recomendaciones .....	60
Bibliografía .....	61

# MEMORIA

# Capítulo 1 Introducción

## 1.1. Generalidades

En el Perú, los titulares de la minería peruana están agrupados en tres principales categorías o estratos: el régimen general que agrupa a la gran y mediana minería; la pequeña minería y la minería artesanal (Tabla 1). La gran minería abarca las operaciones de cateo, prospección, exploración, desarrollo, extracción, concentración, fundición, refinación y embarque, caracterizándose por ser altamente mecanizada y explotar yacimientos de clase mundial, principalmente, a tajo abierto. Por otra parte, la mediana minería agrupa empresas que operan unidades mineras principalmente subterráneas, cuyas características principales son el grado de mecanización y su adecuada infraestructura, sin embargo sus operaciones están limitadas a la extracción y concentración de minerales. La minería artesanal en cambio se caracteriza por ser usada como un medio de subsistencia, realizándose por medio de métodos manuales y/o equipos básicos o muy rudimentarios. Hasta diciembre del año 2017 el Ministerio de Energía y Minas (MINEM) registró un total de 7,661 titulares mineros, de los cuales referencialmente 5,259 pertenecen a la minería artesanal; 1,474 pertenecen a la pequeña minería y 928 a la gran y mediana minería (Anuario Minero, 2017).

**Tabla 1.** Clasificación de la minería peruana por estratos (Anuario Minero, 2017).

Estratos	Tamaño de concesión	Capacidad productiva
Gran minería	Más de 2,000 ha	Más de 5,000 TM/día
Mediana minería	Más de 2,000 ha	Hasta 5,000 TM/día
Pequeña minería	Hasta 2,000 ha	Hasta 350TM/día Hasta 3000 m <sup>3</sup> /día (No metálicos)
Minería artesanal	Hasta 1,000 ha	Hasta 25 TM/día Hasta 200 m <sup>3</sup> /día (No metálicos)

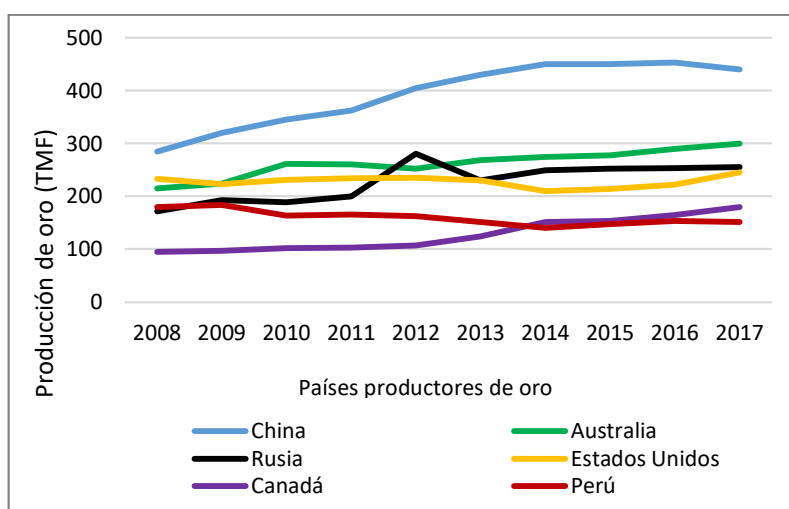
Perú es uno de los países que goza de una larga tradición minera en América Latina y el mundo. Históricamente, el oro ha sido explotado desde la época pre inca para fines de fabricación de artefactos ornamentales y ceremoniales, siendo exportada por los españoles en la época colonial, y continuó siendo explotada en la época republicana por empresarios nacionales, aunque estaba sujeta a variaciones en los precios. Hoy en día, el Perú ocupa el primer lugar en la producción de oro en América Latina y sexto a nivel mundial (USGS, 2018), ello gracias a que el Perú tiene un contexto geológico favorable para el desarrollo de la minería y la existencia de múltiples yacimientos auríferos. En la Tabla 2 se muestra la posición del Perú en



el Rankin mundial de producción del oro, por otra parte, en la Figura 1 se muestra los primeros 5 países que lideran la producción de este metal a nivel mundial expresado en TMF.

**Tabla 2.** Posición del Perú en el Ránking mundial de producción minera (USGS, 2018).

Producto	Latinoamérica	Mundo
Oro	1	6
Cobre	2	2
Plata	2	2
Zinc	1	2
Plomo	1	4



**Figura 1.** Producción mundial de oro por País, año 2008- 2017 (USGS, 2018).

La minería artesanal y en pequeña escala (ASGM) están vinculadas sobre todo a la explotación del oro y se estima que produce entre el 20% y el 30% del oro total del mundo, es decir, entre 500 y 800 toneladas anuales (PNUMA, 2008). Con respecto a la producción nacional, se estima que la minería artesanal produce el 14% de la producción nacional total, es decir 20,69 TMF (Ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Producción nacional de oro según estratos de la minería (ESTAMIN, 2018).

Estrato	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Gran y Mediana Minería	142,05	127,91	122,79	125,76	117,02	120,09
Pequeño Productor Minero	8,04	8,17	9,43	8,73	10,68	10,02
Productor Minero Artesanal	0,029	0,0019	-	0,14	0,21	0,28
Producción Estimada de Mineros Artesanales	11,41	15,39	7,86	12,14	25,08	20,69
<b>Producción Nacional Total</b>	<b>161,54</b>	<b>151,48</b>	<b>140,09</b>	<b>146,82</b>	<b>153,00</b>	<b>151,10</b>

Con respecto a la generación de empleo, el sector minero constituye una fuente significativa de generación de empleo para otros sectores, convirtiéndose en una fuente importante de ingresos para los mineros, especialmente en comunidades y regiones rurales donde las alternativas económicas son sumamente limitadas. Según el PNUMA (2008), hay por lo menos 100 millones de personas en más de 55 países que dependen de esta actividad para subsistir. Por otro lado, el Instituto Peruano de Economía (IPE) estima que, por cada empleo generado de forma directa en la actividad minera, se generan adicionalmente 6.25 empleos en el resto de la economía: 1 por efecto indirecto, 3.25 por el efecto inducido en el consumo y 2 por el efecto inducido en la inversión (Anuario Minero, 2017).

En Perú, la minería artesanal se concentra en cuatro zonas geográficas: Madre de Dios, Sur Medio (Ica, Ayacucho y Arequipa), Puno y La Libertad; convirtiéndose en la principal actividad económica. Por un lado, porque el nivel de inversión requerido es bastante menor con respecto a la inversión minera en general y, por otro lado, su alto precio la hace rentable. En la mayoría de los casos, la pobreza es su principal impulsor porque proporciona una fuente de sustento para muchas comunidades rurales (Swain et al., 2007 y Mensah et al., 2016). Lo que empezó como una actividad secundaria o de refugio se fue convirtiendo en una actividad permanente, cuya característica más resaltante es el uso de tecnologías rudimentarias y su dependencia casi exclusiva de la mano de obra (Kuramoto, 2001). En 1994, en zonas especializadas de extracción de oro, la productividad media mensual estimada era de 1 gramo por persona, lo que significaba ingresos brutos mensuales de hasta 1,200 soles por trabajador (Lázaro, 1995; Lázaro et al., 1995; Kuramoto, 2001), por encima del salario mínimo vital de aquel entonces, que era menor a 300 soles. Es así que hoy en día se puede afirmar que la generación de empleo es un efecto importante de la minería artesanal, donde más de un tercio del personal ocupado en minería es captado por dicha actividad, superando la contribución de la gran minería. Estas cifras tienen gran relevancia, si se considera que generar un puesto de trabajo en la gran minería requiere una inversión de más de 50,700 soles respecto a menos de 300 soles en la minería artesanal (Lázaro et al., 1995). Si bien la minería del oro a pequeña escala genera efectos positivos microeconomicos, también genera otros impactos sobre el medio ambiente y la salud (Arah, 2015; Mujere, Isidro, 2016; Lobo et al. 2016; Macdonald et al. 2014), además de los problemas sociales asociados (Hoedoafia, 2014).

Sin embargo, uno de los mayores riesgos de la minería artesanal del oro es su procesamiento, donde a menudo se usan sustancias tóxicas como son el mercurio y el cianuro, agravándose el problema por la falta de información sobre los métodos disponibles para reducir los impactos negativos al ambiente y a la salud humana. Si bien la ASGM brinda sustento a

muchas comunidades, también es la responsable de la fuente emergente de contaminación por mercurio más rápida del mundo (Swain et. al 2007; Mensah et. al 2016). Por lo general, el tipo de procesamiento depende del tipo de mineral de interés, en nuestro caso es el oro, el cual es recuperado por los ASGM mediante la amalgamación con mercurio y finalmente el refogeo, siendo el mercurio un componente crítico en el proceso de extracción (Vieira, R. 2006). Por otro lado, la liberación global del mercurio elemental en el aire se ha estimado en 400 toneladas aproximadamente (Wuana y Okieimen, 2011). De acuerdo a WHO (2008), la principal ruta de exposición es la inhalación del mercurio elemental durante la fundición de amalgama, a ello Risher y Amler (2005) han añadido otras vías de exposición, incluidas la oral y la dérmica.

Una de las minas en estudio que pertenece al Sur Medio del Perú es la Mina Artesanal San Luis S.A. (MARTSAL), mina que opera desde hace 25 años en el distrito de Sancos (Ayacucho) de acuerdo a la Dirección General de Formalización Minera (DGFM) (MEM, 2018). Ésta mina cuenta además con una certificación de Minería Justa Fairmined (Figura 2); dicha certificación garantiza que el oro producido por la empresa proviene de procesos y prácticas que cumplen con altos requisitos sociales y ambientales. Si bien la mina San Luis ha dejado atrás la práctica del uso de mercurio en sus procesos y ha llegado a ser considerada un ejemplo de superación, no todos los pobladores han seguido este ejemplo; esto es evidenciado por la presencia de algunos quimbaletes en funcionamiento en el poblado en mención (Figura 3), cabe aclarar que éstos quimbaleteros, pobladores de San Luis, trabajan de manera independiente y por tanto son ajenos a las actividades de la Mina San Luis. Por otro lado, se conoce que algunos pobladores aún están en contacto con el mercurio o que la comercializan, ésta afirmación se base en los resultados obtenidos del cuestionario hecho a uno de los pobladores del asentamiento durante la visita en el mes de Julio del año 2019, poblador afirmó que cuenta con una botella de mercurio en su casa.

En base a lo expuesto, éste trabajo es realizado para determinar los contaminantes generados por la minería del oro en el Sur Medio del Perú, medir sus concentraciones y determinar el nivel de exposición de los pobladores que residen próximos a este tipo de operaciones, buscar alternativas para reducir su uso y, por tanto, el impacto medioambiental.



**Figura 2.** Certificación de Minera artesanal San Luis en Oro responsable, 2018 (Solidaridad 50).



**Figura 3.** Quimbaleteros trabajando en el proceso de obtención del oro con Hg.

## 1.2. Planteamiento del Problema

La minería artesanal es una actividad muy extendida en el Sur de Perú, a menudo estas prácticas se realizan en el marco de la ilegalidad. Esto favorece a que estas prácticas compartan varios problemas:

- Por un lado, la falta de conocimientos para hacer un aprovechamiento óptimo de estos yacimientos. No se conoce la geología de los yacimientos ni las técnicas de procesamiento más adecuadas de acuerdo a las características del material en el que se encuentra el oro. Las técnicas utilizadas para la recuperación del oro principalmente son la amalgamación con mercurio y la cianuración. La primera consiste generalmente en moler la roca que lleva el oro y luego mezclar el material con mercurio y de esta manera producir una amalgama entre el oro liberado y el mercurio. En otros casos estos tratamientos se compaginan con procesos de cianuración. Con el método de la amalgamación sólo el oro que se ha liberados durante la molienda puede entrar en

contacto con el mercurio para formar la amalgama. El oro más fino no liberado se pierde, permaneciendo en el residuo (Relave). En ocasiones los materiales tratados pueden contener otros metales importantes, como la plata y el cobre, que no son recuperados. Por lo tanto, todo esto hace que del material extraído sólo se aproveche una parte de los metales que contiene.

- Por otra parte, la utilización de mercurio en el procesamiento del oro ocasiona graves problemas de contaminación ambiental. Se contaminan las aguas, el aire y los suelos próximos a las zonas mineras.
- Actualmente en muchas labores mineras del Sur-Medio de Perú se ha empezado a dejar de utilizar el mercurio, pasando a técnicas de recuperación de oro mediante la cianuración de los materiales que la contienen. Ésta técnica no siempre es aplicada de la manera correcta, presentando elevadas recuperaciones en algunos lugares, pero muy bajas en otras. Para aplicarla de manera correctamente se deben conocer las características mineralógicas de los materiales a cianurar. Por otro lado, se cianuran residuos que han sido amalgamados previamente y que, por tanto, presentan elevados contenidos de mercurio. De este modo este mercurio es expuesto al medioambiente, donde puede ser liberado, originando una elevada contaminación. Esta práctica está prohibida a por el convenio de Minamata (ONU, 2017).
- Además, es importante destacar la falta de seguridad en tareas mineras lo que trae como consecuencia un elevado número de accidentes en este sector. La situación de ilegalidad en que trabajan los mineros hace que no tengan la oportunidad de vender sus productos en un mercado donde se les pague correctamente, es decir, en el mercado del Comercio justo. Para conseguir entrar en este mercado estas actividades mineras deben salir de la ilegalidad y llevar a cabo una actividad minera medioambientalmente correcta.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Evaluar los procesos de la actividad minera desde la explotación hasta el Procesamiento de minerales, valorando la eficiencia de esta actividad desde un punto de vista ambiental y económico. Con ello se espera contribuir a promover la formalización y sostenibilidad económica y ambiental de la minería artesanal en el Sur-medio del Perú.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Valorar la eficiencia en la recuperación del oro en los diferentes asentamientos, así como la posibilidad de que estos yacimientos presenten subproductos interesantes desde un punto de vista económico.
- Evaluar el grado de contaminación ocasionado por el mercurio y el cianuro en las aguas y los residuos de las poblaciones visitadas.
- Valorar la influencia de la contaminación por mercurio y cianuro en los habitantes de las poblaciones visitadas.
- Determinar la mineralogía de los minerales de oro para contribuir a diseñar un procesamiento más eficiente.
- Hacer el seguimiento de la evolución de las tareas realizadas por la minera de los poblados de Misky, San Luís y relave, entre otros lugares.

### **1.4. Justificación de la investigación**

La minería artesanal en Perú realiza sus actividades sin un conocimiento de las características de su mineral, así como de las técnicas de procesamiento más adecuadas para llevar a cabo esta labor. Como consecuencia, obtiene bajos grados de recuperación de las menas y produce una gran contaminación durante el procesamiento del oro. Además, por ley, esta minería debe abandonar el uso del mercurio el 2020. Por lo tanto, se necesita conocer el estado actual de las técnicas utilizadas para el procesamiento del oro por la minería artesanal del Perú y las características de la mineralización para poder diseñar los métodos de procesamiento óptimos, tanto desde un punto de vista económico como ambiental.

## Capítulo 2 Fundamentación Teórica

### 2.1. Mercurio

#### 2.1.1. Características generales

Dentro de los elementos químicos, uno de los más notables es sin duda el mercurio, ligado a las mitologías, a la alquimia, a la explotación del oro y la plata, por no mencionar sus otros usos tecnológicos (Blesa y Castro, 2015). El mercurio es un elemento químico, de número atómico 80 y pertenece al grupo 12 de la tabla periódica, ver sus propiedades en la Tabla 4. Tiene muchos isótopos estables que difieren en el número de neutrones en el núcleo; el isótopo más pesado tiene 124 neutrones. Es así uno de los elementos estables más pesados presentes en la naturaleza. Sólo el talio, el plomo y el bismuto tienen isótopos estables más pesados (Blesa y Castro, 2015).

El mercurio (Hg) es un metal plateado y brillante, el único en estado líquido a temperatura ambiente. En comparación con otros metales es muy denso (13.53 g/cm<sup>3</sup>), tiene una baja solubilidad en agua (6x10<sup>-5</sup> g/la 25 °C), no es un buen conductor del calor, pero sí de la electricidad. Es sumamente volátil (presión de vapor de 1,22x10<sup>-3</sup> mm a 20 °C) produciendo vapores incoloros e inodoros a partir de los 13 °C, presenta una elevada tensión superficial, 0.51 N/m, y una viscosidad baja (0,016 Poises a 20 °C) por lo que no puede mojar ninguna superficie. Se alea fácilmente con otros metales como el oro y la plata produciendo amalgamas (Adriano, 1986) y se presenta en tres estados de oxidación estables como: elemental Hg<sup>0</sup> (0), mercurioso Hg<sub>2</sub><sup>2+</sup> (I) y mercúrico Hg<sup>2+</sup> (II). En la naturaleza, el estado elemental no es generalmente frecuente, aunque otras formas de Hg pueden ser transformadas a Hg<sup>0</sup>. El estado mercurioso es raramente estable bajo condiciones ambientales convencionales. En forma iónica puede formar compuestos orgánicos e inorgánicos, así como sulfuros y sulfosales estables. (Adriano, 1986; Gaona, 2004). Ver las propiedades del mercurio en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Propiedades del mercurio.

Información General	
Nombre, símbolo, número	Mercurio, Hg, 80
Serie química	Metales de transición
Propiedades físico- químicas	
Estado ordinario	Líquido
Masa atómica	200,6 g/mol.
Densidad	13534 kg/m <sup>3</sup> (293K)
Punto de fusión	234,32 K (-39 °C)
Punto de ebullición	629,88 K (357 °C)

### 2.1.2. El mercurio en la naturaleza

La presentación más usual del mercurio en la naturaleza es como cinabrio o bermellón (por su color). Prácticamente todo el mercurio producido por el hombre proviene del cinabrio y los depósitos explotables se encuentran asociados a zonas de actividad volcánica, como la mina de Almadén en España, y los yacimientos en el cordón del Himalaya o de la cuenca del Pacífico (Blesa y Castro, 2015). Por otro lado, las reservas globales estimadas al 2014 eran de 94.000 toneladas, actualmente China domina fuertemente la producción mundial de mercurio “fresco” con un aporte de 3000 t en el año 2018 (USGS, 2009). En la Tabla 5 se muestra una lista con los países que encabezan la producción de Mercurio hasta el año 2018; también se han considerado los años 1995 y 2012 para tener una referencia de qué países han dejado de producir éste metal y qué otros han incrementado su producción.

**Tabla 5.** Producción mundial de mercurio en distintos años (USGS).

País	1995	2012	2018
España	1700	-	-
China	500	1200	3000
Kyrgyzstan	200	150	20
Mexico	10	21	200
Norway	-	-	20
Perú	-	35	40
Tajikistan	-	-	100

### 2.1.3. El mercurio en la producción del Oro

La minería artesanal utiliza ampliamente el método de recuperación utilizando la técnica de amalgamación ya que resulta una técnica muy sencilla y barata (PNUMA, 2008). Ésta es una técnica antigua que permite recuperar el oro libre mediante el uso del mercurio, con la técnica de la amalgamación. Para aplicar esta técnica, primero se lleva a cabo la reducción del tamaño de partícula mediante molinos de bolas o, más frecuentemente, mediante molinos hechos a mano llamados quimbaletes. El quimbalete es una especie de mortero grande compuesto por una pila o recipiente en el que se coloca el mineral de oro junto con el mercurio y una piedra con una base ligeramente ovalada que actúa como un mazo. Se coloca una tabla sobre este mazo, en la que se sube una persona para mover el mazo de piedra y moler el material (Alfonso et al., 2019; Figura 4). La mayoría de los mineros no tienen molinos ni quimbaletes y los tienen que alquilar. La amalgama de mercurio y oro se aísla manualmente de los residuos residuales. El oro se separa de Hg quemando la amalgama al aire libre o en espacios preparados para ello utilizando réplicas, que en el área estudiada suelen ser comunales. Durante la quema, el



mercurio se evapora y se obtiene el oro. En el caso del uso de retortas, parte del mercurio se condensa y recupera para ser utilizado nuevamente, pero parte va directamente a la atmósfera.



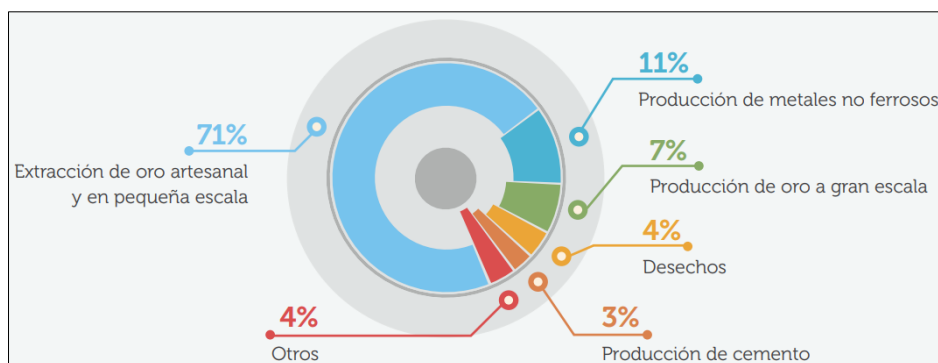
**Figura 4.** Quimbalete procedente de san Cristóbal.

#### **2.1.4. Contaminación por mercurio**

El mercurio (Hg) está considerado entre los elementos potencialmente tóxicos, el cual hace referencia a cualquier elemento químico que tenga una relativa alta densidad y sea tóxico o venenoso en concentraciones incluso muy bajas (Lucho-Costantino et al., 2005). Los metales pesados se encuentran como componentes naturales de la corteza terrestre. No pueden ser degradados o destruidos fácilmente de forma natural o biológica ya que no tienen funciones metabólicas específicas para los seres vivos (Abollino et al., 2002). Presentan además una característica peligrosa, y es que tienden a bioacumularse. Angelova et al. (2004) define la bioacumulación como un aumento en la concentración de un producto químico en un organismo vivo en un cierto plazo de tiempo, comparada a la concentración de dicho producto químico en el ambiente. Los metales pesados se incorporan en un pequeño grado a organismos vivos (plantas y animales) por vía del alimento y lo pueden hacer a través del agua y el aire como medios de traslocación y dependiendo de su movilidad en dichos medios (Lucho-Constantino et al., 2005). La absorción de metales pesados por las plantas es generalmente el primer paso para la entrada de éstos en la cadena alimentaria. La absorción y posterior acumulación dependen en primera instancia del movimiento (movilidad de las especies) de los metales desde la solución en el suelo a la raíz de la planta (Méndez et al., 2009). En plantas, el concepto de bioacumulación se refiere a la agregación de contaminantes (Kabata-Pendias, 2000).

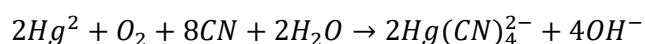
El uso de mercurio utilizado por la minería para la recuperación del oro ha ocasionado graves daños medioambientales y a la salud humana, tanto en Latinoamérica como en muchos países africanos (Gilson, 2002; Hilson y Van der Vorst, 2002). De acuerdo a Iglesias León y Gonzales Torres (2001), de cada 2 kg de mercurio utilizado en la recuperación del oro, se recupera 1600gr aproximadamente, mientras que los 400 gr restantes se pierden. Actualmente las amalgamas encontraron variadas aplicaciones tecnológicas: la minería de la plata y el oro, el proceso cloro-álcali, y las amalgamas dentales son los ejemplos más notorios (Blesa y Castro, 2015).

Se puede definir la contaminación como la presencia o incorporación al ambiente de sustancias o elementos tóxicos que son perjudiciales para el hombre o los ecosistemas (Awange, 2018). El mercurio es capaz de causar una variedad de efectos adversos dependiendo de la especie (elemental, orgánico o inorgánico), así como de la vía, cantidad y duración de exposición (Yard et al. 2012). Las fuentes de liberación de mercurio al medio ambiente, son tanto naturales como antropogénicas, es así que alrededor de 2000 toneladas de mercurio son emitidas al medio ambiente como resultado de las actividades humanas, tales como el procesamiento de minerales y la combustión de combustibles fósiles (Pacyna et al., 2010). Por otro lado, La investigación realizada por Artisanal Gold Council ha llevado a nuevas estimaciones globales para las emisiones de mercurio en la ASGM; considera la fuente líder de emisiones antropógenas, cuyas emisiones son de 727 toneladas, ésta cifra representa el 37% de las emisiones antropogénicas totales (Persaud y Telmer, 2014). En América Latina las emisiones se estiman en alrededor de 263 toneladas de mercurio, siendo su principal fuente de emisión el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal y a pequeña escala, que representa el 71% de las emisiones totales de la región, seguida por la producción de metales no ferrosos (11%) y la producción de oro a gran escala (7%), ver Figura 5. Las liberaciones al agua son más difíciles de calcular, pero también se estima que la extracción de oro artesanal es una fuente importante de contaminación de los medios acuáticos (PNUMA, 2017). En el caso de Perú, éste país se posiciona como el tercer país emisor de Mercurio en Latinoamérica, con un promedio de emisión de 70 tn de Mercurio por año, que representa el 7% del total de las emisiones a escala mundial, en cambio Lacerda (1997) le adjudica el 10% de las emisiones totales de mercurio a la minería artesanal. Sin embargo, lo cierto es que, aunque numerosos y graves, los impactos ambientales producidos por el mercurio son difíciles de percibir inmediatamente (Hinton et al., 2003; Spiegel y Veiga, 2005).



**Figura 5.** Distribución de emisiones de mercurio de América Latina y el Caribe en 2010. (PNUMA, 2017).

Hasta ahora, es conocida la toxicidad que presenta el mercurio, así como su amplia distribución en el ambiente (Veiga y Meech 1995), como posee una presión de vapor elevada, favorece el que permanezca mucho tiempo en suspensión en la atmósfera, haciéndola responsable de su amplia resiliencia y distribución mundial (Roulet, 2001; O’Driscoll et al., 2005). Una vez liberado a la atmósfera, el mercurio, tiene un tiempo de residencia que varía según la forma en la que se encuentre; el  $Hg^0$  tiene un tiempo de residencia medio de alrededor de un año, mientras que su forma oxidada, tiene tiempos de residencia que oscilan entre horas y meses (Gaona, 2004; Kim et al., 2016). Por tanto, su uso indiscriminado e ineficiente en la etapa de amalgama ocasiona que grandes cantidades de ésta sustancia se pierdan y se viertan al medioambiente en forma líquida o gaseosa (Mosquera et al., 1999). La proporción de las cantidades de mercurio liberadas a los sistemas acuáticos en la extracción del oro por la ASGM, según Blesa y Castro (2015), puede ser de hasta el 70%; de los cuales el 20% y 30% son liberados al aire. La descarga a los sistemas acuáticos empeora cuando se usa mercurio y cianuro, ya que este último compleja al mercurio:



y facilita su disponibilidad en el medio acuoso (Blesa y Castro, 2015).

### 2.1.5. Mercurio en el hombre

Todos los humanos están expuestos a algunos niveles bajos de mercurio, siendo los factores que determinan su aparición y gravedad para la salud; la dosis, la edad, el tiempo de exposición, las vías de exposición, los factores ambientales, nutricionales y genéticos (López et al., 2016); de los cuales el factor nutricional un patrón importante debido a que puede aumentar la exposición de una población cuando consumen pescados y mariscos contaminados con

mercurio (WHO, 2016). Según la UNEP (2002) y UNIDO (2003), los mineros artesanales y a pequeña escala, al igual que la población más cercana se exponen a la contaminación por mercurio durante los trabajos de recuperación del oro empleando la técnica de la amalgamación; técnica que consiste en quemar la amalgama de oro y mercurio con la finalidad de vaporizar el mercurio y así recuperar el oro.

Por otro lado, los objetivos principales de la toxicidad del mercurio y los compuestos de mercurio son el sistema nervioso, los riñones y el sistema cardiovascular. En general, se acepta que los sistemas de órganos en desarrollo (como el sistema nervioso fetal) son los más sensibles a los efectos tóxicos del mercurio. Los niveles de mercurio cerebral en el feto parecen ser significativamente más altos que en la sangre materna y el sistema nervioso central en desarrollo del feto se considera actualmente el principal sistema de preocupación, ya que demuestra la mayor sensibilidad. Otros sistemas que pueden verse afectados incluyen los sistemas respiratorio, gastrointestinal, hematológico, inmunitario y reproductivo.

El problema para la salud no se limita a la inhalación de vapores de mercurio. En muchos casos, la subsistencia está asociada con una dieta rica en pescado, y se ha determinado que en regiones donde hay minería artesanal de oro, los niveles de mercurio en peces superan con creces los valores estimados como seguros; tal es el caso encontrado en Puerto Maldonado (Departamento de Madre de Dios, Perú), estudio realizado por la Carnegie Institution for Science, el Proyecto CAMEP (Carnegie Amazon Mercury Ecosystem Project, 2012). Cuyo resultado muestra que la combinación de la ingesta de pescado más la inhalación de vapores de mercurio resulta en que el 78% de los adultos tienen niveles de mercurio en el pelo por encima del valor de referencia internacional (1 ppm), y las mujeres en edad de procrear registran los valores más elevados. Ver Tabla 6.

**Tabla 6.** Resumen de indicadores de exposición por 3 criterios.

<b>Criterio</b>	<b>Indicadores de exposición</b>	<b>Observaciones</b>	<b>Referencia</b>
Ingestión de mercurio.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La EPA estableció una RfD de 0,1 µg/kg de peso corporal por día para el metilmercurio.</li> <li>- La JECFA estableció un PTWI de 1,6 µg/Kg de peso corporal por semana para el metilmercurio.</li> <li>- La TDI de mercurio inorgánico es de 2 µg/Kg de peso corporal por día.</li> </ul>	<p>RfD (dosis de referencia).</p> <p>PTWI (El valor provisional máximo de la ingesta tolerable semanal).</p> <p>TDI (Ingesta diaria tolerable)</p>	<p>(WHO, 2005), (WHO, 2004), (WHO, 2016).</p>
Concentración en agua para consumo humano.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La OMS ha establecido como valor guía provisorio, la cantidad de 0,001 mg/L (1 µg/L) (cifra redondeada),</li> </ul>		<p>(Cotton y Wilkinson, 1966).</p>

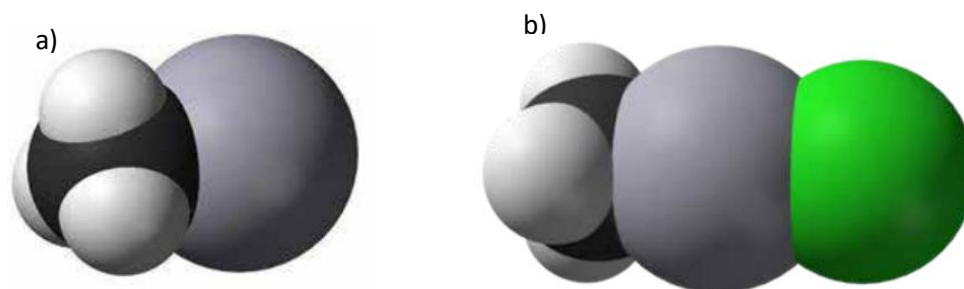
Exposición por inhalación.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Según la EPA, el RFC es de 300 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> (estimada a partir de los valores observados de LOAEL).</li> <li>- La OMS estable un límite de exposición ocupacional de 20 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>.</li> <li>- La EPA estableció un RfC para mercurio elemental de 0.3<math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math>, basado en el LOAEL (ajustado para exposición intermitente), de 9.0 <math>\mu\text{g}/\text{m}^3</math> y un factor de incertidumbre de 30.</li> </ul>	<p>La RfC (Concentración de referencia) se establece para una exposición continua durante toda la vida. NOAEL (Nivel máximo al que no se observan efectos adversos) LOAEL (Nivel más bajo al cual se observan efectos adversos) (U.S.E.P.A., 1999).</p> <p>(U.S.E.P.A., 1995).</p>
----------------------------	---	--

Uno de los casos de envenenamiento registrado más conocido en la historia es el de Minamata (Japón), ocurrido en la década de 1950. Donde por muchos años la compañía Chisso descargó sus efluentes al mar; efluentes que contenían entre 500-1000  $\mu\text{g}/\text{g}$  de mercurio total, y una parte de ese mercurio (100- 170  $\mu\text{g}/\text{g}$ ) estaba como metilmercurio (Clarkson y Magos, 2006). La descarga comenzó en la década de 1930, pero los efectos clínicos fueron observados mucho más tarde (Clarkson y Magos 2006). La enfermedad de Minamata es una encefalopatía y neuropatía periférica causada por la ingesta diaria de pescados y mariscos contaminados con metilmercurio. Los peces, camarones, cangrejos y mariscos en general incorporan el metilmercurio a través de las agallas y del tracto gastrointestinal (Blesa, 2010). Además, el mercurio es apreciablemente soluble en grasas, y esta propiedad es muy importante en su capacidad de atravesar membranas celulares (Blesa y Castro, 2015).

## 2.2. Metilmercurio

El metilmercurio es en muchos casos un catión (Figura 6a),  $\text{H}_3\text{C-Hg}^+$ , que forma parte de una sal, por ejemplo, del nitrato. En otros casos, el mercurio forma una segunda unión covalente; por ejemplo, el cloruro de metilmercurio (Figura 6b) que es un compuesto que no tiene iones:  $\text{H}_3\text{C-Hg-Cl}$ .

Ciertos organismos potencialmente anaeróbicos son aparentemente los responsables de la formación de metilmercurio por metilación de mercurio inorgánico en ambientes acuáticos. Se ha postulado que bacterias reductoras de sulfato pueden metilar el mercurio en los sedimentos acuáticos. A su vez, las reacciones biológicas y fotoquímicas de desmetilación, destruyen el metilmercurio. Los niveles de metilmercurio quedan determinados entonces por el balance entre las tasas de metilación y de desmetilación (Blesa y Castro, 2015).



**Figura 6.** A la izquierda, (a) catión metilmercurio, a la derecha (b), cloruro de metilmercurio. En negro, C; gris claro, H; gris oscuro, Hg; verde: Cl (Blesa y Castro, 2015).

El metilmercurio puede acumularse en la cadena trófica porque los diversos organismos lo retienen mejor, sin embargo, una vez que ingresa al cuerpo humano es sumamente tóxico y ataca principalmente el sistema nervioso. En adultos, los efectos más precoces son síntomas no específicos, tales como parestesia, malestar y visión borrosa; con una mayor exposición, aparecen signos tales como una constricción concéntrica del campo visual, sordera, disartria, ataxia y, por último, coma y muerte (Harada, 1995). Dado que el metilmercurio es un neurotóxico potente, su captación y bioacumulación parece ir en contra de la optimización de los sistemas biológicos: ¿por qué acumular una sustancia tóxica? Este fenómeno, que ha sido llamado la paradoja del mercurio, se ha atribuido a la necesidad de los organismos de disminuir el contacto del metilmercurio con las proteínas externas, de membrana, que son el blanco sensible del metilmercurio. Su compartimentalización en el interior celular sería pues en realidad un mecanismo de defensa (Blesa y Castro, 2015).

Actualmente, existen muchas técnicas para analizar en grado de contaminación por mercurio, siendo el cabello uno de estas alternativas de medición. Según Echegaray y Gómez (1984) el cabello funciona como un dosímetro y la cantidad hallada en él es proporcional a la que ha sido incorporada en el organismo, de otra parte, Hac y Krechniak (1993) dicen que el cabello constituye una herramienta útil para el monitoreo de mercurio en exposiciones de tipo ocupacional.

### 2.3. Problemática asociada a la minería del oro por el uso del mercurio

La actividad minera, al igual que muchas actividades humanas, produce serios problemas al medio ambiente debido a sus diversos procesos mineros y químicos (The Price of Gold, 2016). Uno de esos procesos es el de beneficio de los minerales, el cual produce residuos

altamente tóxicos, ya sea por los insumos empleados o por la liberación de sustancias químicas (Kuramoto, 2001). Según la PNUMA (2008), la minería artesanal del oro y a pequeña escala es, por sí sola, la mayor fuente de liberación intencional de mercurio del mundo, originando la exposición de los trabajadores, la liberación del mercurio en el medio ambiente y la creación de riesgos para los habitantes de las comunidades cercanas. Cuyo resultado final es una extensa degradación del medio ambiente y la contaminación de los ecosistemas, efectos que pueden perdurar durante varias décadas después del cese de las actividades mineras. Por otro lado, cuando el cianuro disuelve al mercurio, ésta aumenta su movilidad en los ecosistemas acuáticos, y también es liberada a la atmósfera, por eso se la considerada como una de las peores prácticas (Documento de orientación, 2017).

### 2.3.1. Efectos sobre la Salud

La exposición ocupacional al mercurio es un problema actual para los trabajadores de muchas industrias. Sin embargo, quienes sufren la mayor exposición son los millones de trabajadores de la minería de oro artesanal y pequeña escala; quienes usan el Hg para separar el oro del desmonte o desechos de roca, generalmente en condiciones mal controladas o no controladas. La inhalación del vapor es generalmente la vía más importante y peligrosa de exposición al Hg para los mineros artesanales del oro y también para sus familias, así como para los comerciantes de oro y todas las personas que habitan en las cercanías. Dicha exposición se puede conocer y medir gracias a los biomarcadores o macadores biológicos como son: El cabello, la sangre, sangre y tejido del cordón umbilical, la orina, la leche humana y las uñas (WHO, 2016). De acuerdo a la WHO (2016), se resalta la importancia de tener en cuenta 6 factores importantes al evaluar la idoneidad de un biomarcador, estos factores están descritos en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Factores para evaluar la idoneidad de un biomarcador (WHO, 2016).

Ítem	Factores
1	Grado de correlación entre biomarcador y la dosis (o exposición externa) a varias formas de mercurio.
2	Grado de correlación entre el biomarcador y la concentración de mercurio en el tejido objetivo.
3	Grado de correlación entre la variabilidad en el tiempo en el biomarcador y los cambios en la dosis efectiva en el tejido objetivo con el tiempo.
4	Tipo de biomarcador sería el más apropiado dadas las características culturales de la población.
5	Tipo de tecnología está disponible para la recolección de muestras y la medición de mercurio.
6	Invasividad del procedimiento en la recolección de muestras.

Por otro lado, la mayoría de los métodos disponibles para determinar los niveles de mercurio en sangre, orina, tejidos y cabello usan espectrometría de absorción atómica (AAS), espectrometría de emisión atómica (AES), espectrometría de fluorescencia atómica (AFS), análisis de activación de neutrones (NAA), espectrometría de masas (MS), o voltametría de extracción anódica (ASV), sin embargo, el vapor frío AAS (o CVAAS) es el más utilizado. En la Tabla 8 se detallan los métodos analíticos a usarse en las muestras de cabello que se tomaron durante la visita a las minas del Sur Medio del Perú.

En la Tabla 8 se resume los principales marcadores biológicos en función a: el estado de Hg que pueden medir, su invasividad, la ventana de detección y su acumulación en el cuerpo. En la orina, la presencia de mercurio generalmente representa la exposición al mercurio inorgánico y / o elemental, y su recolección no es invasiva. Según WHO (2016), el mercurio urinario indica estrechamente los niveles de mercurio presentes en los riñones (WHO, 2016). Finalmente, en caso de exposición se tiene una ventana de detección que es de 36 hasta 72 horas, cuyas concentraciones varían con la hidratación del individuo, y varían también ampliamente con la dosis y el tiempo. Sin embargo, su complemento con el análisis del cabello tiene un potencial interesante (Baer et al., 1991).

**Tabla 8.** Principales marcadores biológicos.

Biomarcador	Estado del Hg	Característica	Tiempo de detección (horas)	Acumulación en el cuerpo	referencia
Orina	Hg inorgánico, vapor de Hg°	No invasiva	36 a 72	Cerebro. Hígado, riñón.	WHO, 2016
Sangre	Metilmercurio	Invasiva	36 a 72	Cerebro. Hígado, riñón.	Kempson, I. M.; Lombi, E., 2011
Cabello	Metilmercurio	No invasiva	-	Cerebro. Hígado, riñón.	WHO, 2016; Kempson, I. M.; Lombi, E., 2011; (IPCS, 2000; UNIDO, 2003; Suzuki, 1991).

La sangre se puede usar para documentar la exposición a corto plazo y proporciona información diferente al del cabello, éste análisis se puede usar de manera rutinaria para el monitoreo de elementos esenciales y no esenciales, pero nuevamente, las concentraciones pueden disminuir rápidamente en casos de exposición aguda. Es invasivo con riesgo de transmisión de la enfermedad y requiere personal experimentado para obtener y manipular las muestras. Al igual que con el análisis de orina, es más útil para exposiciones muy recientes y / o crónicas (Kempson y Lombi, 2011).



Finalmente, el cabello es la opción preferida para documentar la exposición al metilmercurio, ya que proporciona una muestra simple, integradora, no invasiva y cuyo almacenamiento de muestras y preparación para el análisis se simplifica, y no se requieren técnicas especiales de conservación (WHO, 2016; Kempson y Lombi, 2011). El metilmercurio generalmente constituye al menos el 80% del mercurio total analizado en el cabello entre los consumidores de pescado (McDowell et al., 2004). Es así que el mercurio capilar es un biomarcador muy bueno para el metilmercurio, y a menudo se usa para caracterizar las exposiciones al metilmercurio; el cual una vez incorporado en el cabello no regresa a la sangre, por lo que proporciona un buen marcador a largo plazo. Es así que el cabello incorpora metilmercurio durante su formación y muestra además una relación relativamente directa con los niveles de mercurio en la sangre. Por su parte Kempson (2011) ha referido que la fuente nutricional del crecimiento del cabello es el suministro de sangre, que contiene rastros de cualquier cosa ingerida por el individuo. Cualquier xenobiótico y sus metabolitos pueden incorporarse en la matriz de crecimiento del cabello creando un perfil resuelto en el tiempo. Por tanto, el análisis del cabello tiene muchas aplicaciones como son: el estudio de la nutrición (Kempson et al., 2007), los hábitos alimenticios (Rodushkin y Axelsson, 2000), exposición a toxinas (Bencko, 1995 y Abe et al., 1995) y el abuso de drogas (Kelly y Rogers, 1996).

Finalmente podemos concluir que el análisis del cabello muestra ventajas particulares sobre el análisis de la orina (Kelly y Rogers, 1996), Sin embargo, el cabello no es tan buen indicador de la exposición al vapor de mercurio como lo es la orina (IPCS, 2000; UNIDO, 2003). A pesar de ello, el cabello presenta un aspecto superior, el cual es su capacidad para proporcionar un perfil histórico de exposición a xenobióticos que puede proporcionar un interés particular para exposiciones agudas (Kempson y Lombi, 2011). Ningún otro medio proporciona información sobre un período de tiempo que representa el cabello (Kempson y Lombi, 2011), el cual crece 1 cm por mes y puede evaluarse a lo largo del tallo para proporcionar un perfil de exposición a lo largo del tiempo sin cambios (Suzuki, 1991; IPCS, 2000; UNIDO, 2003).

### 2.3.2. Contaminación de los cursos de agua

El mercurio que entra en las aguas sufre una serie de transformaciones muy complejas, y difíciles de caracterizar con certeza por los bajos niveles que deben medirse. Los compuestos de Hg (II) que entran a las aguas pueden reducirse, asociarse al material particulado y sedimentar, y por acción de bacterias (*Pseudomonas* spp. y bacterias anaeróbicas que contienen la enzima metano-sintetasa) transformarse en metilmercurio, nombre con el cual se suele englobar al catión metilmercurio,  $\text{Hg}(\text{CH}_3)^+$ , al dimetilmercurio  $\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$  y a otros homólogos

superiores como el etilmercurio. El metilmercurio puede ingresar fácilmente en la cadena trófica, y acumularse por su lenta eliminación. El mercurio de los peces está precisamente en forma de compuestos orgánicos, de los cuales el metilmercurio es el más sencillo (IPCS, 1990).

## **2.4. Cianuro**

Cianuro es un término general que se aplica a un grupo de sustancias químicas que contienen carbono y nitrógeno. Los compuestos de cianuro contienen sustancias químicas que se encuentran presentes en la naturaleza o que han sido producidas por el hombre (Logsdon et al., 2001), con respecto a lo segundo; las principales formas de cianuro son como cianuro de hidrógeno (HCN), que es un gas, o en forma de cristales como el cianuro de sodio (NaCN) o el cianuro de potasio (KCN) (Guerrero, 2015). Una de las características que presenta el cianuro es su olor a “almendras amargas”, aunque no siempre emana ese olor. Por otro lado, el cianuro es una sustancia tóxica que puede ser letal si se la ingiere o se la inhala en cantidades suficientes (Logsdon et al., 2001); su toxicidad depende del estado en que se encuentre, en forma libre (gas o líquido) o compleja (acuoso o sólido), además también puede ser adsorbido por contacto dérmico. La intoxicación aguda en el ser humano resulta en convulsiones, vómitos, coma y la muerte (Guerrero, 2015).

### **2.4.1. Presencia del cianuro en la naturaleza**

El carbono y el nitrógeno están presentes a nuestro alrededor y juntos forman casi el 80% del aire que respiramos, ambos están presentes en las moléculas orgánicas que son la base de todas las formas de vida (Logsdon et al., 2001). En la naturaleza, el cianuro se encuentra presente en bajas concentraciones, por ejemplo, en muchos insectos y plantas, entre las que se incluyen una amplia variedad de especies vegetales. El cianuro se encuentra en almendras, albaricoques, bambúes, frijoles germinados, cerezas, aceitunas, papas, sorgo, soya y nueces, a las que brinda protección contra los depredadores (Guerrero, 2015). En el corazón de la almendra amarga hay aproximadamente 1 mg de HCN en forma de amigdalina, en la Tabla 9 se resume las concentraciones de algunas plantas seleccionadas. Además de estas formas naturales del cianuro, los compuestos de cianuro también están presentes en fuentes antropogénicas de la vida diaria como los escapes de los automóviles, el humo del cigarrillo e incluso la sal de mesa y la sal usada para derretir el hielo de los caminos (Logsdon et al., 2001).

**Tabla 9.** Concentraciones de cianuro en plantas seleccionadas (Eisler, 1991).

Especies de Plantas	Concentración (mg/Kg)
Yuca (Variedades dulces)	
Hojas	377-500
Raíces	138
Raíces desecadas	46-< 100
Puré	81
Punta de Bambú	Máx. 8000
Poroto Blanco (Birmania)	2100
Almendra (amarga)	280 2500
Sorgo (planta joven)	Máx. 2500

## 2.4.2. Cianuro en el hombre

El cianuro es un veneno de acción rápida, capaz de matar a una persona en cuestión de minutos si está expuesta a una dosis suficientemente elevada. El cianuro impide a las células utilizar el oxígeno, la cual causa hipoxia de los tejidos y “cianosis” (decoloración azulada de la piel). El sistema respiratorio deja de nutrir a las células con oxígeno, causando respiración rápida y profunda, seguida por convulsiones, pérdida de conocimiento y asfixia (Logsdon et al., 2001). Por otro lado, el cianuro no se acumula en los tejidos porque el cuerpo transforma esas pequeñas cantidades en un compuesto menos tóxico llamado tiocianato, que luego se excreta. No es conocido que el cianuro cause cáncer o defectos congénitos o que pueda afectar adversamente la reproducción (Logsdon et al., 2001). En la Tabla 10 se resume los límites de exposición para el cianuro.

**Tabla 10.** Resumen de Límites de exposición al Cianuro (Logsdon et al., 2001).

Forma de cianuro	Límite de exposición	Consecuencias
HCN	4.7 ppm De 20 a 40 ppm en el aire.	Límite umbral tope. Malestar respiratorio después de varias horas.
Cianuro Libre	> 250 ppm en el aire Entre 50 y 200 mg (1 a 3 mg/kg de masa corporal). >100 mg/kg de peso corporal.	Muerte en pocos minutos Dosis letal por ingestión o inhalación. Dosis letal por absorción dérmica.

La exposición al cianuro expone al hombre al tiocianato, el cual se forma del cianuro una vez que ha ingresado al cuerpo; ésta sustancia es mucho menos toxica que el cianuro y se encuentra en muchos alimentos como las carnes, productos lácteos y las plantas (ATSDR, 1999). No obstante,

no se conoce de ninguna información referente a las concentraciones de tiocinato en el aire o el agua potable libre de contaminación.

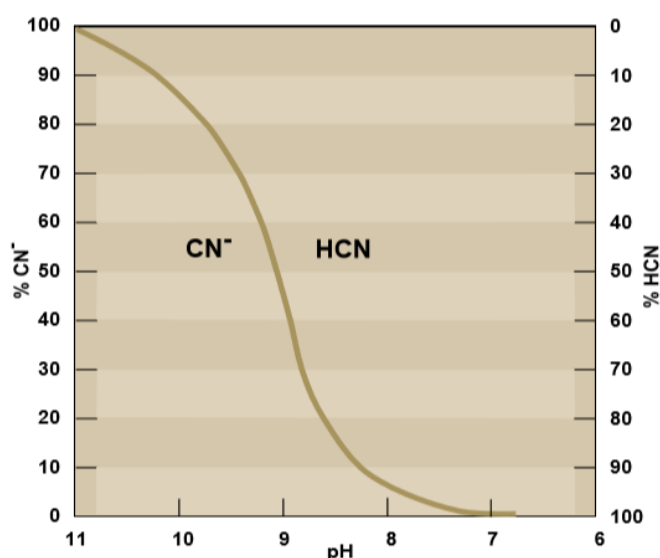
### **2.4.3. Cianuro en la obtención del oro**

La minería es una actividad industrial que utiliza una cantidad significativa de cianuro, aproximadamente un 20% de la producción total. Desde 1887, las soluciones de cianuro se han utilizado principalmente para extraer oro, que de otro modo no podrían extraerse eficazmente (Logsdon et al., 2001). El cianuro es un producto químico ampliamente utilizado por la industria minera para la disolución o lixiviación de metales preciosos (Guerrero, 2005), específicamente el oro, es también uno de los pocos reactivos químicos que disuelven el oro en el agua y que además, se consigue fácilmente a un precio bajo (Logsdon et al., 2001). Sin embargo, Su alto grado de toxicidad lo convierten en un compuesto de gran peligrosidad si no es manipulado de manera adecuada, pudiendo originar considerables problemas ambientales (Guerrero, 2005). Los procesos de extracción aurífera empleada en operaciones mineras requieren de soluciones muy diluidas de cianuro de sodio, generalmente entre 0.01% y 0.05% de cianuro (100 a 500 partes por millón) (Logsdon et al., 2001).

El cianuro se utiliza en minería para extraer el oro del mineral, en particular de minerales de baja ley y minerales que no se pueden tratar fácilmente mediante procesos físicos simples como la trituración y la separación por gravedad. El proceso de disolución de metales se denomina lixiviación. El cianuro de sodio se disuelve en agua donde, en condiciones ligeramente oxidantes, disuelve el oro contenido en el mineral. La solución resultante que contiene oro se denomina "solución cargada". Luego se agrega zinc o carbón activado a la solución cargada para recuperar el oro extrayéndolo de la solución. La solución residual o "estéril" (es decir, carente de oro) puede recircularse para extraer más oro o enviarse a una instalación para el tratamiento de residuos (Logsdon et al., 2001). Sin embargo, el punto crítico es el manejo de los vertimientos y el grado de responsabilidad ambiental con que se realiza la explotación minera. Cuando se utiliza al mismo tiempo tanto el cianuro como el mercurio, da lugar a la creación de un nuevo tipo de contaminantes que resulta ser especialmente peligroso para la salud humana (UNEP, 2014).

Después de haber extraído el oro por medio de procesos hidrometalúrgicos, pueden estar presentes tres tipos principales de compuestos de cianuro en los efluentes residuales o en las soluciones de los procesos: cianuro libre, cianuro débilmente complejo y cianuro fuertemente complejo. Juntos, los tres compuestos de cianuro constituyen el "cianuro total".

El cianuro libre es el término utilizado para describir tanto el ion de cianuro (CN) que se disuelve en el agua del proceso como cualquier cianuro de hidrogeno (HCN) que se forma en la solución. Las briquetas solidas de cianuro de sodio se disuelven en el agua para forma el ion de sodio y el anión de cianuro. El anión se combina luego con el ion de hidrogeno para formar HCN molecular. La concentración del ion de hidrogeno en el agua del proceso se expresa mediante el conocido parámetro pH.



**Figura 07.** Equilibrio CN/HCN en función del pH (Scott E inglés, 1981).

Casi todo el cianuro libre está presente como HCN cuando hay abundantes iones de hidrogeno presentes, es decir, a un valor de pH de 8 o menos. Este HCN, entonces, puede volatizarse y dispersarse en el aire. Cuando el pH es superior a 10.5, hay pocos iones de hidrogeno presentes y casi todo el cianuro libre está presente como CN. En condiciones normales de temperatura y presión, las concentraciones de HCN y CN son iguales a un valor de pH de aproximadamente 9.4. (Logsdon et al., 2001), Ver Figura 7.

Anualmente se utiliza más de un millón de toneladas de cianuro, que representan alrededor del 80% de la producción total, en la producción de químicos orgánicos como el nitrilo, el nylon y los plásticos acrílicos. Otras aplicaciones industriales incluyen la galvanoplastia, el procesamiento de metales, el endurecimiento del acero, las aplicaciones fotográficas y la producción de goma sintética. El 20% restante de la producción de cianuro se utiliza para fabricar cianuro de sodio, una forma sólida de cianuro cuya manipulación es relativamente fácil y segura. De este porcentaje, el 90%, es decir, el 18% de la producción total, se utiliza en minería en todo el mundo, mayormente para la recuperación de oro.

## **2.5. Tipos de minería**

### **2.5.1. Minería ilegal e Informal**

Es importante entender la diferencia entre informal e ilegal. De acuerdo al Decreto Legislativo N° 1105 (2012), La minería ilegal se realiza en zonas donde está prohibido operar, como áreas protegidas, ríos y lagunas. En cambio, la informal es aquella que no tiene permisos para funcionar, pero trabaja en áreas donde sí está permitido hacer minería y, por lo tanto, se podría acoger a los procesos de formalización que la ley determina.

### **2.5.2. Minería artesanal**

Perú define minería artesanal y pequeña escala con la Ley N° 27651, Ley de formalización y promoción de la pequeña minería y la minería artesanal, de la manera separada:

La minería artesanal es una actividad de subsistencia que se sustenta en la utilización intensiva de mano de obra que la convierte en una gran fuente de generación de empleo y de beneficios colaterales productivos en las áreas de influencia de sus operaciones, que generalmente son las más apartadas y deprimidas del país, constituyéndose en polos de desarrollo, por lo que resulta necesario establecer una legislación especial sobre la materia.

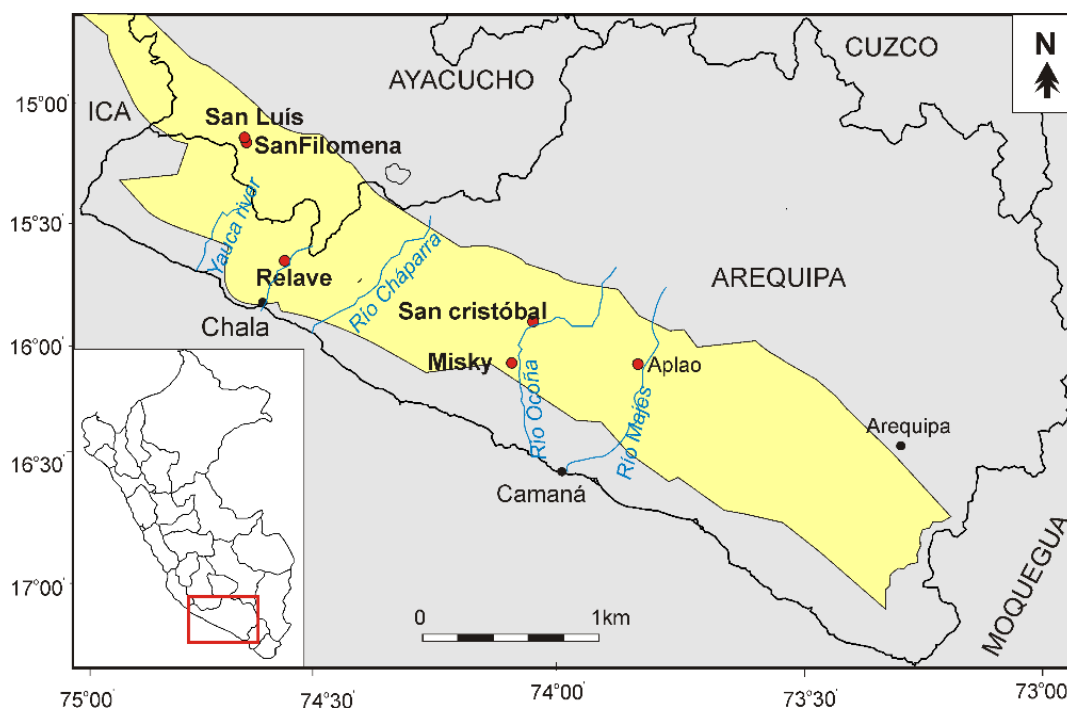
La pequeña minería es la actividad minera ejercida a pequeña escala, dentro de los límites de extensión y capacidad instalada de producción y/o beneficio establecidos por el artículo 91 de la Ley General de Minería. La presente ley brinda a la pequeña minería un régimen promocional con el fin de fortalecer su desarrollo a nivel nacional, con el consiguiente empleo de mano de obra local y mejora de las condiciones de vida de las poblaciones aledañas.

## Capítulo 3

### Capítulo 4 Descripción general de la zona de estudio

#### 3.1. Ubicación

La franja Nasca-Ocoña con mineralización oro-cobre-hierro, comprende el segmento Arequipa del batolito de la costa (Pitcher et al. 1977), se localiza en la costa sur media del Perú. Dicha franja se extiende por el Norte hasta Ica y por el sur hasta la Joya (Arequipa). Esta franja se ha explotado intermitentemente desde el siglo XVII, habiéndose ubicado a la fecha más de un centenar de depósitos de oro (Loaiza et al., 2008).



**Figura 08.** Localización de las minas en estudio.

El cinturón de oro Nazca-Palpa-Ocoña tiene más de 70 depósitos (Vargas, 1978). De los cuales, 4 depósitos son parte de este estudio: Misky o Posco-Misky, San Cristóbal, Cháparra y San Luis (Figura 8). Desde el punto de vista metalogenético, el Perú se divide en 23 cinturones, 12 de ellos son cinturones de oro, y el área estudiada pertenece al cinturón V y IX (Figura 10), correspondiente a depósitos de Cu-Au en óxidos de hierro y relacionados con la intrusión de Au-Pb-Zn-Cu de la edad del Cretácico Superior respectivamente (Acosta, J et al ,2010).

**Tabla 11.** Localización de Asentamientos Mineros de estudio.

Departamento	Provincia	Distrito	Asentamiento Minero
Ayacucho	Lucanas	Sancos	San Luis
	Parinacochas	Pullos	San Juan de Relaves
Arequipa	Caravelí	Cháparra	Cháparra
	Camaná	Mariano Nicolás Valcárcel	Misky
	Condesuyo	Yanaquihua	San Cristobal

El área de estudio se encuentra ubicada al Sur Medio del Perú, entre los departamentos de Ayacucho (provincia de Lucanas y Parinacochas) y Arequipa (provincia de Caravelí, camaná y Condesuyo); abarcando una superficie aproxima de 350 km de largo por 40 km de ancho, con altitudes que varían entre 500 a 4300 m.s.n.m. en la Tabla 11 se detalla la localización de los asentamientos mineros en estudio, así como los que se tomaran de referencia.

El acceso a esta provincia metalogenética es por la carretera Panamericana Sur, que es la vía que recorre toda la zona de NO a SE, aproximadamente a lo largo de 470 km (Loaiza et al., 2008). Las rutas que se utilizaron para llegar son las que se detallan en la Tabla 12, donde los tiempos mencionados son referenciales, así como las distancias.

**Tabla 12.** Distancias, vías y tiempos para acceso a la zona de estudio.

Ruta	Km	Tipo de vía	Tiempo
Lima-Nazca	446,6	Asfaltada	8h
Nazca-Chala	170,1	Asfaltada	3 h
Chala-Yauca	46,9	Asfaltada	1 30 min
Yauca-San Luis	59	Asfaltada y trocha	1 h 30 min
Chala-Relave	38,3	Asfaltada y trocha	1 h
Chala-cháparra	54,4	Asfaltada y trocha	1 h
Chala-Camaná	223,2	Asfaltada	4 h
Camaná-Posco Misky	17	Asfaltada y trocha	5 h
Condesuyos-San Cristobal	25	Asfaltada	1 h
Camaná-Huancarqui	126	Asfaltada	2 h 30 min

### 3.2. Geomorfología

En el área de estudio destacan dos elementos fisiográficos: las cadena costanera y la cordillera de la costa; la cadena costanera es un territorio de relieve moderado, cuyo ancho varía entre 20 y 30 km, el cual se desarrolla entre el Océano Pacífico y los contrafuertes occidentales de la cordillera de los Andes, con altitudes que van desde el nivel del mar hasta 1500 m.; la



cordillera de la costa comprende una cadena de cerros que alcanzan aproximadamente 2200 m de altitud y que bordea la zona litoral. Números valles angostos atraviesan la planicie costanera y la mayoría presenta ríos temporales (Acosta, J et al ,2010).

### 3.3. Hidrografía

Existen tres grandes sistemas hidrográficos en el Perú denominadas vertientes: el Pacífico, el Atlántico y el lago Titicaca. Nuestra área de estudio está localizada en la vertiente del pacifico, la cual está formada por todos los ríos de la Costa, los que nacen en la Cordillera de los Andes en su posición Occidental y que vierten sus aguas en el Océano Pacífico, por ello también se le denomina sistema hidrográfico de la Costa. Los principales ríos de ésta vertiente en función al área elegida de estudio son: Acarí (178 km), Yauca, Chala, Cháparra (96 km), Atico, Ocoña (255 km) y Majes (388 km), de los cuales Ocoña es el de mayor caudal permanente.

Algunas de las características de vertiente del pacifico es que se originan en la cumbre de la cadena occidental de los andes, son transversales, de corta longitud, poco profundas, con fuerte pendiente, angostas, de régimen regular y no son navegables, salvo en el caso del río Tumbes. Los ríos drenan con dirección de NE a SO, las cuales van a desembocar finalmente en el océano Pacífico, el caudal de los ríos varía de acuerdo a la estación del año, siendo sólo temporales. Por otro lado, la cuenta del río Yauca nace en la laguna de Ancascocha, distrito de Chaviña y toma diferentes nombres. Los valles de Chala y Tocota generalmente están secos y por ellos corre agua solo en las épocas de verano. El río Acarí tiene su origen en Puquio y recorre una distancia aproximadamente de 32 km, tiene agua durante todo el año, pero con poco caudal. El río Cháparra tiene dirección SO, su origen se encuentra a 3 900 msnm y nace por filtración de la laguna Parinacochas mediante filtración, su caudal varía como todos los ríos de la costa de acuerdo a las estaciones del año, en invierno disminuye de tal manera que no fluye agua, mientras que, en verano, aumenta considerablemente por las precipitaciones. La quebrada San Cristobal es afluente al río Ocoña, el cual nace a casi 5500 m de altitud con el nombre de quebrada Compepalca y luego toma la denominación del río Cuspa. Tiene su origen en la confluencia de los ríos Huanca y Oyolo, los cuales colectan todo el drenaje de las quebradas de la parte alta de la cuenca. Estos ríos originan en su confluencia el río Uchubamba, que toma después el nombre de Marán. En su confluencia por la margen izquierda con el río Cotahuasi toma el nombre de río Ocoña, que conserva hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

### 3.4. Clima

En la cadena costanera, el clima es templado y húmedo, la mayor parte del año está nublado y, ocasionalmente, se producen finas precipitaciones. Durante los meses de verano, el calor es considerable y el clima se torna cálido. De acuerdo a los datos obtenidos de la estación hidrometeorológica automática de Ocoña, los meses más calurosos son enero, febrero, marzo y abril, mientras que los meses más fríos son junio, julio, agosto, septiembre y parte de octubre. Por otro lado, entre distintas poblaciones cercanas, como Chala y San Luis, el clima es muy variado debido a la diferencia de cota (Acosta, J et al., 2010).

### 3.5. Centros poblados

Los centros poblados de la zona de estudio se detallan en la Tabla 13 cuyos habitantes se dedican a la actividad minera mayoritariamente. Ésta actividad es llevada a cabo por los mineros artesanales, los mineros informales y las pequeñas empresas en producción. Por otro lado, los pobladores de los numerosos caseríos y pueblos pequeños situados a lo largo de la carretera Panamericana Sur y partes bajas de los valles de la franja aurífera se dedican a la agricultura alternada con la ganadería (Acosta, J et al., 2010). La actividad minera se hace presente en esta zona, mayoritariamente, mediante mineros artesanales formales, organizados por ONG que vienen trabajando con ellos.

**Tabla 13.** Principales centros poblados en la zona de estudio, mostrando su población total (INEI, 2017).

Localidad	Población (hab.) *1
Yauca	1468
Chala	7940
Cháparra	1426
Misky	610
San Luis	635
Santa Filomena	748
Relave	4302

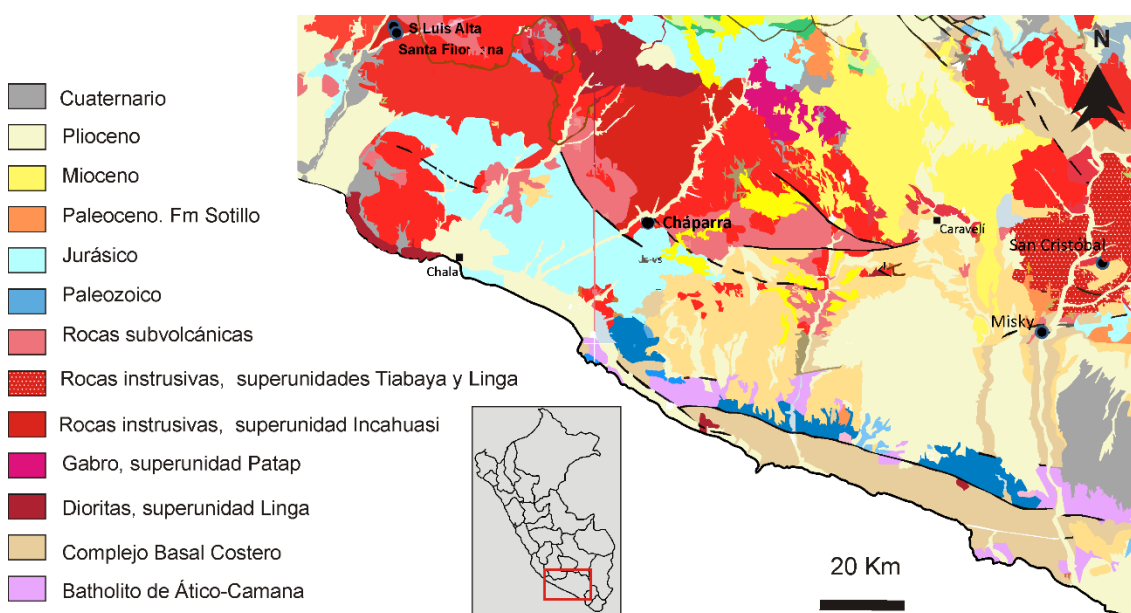
### 3.6. Marco geológico

#### 3.6.1. Encuadre

Los depósitos de oro del Sur Medio del Perú pertenecen al cinturón de oro Nazca-Palpa-Ocoña, que se extiende a lo largo de más de 350 km a lo largo de la parte sur del batolito costero. Este batolito está constituido por numerosos cuerpos plutónicos mesozoicos y se extiende casi continuamente a lo largo de la Cordillera Occidental del Perú, extendiéndose más de 1600 km

en paralelo a la costa y tiene más de 65 km de ancho (Cobbing et al. 1977). Este batolito se divide en cinco segmentos que, de norte a sur, son Piura, Trujillo, Lima, Arequipa y Toquelapa.

El cinturón de oro Nazca-Palpa-Ocoña pertenece al segmento de Arequipa, que, a su vez, está constituido por cinco superunidades (Cobbing, 1982). La Superunidad Patap está compuesta de gabbro; la superunidad Linga está compuesta de rocas entre monzodiorita y monzogranita; la superunidad Pampahuasi está compuesta de tonalidades; La superunidad Incahuasi representa el mayor volumen del batolito y está compuesta por grandes plutones que consisten principalmente en monzodioritas. Finalmente, la Súper unidad de Tiabaya es la más joven e importante de las cinco, ya que aflora a lo largo de todo el segmento de Arequipa, mostrando relaciones de sección transversal con todas las intrusiones anteriores. La litología varía de dioritas a monzogranitas, siendo las granodioritas las rocas más abundantes. La edad de este segmento es entre 102 Ma y 80 Ma (Cobbing, 1982).



**Figura 9.** Mapa geológico de la región de estudio en el Sr-medio de Perú (Modificado de INGEMMET).

De los 70 depósitos que tiene el cinturón de Nazca-Palca-Ocoña (Vargas, 1978), cuatro son de nuestro interés en este estudio, uno de ellos es San Luis, Cháparra, Misky o Posco-Misky y San Cristóbal; Cháparra se encuentra en la Súper unidad Linga y el resto de los depósitos de mineral presentados aquí se encuentran ubicados geológicamente en la Súper unidad Tiabaya (Acosta et al., 2010; Palacios et al., 2011; Alfonso et al., 2019), tal es el caso de San Luis, San Cristóbal y Posco-Misky. Estas súper unidades se describen a continuación:

- Superunidad Tiabaya (Ks-ti): Corresponde a la secuencia final de intrusión del Batolito de la Costa y tiene la particularidad de haberse emplazado a lo largo de una faja central y longitudinal, limitada en el SO por la Superunidad Linga. Esta unidad intrusiva es la que presenta mayor volumen, encontrándose expuesta en toda el área de estudio (Arcos y Calderón, 2017). Es así que la superunidad de Tiabaya es la más importante por su afloramiento en todo el segmento de Arequipa.
- Superunidad Linga (Ks-li): Sus afloramientos están restringidos a la faja más occidental, mejor expuestos en los cuadrángulos de Cháparra y Chala, de donde se prolonga al sector sur occidental del Cuadrángulo de Jaquí. La litología predominante es la monzonita, pero tiene variaciones locales con textura granular variable, feldespato potásico y poca biotita.

### 3.6.2. Geología estructural

La cordillera de los Andes presenta cambios locales en su dirección general NO-SE, y parecen estar controlados por fallas de rumbo. Estos fallamientos y/o lineamientos estructurales dan origen a dos grandes sistemas: uno dirección NO-SE que se ajusta al batolito de la costa, los sobre escurrimientos que corresponden a las zonas noroccidental y suroriental, la dirección de los conos volcánicos del sur y la mineralización de pórfido de Cu; el segundo sistema tiene dirección NE-SO y es transversal a la dirección andina a la que están relacionados ciertas chimeneas de brechas y centros volcánicos en el sur del Perú (Loaiza et al., 2008).

### 3.6.3. Geología económica

La zona de estudio se encuentra enmarcada dentro de la Franja Metalogenética V y IX, correspondiente a los depósitos de Cu-Au en óxidos de hierro y Au-Pb-Zn-Cu de la edad del Cretácico Superior respectivamente. En toda el área se encuentra estructuras mineralizadas, de las cuales las más importantes que presentan mineralización de oro son: Santa Filomena, San Luis, Cháparra, Relave y la española (Arcos y Calderón, 2017). Las Franjas Metalogenéticas de interés se describen a continuación:

#### - **V. Franja de depósitos de Cu-Fe-Au (IOCG) del Jurásico medio–superior**

Los depósitos IOCG constituyen un amplio e impreciso grupo de estilos de mineralización, los cuales se definen principalmente por sus elevados contenidos en magnetita y/o hematitas hidrotermales, acompañados normalmente por calcopirita ± bornita (Sillitoe, 2003). Contienen además cantidades apreciables de Zn, Pb, Ag, Ba, F,

U, tierras raras (TT.RR.) y otros (Sillitoe, 2003; Hunt, 2005; Williams et al., 2005). En términos generales, los óxidos de hierro son reemplazados por sulfuros, principalmente pirita y calcopirita (Lobo y Guerrero, 2006). Por otro lado, los depósitos IOCG Se sitúan a lo largo de la zona costera, en el dominio del Complejo Basal de la Costa del Precámbrico. Su principal control estructural es el sistema de fallas NO-SE Ica-Islay-Ilo, que constituyen el corredor del mismo nombre (Acosta et al., 2008). Los depósitos más importantes de esta franja son Marcona, Mina Justa y Rosa María, con edades de mineralización entre 165 y 160 Ma.

- **IX. Franja de depósitos de Au-Pb-Zn-Cu relacionadas con intrusivos de Cretácico superior**

Se extiende discontinuamente en cuatro áreas: Huarmey (9°30'-10°), Canta (11°-11°30'), sector de Huancavelica - Ayacucho (14°-15°) y Sarmamarca-Nazca-Ocoña (14°30'-17°). Las estructuras mineralizadas llevan cuarzo-oro-sulfuros y se encuentran hospedadas en granitoides del Cretácico superior del Batolito de la Costa. El depósito que destaca en Huarmey es Cerro Ballena y en Canta los depósitos Lomada, Caracol y Lajas. En el sector Huancavelica - Ayacucho las vetas están controladas por el sistema de fallas Cincha-Lluta y se encuentran los depósitos El Encanto, Zorro Plateado, Jatun Pata, Melchorita, entre otros. En Sarmamarca-Nazca-Ocoña, las estructuras mineralizadas están controladas por fallas con orientaciones NO-SE, N-S y E-O, que constituyen el corredor Nazca-Ocoña (Acosta et al. 2014).

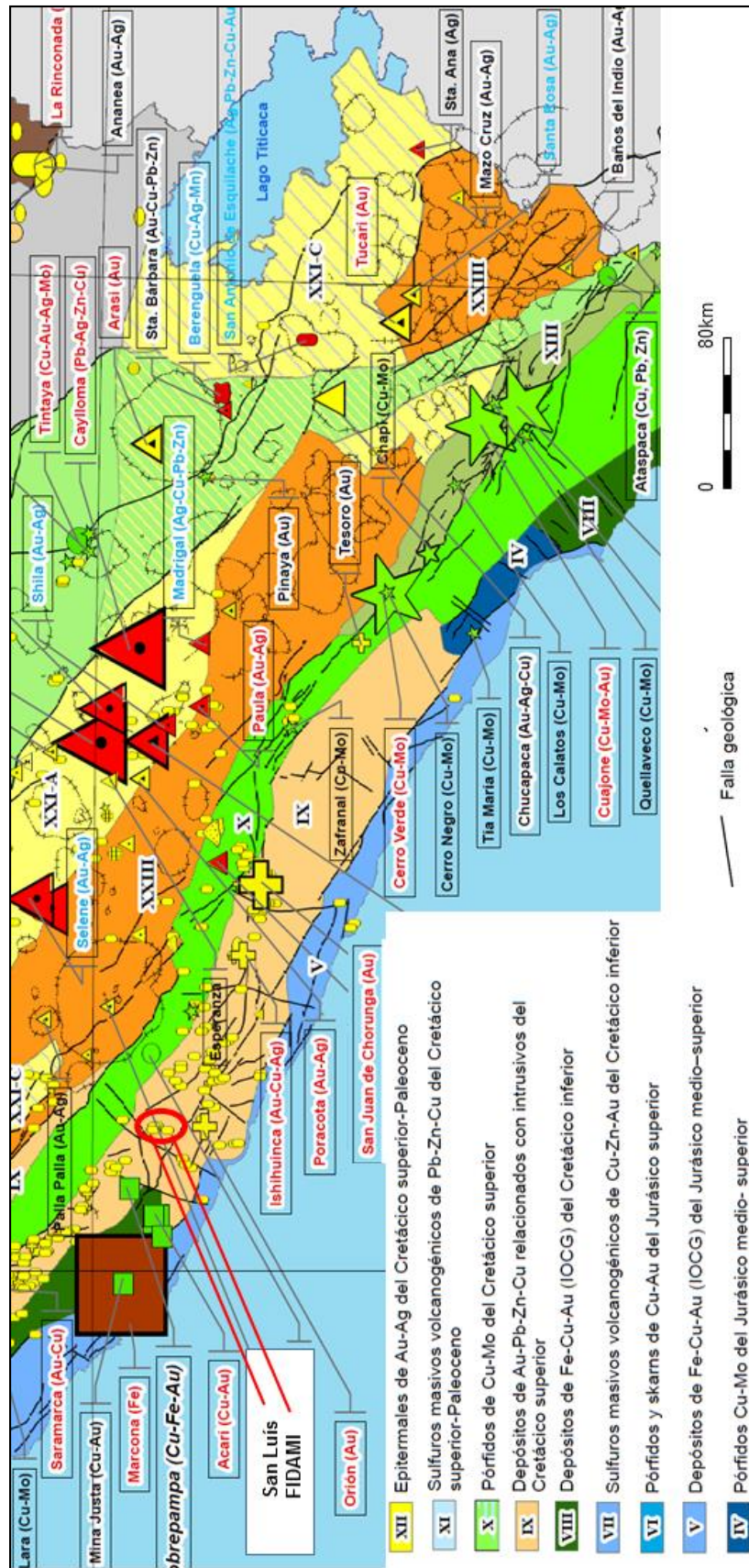


Figura 10. Mapa metalogénico del área de estudio elaborado por INGEMMET (Acosta et al., 2014), con la ubicación de los yacimientos principales.



## Capítulo 5 Minería en la Zona Sur-Medio de Perú

### 4.1. Minería artesanal en el Sur medio del Perú

La minería artesanal en el Perú, dedicada casi por completo a la explotación de oro, se desarrolla principalmente en las regiones de Madre de Dios, Puno, La Libertad, Ica, Ayacucho y Arequipa (Glave y Kuramoto, 2002). En Madre de Dios La actividad minera se realiza específicamente en yacimientos de llanura aluvial; en Puno, se combina los yacimientos filoneanos y aluviales; en el Sur Medio y la Libertad, los yacimientos son filoneanos. Entre estas dos últimas se encuentra nuestra área de estudio, dentro de la denominada Franja Nazca-Ocoña. Se conoce de la existencia de yacimientos que son explotados desde la época colonial y otros en donde existían empresas mineras grandes, pero que terminaron abandonando por problemas de rentabilidad. Actualmente, los mineros artesanales han ocupado esas labores abandonadas y vienen trabajando de manera formal, como es el caso de la mina San Luis (Figura 11), quienes han logrado la formalización gracias al apoyo de entidades externas, sin embargo, no todos los mineros que laboran en la zona están formalizados, por lo que vienen trabajando por cuenta propia y de manera informal.



**Figura 11.** Minera Aurífera San Luis (Martsal).

Está claro que la minería artesanal se ha convertido en una actividad refugio para muchas familias, quienes han formado asentamientos humanos que han evolucionado de tal forma que varios de ellos han pasado a ser reconocidos como centros poblados por parte del estado, tal es el caso de: San Luis (Figura 12), Santa Filomena y San Juan de Relave. De hecho, estos centros poblados cuentan con servicios mínimos de electricidad, educación y salud. Sin

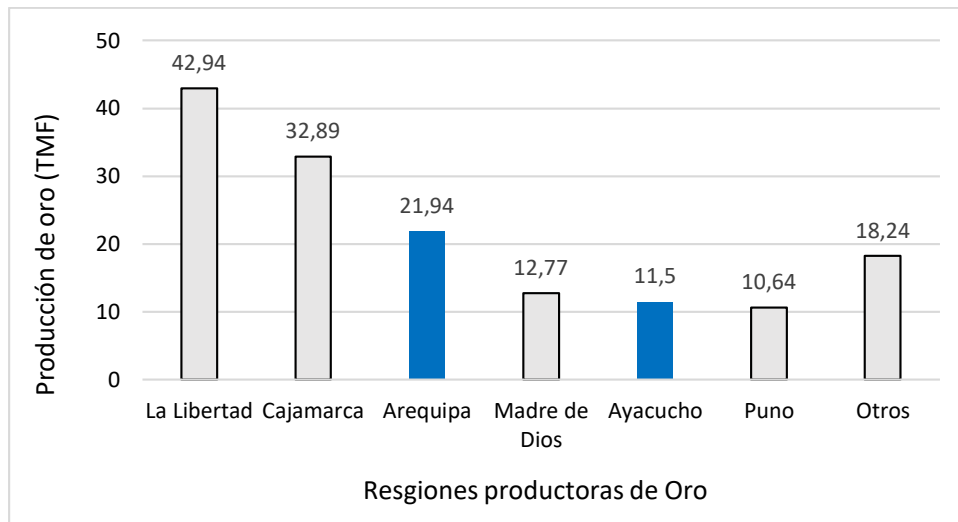
embargo, uno de los problemas que aún no se ha logrado superado es el suministro de agua, esta afirmación ha sido verificada en el poblado y en la planta de procesamiento de San Luis. El agua es abastecida por camiones desde otros lugares y naturalmente tienen un costo económico elevado para los pobladores de dichos asentamientos.



**Figura 12.** Centro poblado de San Luis.

Separando la producción nacional de oro por regiones se puede apreciar que nuestra zona de estudio se ubica entre los primeros cinco de la lista (Figura 13). Siendo la libertad quien ocupa el primer lugar (842.94 TMF), seguido de Cajamarca (32,89 TMF), Arequipa (21,94 TMF), Madre de Dios (12,77 TMF) y Ayacucho (11,50 TMF). De acuerdo a las estadísticas mensuales (ESTAMIN) del Ministerio de Energía y minas, la producción estimada de los mineros artesanales fue de 20,69 TMF tal como se muestra en la Tabla 3 (Anuario Minero, 2017), y expresado en porcentajes con respecto a la producción nacional es del 14%. En cambio, haciendo una comparación de la producción mundial del oro, 3150 TMF (USGS, 2018), y la producción de la minería artesanal también mundial, ésta última representa entre el 20 y el 30% de todo el oro extraído en el mundo (UNIDO, 2007).





**Figura 13.** Producción Nacional de oro por regiones en TMF (Anuario Minero, 2017).

La extracción artesanal del oro (ASM) es una actividad generalizada que involucra a más de 15 millones de Trabajadores (Veiga y Baker, 2004). Se estiman que en 2013 Había Alrededor de 16 millones de mineros artesanales de oro en todo el mundo (Seccatore et al. 2014). Este número aumentaría hasta 20 millones en 2017, lo que representaría el 50% del número total de mineros artesanales y de pequeña escala (IGF, 2017).

#### 4.2. Proceso productivo minero artesanal

El proceso de explotación minera en el área de estudio es realizado en labores subterráneas mayoritariamente, cuya sección es de 1.2m.x2.4m aproximadamente (San Luis). El proceso productivo comprende la fase de minado y la fase de beneficio o procesamiento de minerales; en la fase de minado se emplean desde barrenos, combas, cinceles hasta perforadoras neumáticas (Figura 14). Una vez que el mineral ha sido fragmentado por medio de disparos con explosivos, generalmente empleando la dinamita, los fragmentos de mineral son seleccionados y recogidos en costales o bolsas de polietileno, para luego ser enviadas al área de procesamiento de la mina, mientras que por el contrario que los fragmentos no seleccionados son destinados al desmonte o botadero.



**Figura 14.** Perforación de taladros con perforadora neumático tipo Jackleg- Mina San Luis.

En la segunda fase que es el beneficio, los mineros artesanales del Sur Medio del Perú emplean el método de fusión con Hg y la cianuración; La fusión con Hg era una práctica común hace algunos años, pero actualmente, en muchos asentamientos mineros, ha sido reemplazada por el método de cianuración (Alfonso et al., 2019). Tal es el caso de San Luis y San Cristóbal. La etapa del beneficio empieza con el chancado primario del mineral, de manera manual o utilizando los molinos de bolas. Luego de reducir el mineral a pequeños fragmentos pasan a los quimbaletes; molinos rudimentarios compuestos por un sumidero donde el mineral que ha sido colocado es molido por la acción del vaivén del bloque de roca tallada, el cual es impulsada por un operario, quien se ha posiciona sobre una tabla para producir ese movimiento (Figura 15), el quimbalete sirve para moler el mineral y luego para amalgamar el oro libre con mercurio líquido.



**Figura 15.** Quimbaletes en el centro poblado de San Luis.

Luego de esta fase, la pulpa es filtrada para pasar por el refogeo o quema, etapa en la que el mercurio será evaporado y el oro liberado. El mercurio liberado es condensado y recuperado por las retortas en algunos asentamientos mineros que cuentan con una. Por otro lado, el proceso de recuperación del oro mediante la fusión con el mercurio deja en el relave contenido de oro, razón por la cual el relave era comercializado anteriormente.

El proceso de recuperación del oro en San Luis es mediante lixiviación en pozas o Vat Leaching (Figura 16), el cual consiste en pasar una solución diluida de cianuro de sodio a través del mineral molido y aglomerado para permitir que el cianuro pueda hacer contacto con las partículas de oro. Es una técnica hidrometalúrgica desarrollada para la explotación de minerales de baja ley, pero que no se recomienda (su uso) en relaves que previamente pasaron por el proceso de amalgamación, ya que los relaves contaminados con mercurio nunca deben tratarse con cianuro porque esto solubilizaría el mercurio transformándolo en una forma más tóxica (Veiga et al., 2006). El proceso de cianuración es realizado en pozas impermeabilizadas que canalizan el lixiviado de cianuro de oro, seguidamente se transporta a los tanques, donde se les agrega el carbón activado y se las deja reposar durante una semana para que se produzca la reacción del carbono con el oro en solución (Alfonso et al., 2019). En el caso de San Luis el mineral molido es mezclado con el cemento y cal para llevar a cabo la cianuración, la proporción empleada es de 17kg/ton y 0.5Kg/ton respectivamente. Además, es importante que el Ph se mantenga en el rango de 11- 12 para evitar la contaminación y para asegurar una eficiente absorción del oro. Luego se las deja secar entre 24h-34h para alcanzar una dureza adecuada, seguidamente se le añade agua, empezando así el proceso de recirculación. El producto final es el carbón activado cargado del mineral valioso, el oro.



**Figura 16.** Pozas de cianuración, (a) relave, (b) San Luis.

## Capítulo 6 Materiales y Metodología de trabajo

### 5.1. Trabajo de campo

#### 5.1.1. Muestreo en Mina San Luis

Durante la etapa del reconocimiento de las labores en interior mina, el recojo de muestras se realizó en las principales vetas del yacimiento; Débora, San Luis, Miluska, Monalisa, Diagonal, Ramal y Clider. También se estimó necesario recoger muestras de la planta de procesamiento, tanto de los molinos como de la relavera actual y antigua. En la Tabla 14 se detallan las muestras obtenidas de la mina San Luis y en la Figura 17 se ilustran esos trabajos de muestreo. Las muestras que se obtuvieron de las minas tendrán un tratamiento posterior en laboratorio, motivo por el cual la codificación de las mismas fue hecha diligentemente.



**Figura 17.** Imágenes de muestreo en mina y planta de procesamiento. San Luis, (a) Ingreso a veta San Luis para muestreo, (b) toma de muestras en veta San Luis y codificación, (c) Recojo de muestras en la planta de procesamiento de Mina San Luis, (d) recojo muestras en relavera de Mina San Luis.



**Tabla 14.** Muestras de mineral recogida de mina San Luis y Planta de Procesamiento.

ITEM	CÓDIGO DE MUESTRA	VETA	NIVEL	REFERENCIA	POTENCIA DE VETA
1	SL-101	Debora	Nv-6		12 cm
2	SL-102	Debora	Nv-4		
3	SL-103, SL-103B, SL-103C	San Luis	Nv-4		12 cm
4	SL-104A	Miluska	Nv-4	Pique 515	12 cm
5	SL-104B	Miluska	Nv-4	PQ-537	
6	SL-105	Miluska	Nv-4		
7	SL-106	Monalisa	Nv-4	CH-670	12-15 cm
8	SL-107	Monalisa	Nv-4		
9	SL-108	Diagonal	Nv-4		12 cm
10	SL-109	Ramal	Nv-4		15 cm
11	SL-110	Clider	Nv-4		17 cm
12	SL-111	Debora	Nv-7		12 cm
13	PLO-5	Planta	Superficie		-
14	PLO-6	-	Superficie	Planta	-
15	PLO-7	-	Superficie	Planta	-
16	PLO-8	-	Superficie	Planta	-

### 5.1.2. Muestreo de aguas

Se tomaron tres muestras de agua en frascos blancos estériles de polietileno de 0.17 lt de capacidad, las que posteriormente se refrigeraron para su transporte al laboratorio. Los puntos de muestreo fueron cuatro; uno en el río San Luis (SP-1), dos en el río relave (SP-2, SP-3) y una en el río Majes (SP-4). La relación de muestras de agua obtenidas en los ríos mencionados se detalla en la Tabla 15 y las ilustraciones en la Figura 18.

**Tabla 15.** Relación de muestras de agua tomada en los Ríos San Luis, Río relave y Majes.

Ítem	Muestra	Localización	Referencia
1	SP-1.1		
2	SP-1.2		
3	SP-1.3	Río San Luis	Altura de puente
4	SP-1.4		
5	SP-2.1		
6	SP-2.2	Río de Relave 1	Río arriba
7	SP-2.3		
8	SP-3.1		
9	SP-3.2	Río de Relave 2	Río abajo, altura del puente
10	SP-3.3		
11	SP-4.1		
12	SP-4.2	Río Majes	Puente
13	SP-4.3		



**Figura 18.** Toma de muestras de agua en los ríos San Luis y Majes. (a) Río San Luis, (b) Río Majes.

### 5.1.3. Muestreo de cabellos

El biomarcador seleccionado para determinar el nivel de exposición de los trabajadores de la mina San Luis al mercurio es el cabello; cuya selección se basó en los 6 factores que se describen WHO (2016), ver Tabla 7. Los factores determinantes para el muestreo de cabello fueron la tecnología de la que se disponía en el momento y por supuesto la invasividad, que de otra manera la donación de las muestras no se hubiera logrado. La población seleccionada para el muestreo de cabello fueron los trabajadores de la mina San Luis, tanto los que se desempeñan en interior mina como los que lo hacen fuera de ella; tal es el caso del personal administrativo y de las mujeres responsables de cocinar para todos los trabajadores de la mina.

El procedimiento consistió en realizar un corte de un mechón de cabello muy pequeño de los donantes, exactamente de la parte posterior de la cabeza, una zona poco visible. En la Figura 19 se puede apreciar a un grupo de las primeras donantes. Posterior al muestreo de cabellos, siguió el llenado de un cuestionario con preguntas claves para una mejor interpretación de los resultados que se obtendrán por medio del análisis de los cabellos que se realizarán más adelante.



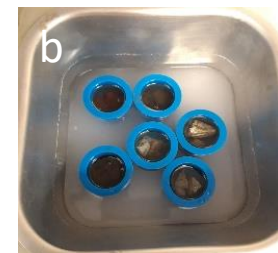
**Figura 19.** Muestras de cabellos de los trabajadores de la mina San Luis- Cocina.

## 5.2. Trabajo de laboratorio

### 5.2.1. Preparación de muestras para microscopía

Una vez que se cuenta con las muestras procedentes de mina, se procede a elegir las muestras representativas para empezar con la preparación de las probetas. La Figura 20 muestra el proceso de preparación de probetas.

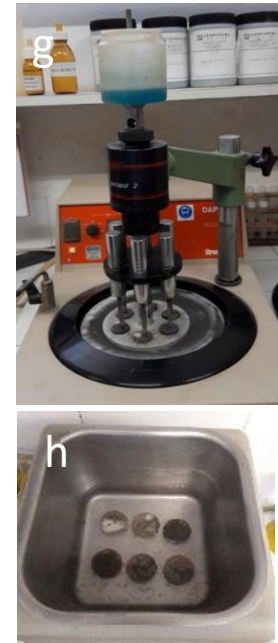
1. Para empezar se debe limpiar las muestras con agua de grifo.
2. Reducir el tamaño de las muestras a menos de 2.5cm. de diámetro. Para ello se puede usar un martillo o una sierra dependiendo del tamaño de la muestra.
3. Para el encapsulamiento, los muelles (azul) deben rociarse con una capa de teflón de manera separada, tanto la tapa como el tubo. A continuación las muestras deben colocarse en el centro seguidamente de la etiqueta de identificación. Una vez colocada las muestras, se vacía la resina hasta cubrir la muestra. Una vez cubierta se las deja +-10' en el ultrasonido.
4. La resina epóxica se prepara con 2 partes de resina por 1 de catalizador (endurecedor) en un vaso de precipitados. Ésta se debe mover hasta que quede homogéneo y transparente. Es normal un olor picante y que la mezcla se caliente.
5. Después del ultrasonido, las muestras deben ser secadas al ambiente 24hr, pasado ese tiempo se las deja en el congelador 1+-hr a fin de garantizar el retiro adecuado de los muelles. Si no está lo suficientemente endurecida se las debe dejar en el horno a 60°C hasta 72hr. El secado es óptimo cuando la resina presenta un comportamiento frágil.
6. Una vez que se han retirado los muelles, las probetas se deben cortar por la base. Seguidamente, se procede a pasarlos por el papel lija #80 manualmente con ayuda de la pulidora. El objetivo es eliminar la capa superficial de resina y mantener la probeta alineada.
7. Una vez lista para pulir, las probetas deben pasar por el papel lija #220 y por los 5 carborundo tiempos aproximados: 320



(5'), 600 (5'), 800 (5'), 1000 (10') y 1200 (10'). El tiempo depende de la dureza de las muestras. Se recomienda 5' para minerales con dureza  $\leq 7$ . Es importante limpiar las probetas con pasta de dientes y cepillo antes de pasar a un nuevo carborundo para evitar contaminar el carborundo que se está empleando.

8. Finalmente el Pulido de las probetas se realiza con pasta de diamante de 3 medidas:  $9\mu\text{m}$  (45'),  $3\mu\text{m}$  (45') y  $1\mu\text{m}$  (45'). En esta etapa, antes de encender la pulidora se debe cambiar el disco de pulido empezando por la más grande y haciendo cambios hasta la más pequeña ( $9 \rightarrow 3 \rightarrow 1$ ), seguidamente se enciende la pulidora a 200 rpm aprox. Con un goteo constante del lubricante azul a razón de 0.1 gotas/segundo. Es importante limpiar las probetas con pasta de diente y cepillo antes de cambiar de pasta de diamante.

Para muestras de dureza  $\geq 7$  se recomienda dejarlos más de 45', una vez que se ha terminado de pulir se recomienda pasarlo nuevamente por el ultrasonido +10'.



**Figura 20.** Proceso de preparación de probetas, (a) materiales, (b, h) equipo ultrasonido, (c) resina epoxica y endurecedor, (d) secado de muestras, (e, f, g) pulido.

### 5.2.2 Difracción de rayos X

Esta técnica resulta de gran utilidad para la identificación de los diferentes minerales presentes en las muestras, especialmente cuando éstos son de tamaño pequeño. Los datos se recopilaron con un difractómetro de rayos X PANanalytical X'Pert PRO MPD en los Centros Científicos y Tecnológicos de la Universidad de Barcelona (CCiT - UB). La identificación y la evaluación semicuantitativa de las fases de Rietveld se realizaron con el software X'Pert HighScore © (Versión 2.0.1, PANanalytical, Almelo, Países Bajos).

### 5.2.3. Microscopía óptica

La microscopía óptica se utilizó para determinar los minerales asociados al oro y conocer su distribución, ello ha sido posible gracias a una característica peculiar que presenta el oro y los sulfuros asociados. Y es que son opacos y no dejan pasar la luz a través de ellos. Las probetas analizadas para este trabajo fueron 45, de las cuales 25 presentan contenido de oro.



#### 5.2.4. Microscopía electrónica

La microscopía electrónica de barrido (SEM) con analizador de dispersión de energías (EDS) se utiliza para observar la mineralización en las muestras a escala muy reducida, además de obtener imágenes superficiales. El EDS permite hacer un análisis cualitativo y determinar los elementos presentes en las fases minerales, especialmente minerales difíciles de identificar en el microscopio óptico de luz transmitida o luz reflejada. Es por ello que las 25 probetas seleccionadas deben ser analizadas también en este equipo, Hitachi Tabletop Microscope TM-1000 (Microscopio de Fuerza Atómica), del Departamento de Ingeniería Minera y Recursos Naturales de la EPSEM. En este microscopio se observaron tanto probetas como mineral pulverizado procedente de los diferentes tratamientos en mina. Una de las características más importantes que debe cumplir el material a analizar es que debe estar seca.

## Capítulo 7 Resultados y discusión

### 6.1. Composición química de las aguas

La composición química de las aguas procedentes de los ríos San Luis (SP-1), Relave (SP-2, SP-3) y Majes (SP-4) se presentan en la Tabla 16. Los resultados muestran la presencia de elementos potencialmente tóxicos como V, Mn, Fe, Cu, Zn, As, Ba, Hg y Pb. Por otro lado, la Tabla 17 muestra el análisis de Hg realizados en campañas anteriores por el equipo EPSEM, las cuales complementan este trabajo. Cabe destacar que una de las características más resaltantes de gran parte de estos elementos es que tienden a bioacumularse en diferentes cultivos (Angelova et al., 2004) y son tóxicos o venenos en concentraciones incluso muy bajas. Con respecto a su incorporación a organismos vivos (animales y plantas) es posible vía alimento, agua y aire como medios de traslocación; ello depende de su movilidad en dichos medios (Lucho-Constantino et al., 2005).

**Tabla 16.** Resultado de análisis de agua de los ríos San Luis, Relave y Majes (2019), en ppb.

	Límite Inferior	Río San Luis	Río Relave 1	Río Relave 2	Río Majes
<b>PH</b>		7.9	7.3	7.4	8.1
Na	50	55765	26147	28336	18588
Mg	5	33457	21747	21785	10167
Al	5	8.5	8.5	12.5	8.5
Si	250	9971.5	12545	11991	18692.3
S	500	263057.6	90394	101478	50706
K	50	5992.7	3982	4109	3025
Ca	100	232938.7	114927	129779	53889
Ti	0.2	34.4	35.7	33.0	37.6
V	5	10.2	7.4	8.9	31.1
Mn	0.1	1.1	21.7	1.3	0.5
Fe	10	11.6	17.9	32.8	-
Co	0.1	0.5	0.5	0.7	0.2
Cu	1	18.7	17.2	22.5	14.1
Zn	5	45.5	24.5	44.3	33.6
As	5	7.4	8.6	12.6	14.9
Mo	0.1	3.0	7.1	7.7	5.8
Cd	0.5	-	-	-	-
Sb	0.1	0.2	0.6	0.5	1.7
Ba	0.1	63.7	73.2	79.2	75.2
<b>Hg</b>	<b>0.03</b>	<b>0.2</b>	<b>0.5</b>	<b>0.2</b>	<b>0.14</b>
Pb	0.1	1.3	0.5	0.5	1.1
U	0.1	20.1	11.1	16.1	1.3

**Tabla 17.** Resultados de las muestras de agua de la subcuenta Ocoña (Palacios et al., 2013).

Ítem	Hg Disuelto mg/ l	Hg Total mg/l	pH	T °C
Ñ 1	34.2	61.1	7.71	18.4
Ñ 2	20.5	27.2	7.69	17.3
Ñ 3	0.2	1.2	7.97	17.5
Ñ 4	0.5	0.9	7.3	17.7
Ñ 5	0.3	0.8	8.73	19.7
Ñ 6	0.2	0.7	7.03	18
Ñ 7	0.1	0.4	7.63	16.8
Ñ 8	0.02	0.07	8.18	21.7
Ñ 9	0.01	0.01	8.18	21.2
Ñ 10	0.01	0.01	8.34	19.6
Ñ 11	0.01	0.01	8.13	20.5

Los elementos considerados potencialmente tóxicos para salud encontrados durante el análisis de composición de las aguas son: As, Pb, Hg, Cd y el Cr. Por tanto, vale la pena hacer una comparación de los resultados obtenido de los ríos San Luis, Relave, Majes y Ocoña (Tabla 16), éste último es parte de un trabajo desarrollado en anteriores visitas de cooperación a Perú. En la Tabla 18 se muestra la comparación del contenido de elementos potencialmente tóxicos en los cuatro ríos.

**Tabla 18.** Comparación de contenido de elementos potencialmente tóxicos en los ríos del Sur Medio del Perú en función al ECA para el agua.

Parámetro (mg/L)	Estándares Nacionales de Calidad Ambiental para agua (mg/L)				Ríos sur Medio del Perú (mg/L)				
	Cat. 1	Cat. 3a	Cat. 3b	Cat. 4	San Luis	Relave 1	Relave 2	Majes	Ocoña
As	0.01	0.05	0.1	0.005	0.0074	0.0086	0.0126	0.0149	-
Pb	0.05	0.05	0.05	0.001	0.0013	0.0005	0.0005	0.0011	-
Hg	0.002	0.001	0.001	0.0001	0.0002	0.0005	0.0002	0.00014	61.1
Cd	0.003	0.005	0.01	0.004	-	-	-	-	-
Cr	0.05	0.1	1	0.05	-	-	-	-	-

En la Tabla 18 se describen tres categorías; donde la Cat. 1 es para consumo de agua poblacional y recreacional; la Cat. 3(a) para riego de vegetales; la Cat. 3(b) para bebida de animales y por último la Cat. 4 para la conservación del ambiente acuático (Ríos de la Costa y Sierra). Los valores resaltados de rojo son los que han excedido el límite máximo de concentración establecida por la ECA (2008).

Para arsénico (As), el límite máximo permisible de concentración, en la categoría 1, es de 0.01 mg/L (10µg ó 10 ppb), que de acuerdo a las mediciones realizadas, tanto el río San Luis

(SP-1) como el río relave 1 (SP-3) están dentro de los límites máximos. Sin embargo, los resultados de las muestras obtenidas de los ríos Relave 2 (SP-2) y Majes (SP-4) exceden estos límites con mediciones de 0.0126 mg/L y 0.0149 mg/L respectivamente. Por otro lado, en la Categoría 4 se puede ver que todos los ríos en estudio sobrepasan los límites máximos de concentración según la ECA.

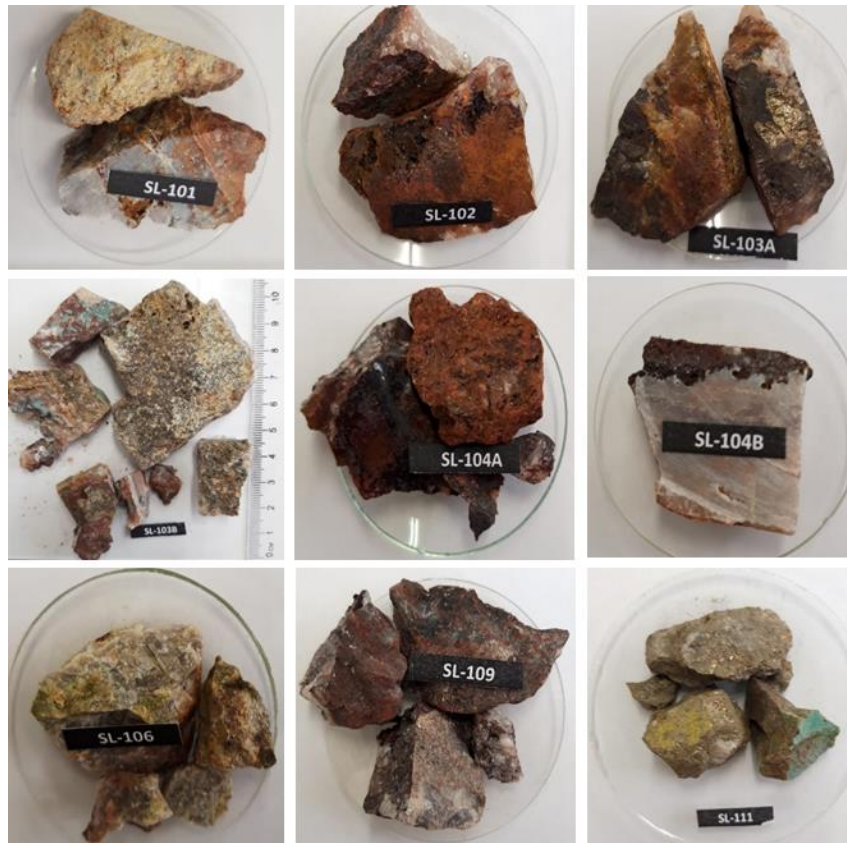
Para Plomo (Pb), el límite máximo permisible de concentración en la categoría 1 es de 0.05 mg/L (50 µg ó 50 ppb) y según las mediciones realizadas, los 4 ríos están dentro de los límites máximos permisible. Por otro lado, de acuerdo a la categoría 4, tanto el ríos San Luis como Majes exceden ligeramente los límites máximos permisibles establecidos por la ECA.

Para mercurio (Hg), el límite máximo permisible de concentración, en la categoría 1 es de 0.002 mg/L (2 µg ó 2 ppb) y según las mediciones realizadas los ríos San Luis, relave y Majes están dentro de los límites máximos permisible, pero no así con el río Ocoña que excede por mucho esos límites. Por otro lado, de acuerdo a la categoría 4, los límite máximo permisible para los ríos de la Costa y Sierra en el Perú es de 0.0001 mg/L (0.1 µg ó 0.1 ppb) y cuyos resultados de las mediciones obtenidas para el Hg arrojaron valores que superan los límites máximos permisibles de concentración en los cuatro ríos. Finalmente, no se detectó la presencia de los elementos como el Cd y Cr en las muestras procedentes de los ríos San Luis, Relaves y Majes.

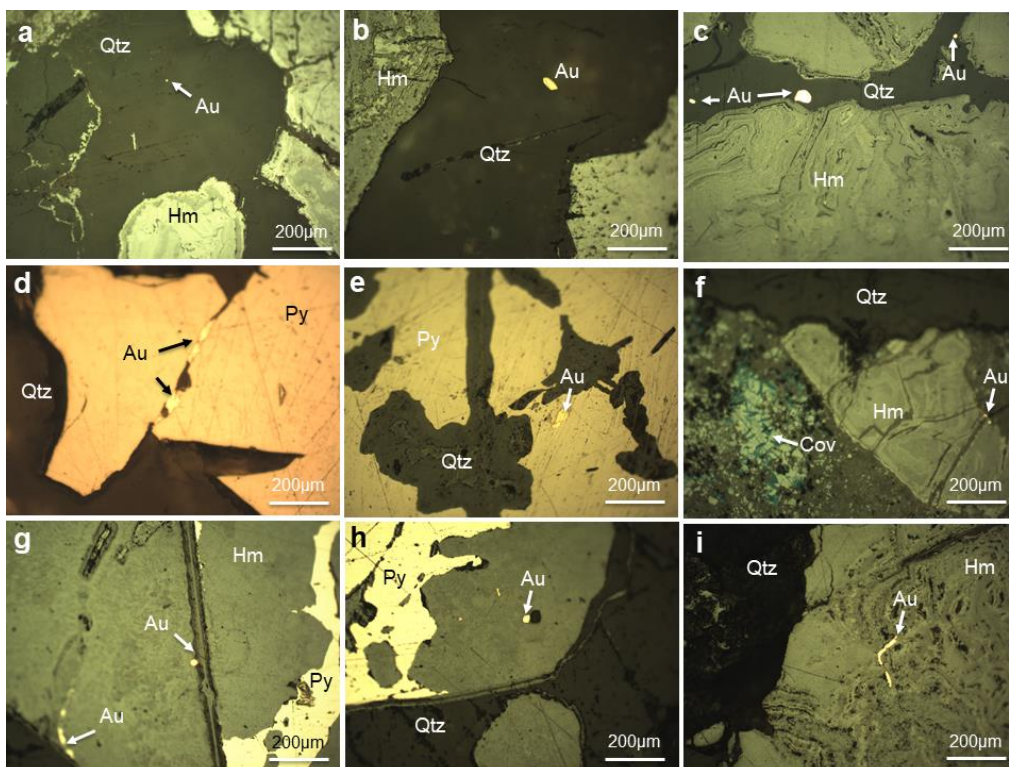
## 6.2. Mineralogía del yacimiento de San Luis

Los minerales más abundantes en las vetas explotadas son el cuarzo y hematites, encontrándose los sulfuros únicamente en zonas muy localizadas (Figura 21).

En general las vetas contienen elevadas proporciones de hematites. Los contenidos en sulfuros son no muy elevados excepto en el nivel 7 de la mina en donde aparece pirita masiva. Los sulfuros son principalmente pirita y sulfuros de cobre, como la calcopirita y, principalmente, la covellita; esto es especialmente abundante en la veta san Luís (Figura 22f). El oro aparece encapsulado tanto en los óxidos de Fe como en el cuarzo. El la Pirita aparece encapsulado y como relleno de vetas, principalmente en la veta san Luis (Figura 22d,e). En las vetas Miluska, monalisa y Débora la pirita es más pobre, hallándose el oro en los otros dos minerales descritos (Figura 22). En la zona de pirita masiva del nivel 7 de Débora el oro no ha sido hallado en el interior de este mineral.

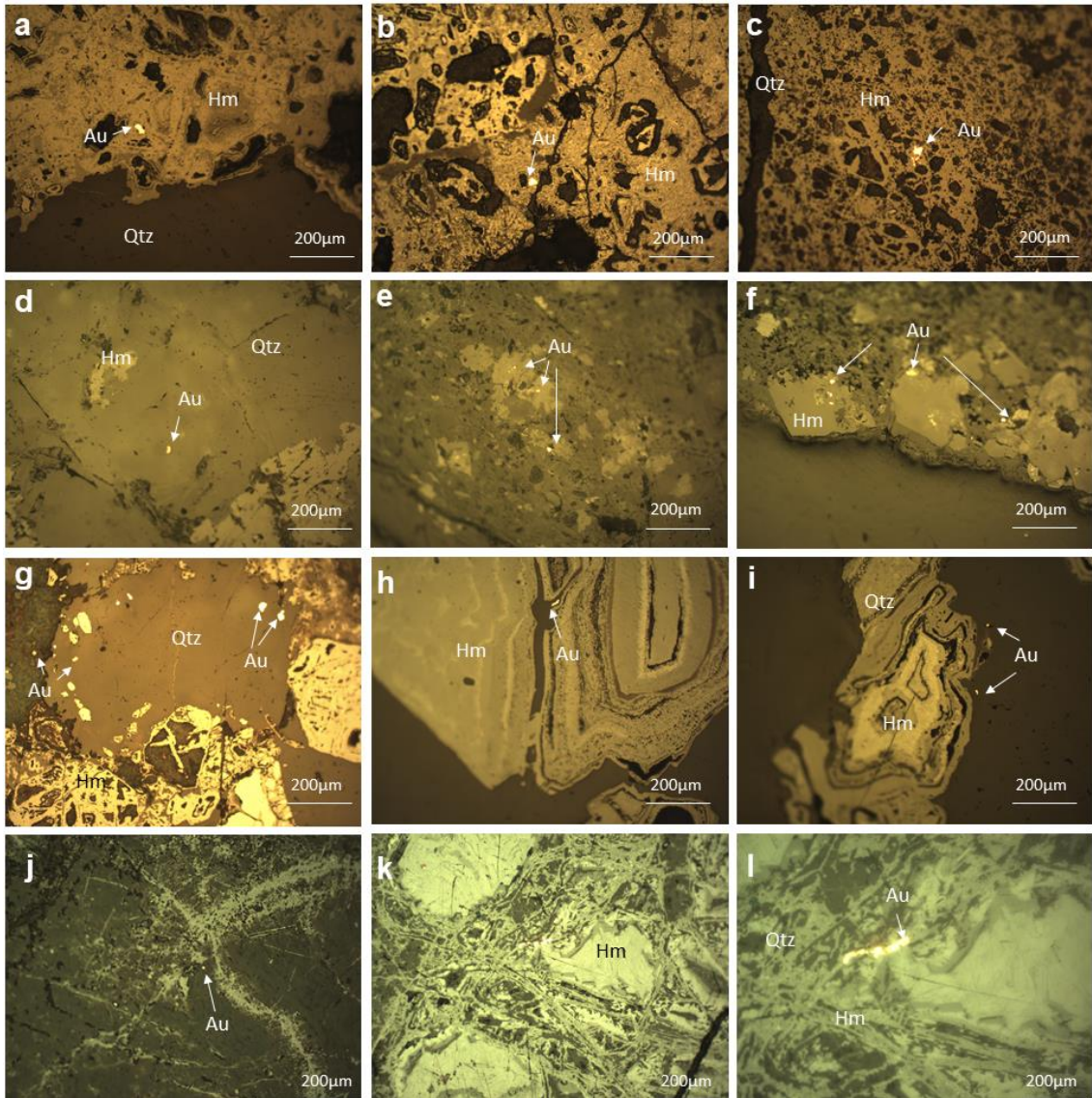


**Figura 21.** Muestras representativas de las vetas presentes en la mina de San Luis.



**Figura 22.** Imágenes al microscopio petrográfico de la ocurrencia del oro en el nivel 4 de la veta San Luis. Qtz, cuarzo; Hm, hematites; Py, piritita; Cov, covellita.

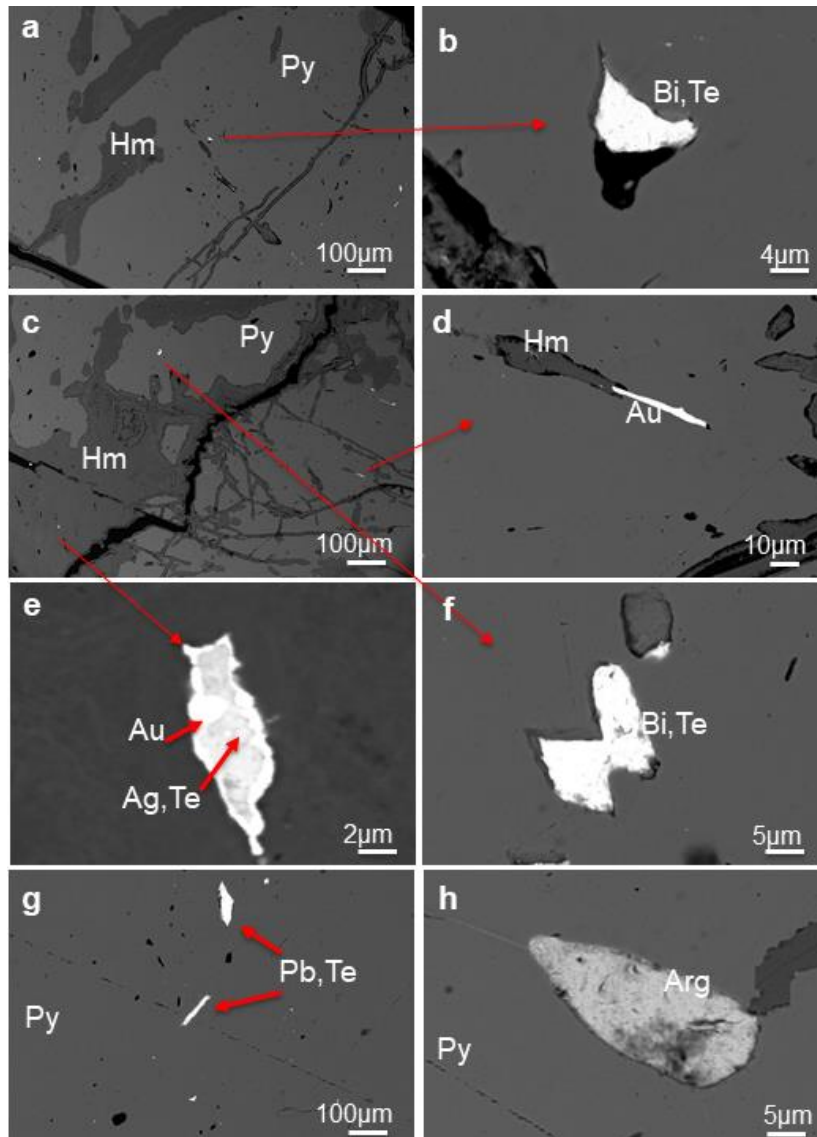




**Figura 23.** Imágenes al microscopio petrográfico de la ocurrencia del oro en diferentes vetas de la mina San Luis. a-c, veta Miluska, nivel 4; d-f, veta Monalisa, nivel 4; g-i, veta Débora, nivel 6; j-l, veta Débora, nivel 7.

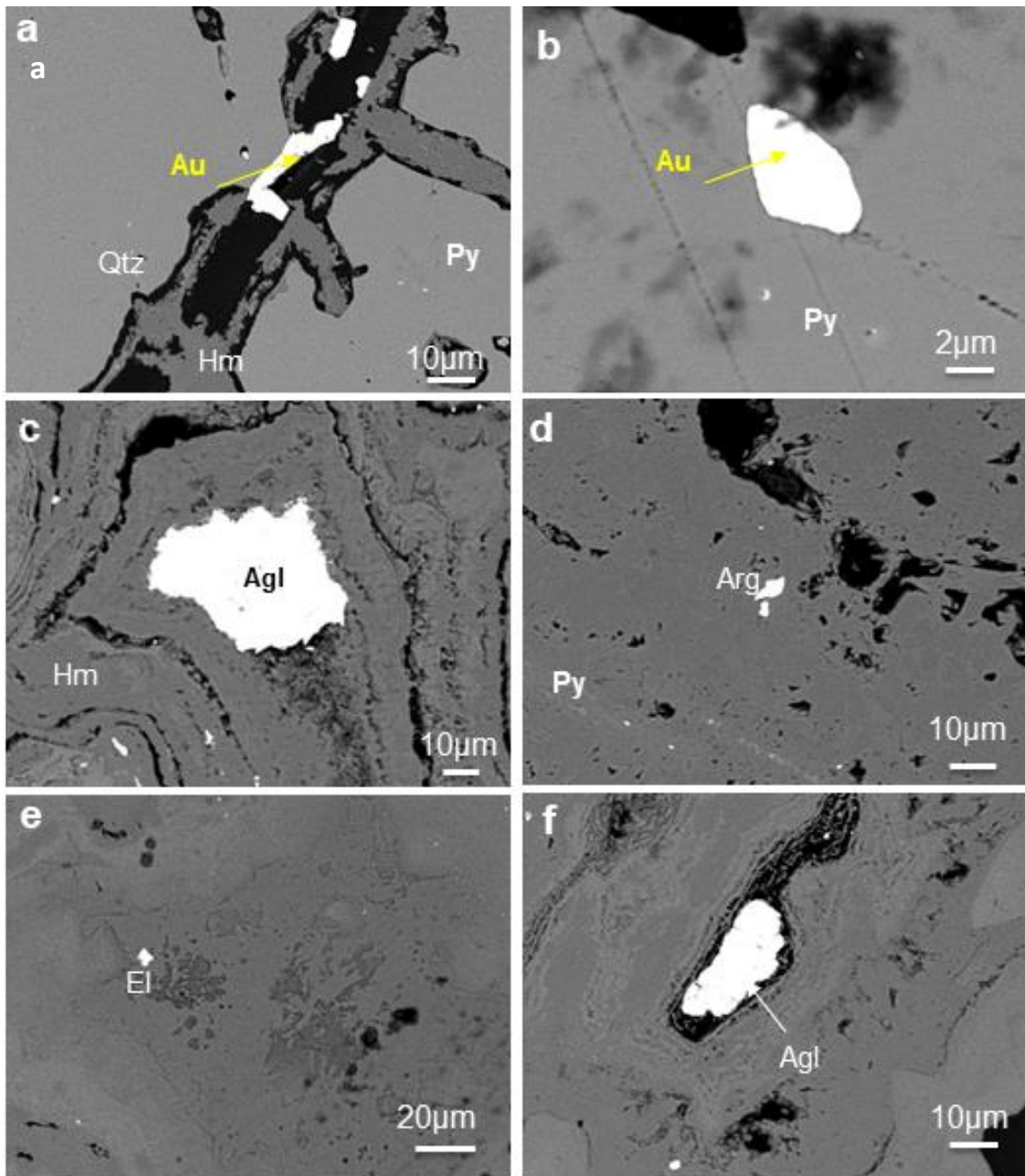
Al SEM se ha podido determinar que el oro en la mina de San Luis se encuentra como granos de oro nativo, muy pobres en plata, telururos y en menor medida como electrum. Por otro lado, La asociación más común del telurio con el oro es la calaverita ( $\text{AuTe}_2$ ), sin embargo el oro y el telurio de San Luis también se encuentran en otros minerales, como telururos de Au-Ag, la silvanita ( $(\text{Ag}, \text{Au})_2\text{Te}_4$ ) y Petzita ( $\text{Ag}_3\text{AuTe}_2$ ), Telururos de Bi y Ag; tales como la kawazulita ( $\text{Bi}_2(\text{Te}, \text{Se}, \text{S})_3$ ) y hessita ( $\text{Ag}_2\text{Te}$ ) (Tabla 19). También se pudo observar gran presencia de plata acompañada con yodo llenando espacios en minerales de piritas. Respecto al electrum, se presenta en menor cantidad y tamaño. En las Figuras 24 y 25 se muestran imágenes

del SEM de la mineralización de la veta San Luis, evidenciando la presencia de oro nativo, telururos y Electrum.



**Figura 24.** Imágenes de mineralización de la veta San Luis, a, vista general donde se observa la interrelación de la pirita y la hematites, con diversos granos brillantes; b, detalle de un telururo de Bi; c, vista general de un área rica en minerales de Au y Te; d, detalle de oro nativo formado en alineación con un desarrollo de hematites al interior de pirita; e, grano que presenta una corona de oro que bordea a un telururo de plata encapsulado en hematites; f, cristal de BiTe en pirita; g, telururo de Pb en pirita; h, argentita (Arg) encapsulada en pirita.

En las otras vetas se ha observado principalmente oro nativo y electrum, siendo muy escasos los telururos. Estos fueron localizados en asociación con hematites.



**Figura 25.** Imágenes de mineralización de la veta San Luis. a, oro nativo encapsulado en una fractura rellena por cuarzo en la parte interna y por hematites en los bordes; b, oro nativo encapsulado en pirita; c, yoduro de plata; d, grano de argentita en pirita; e, electrum encapsulado en pirita; f, ioduro de plata relleno una cavidad en hematites.



**Tabla 19.** Mineralogía de las muestras de Mina tras el análisis con microscopía óptica de luz reflejada y SEM.

Veta	Muestra	Nivel	Menas	Ganga
San Luis	SL-103	4	Au nativo	Qtz
			Silvanita (AgAuTe <sub>4</sub> )	Py
			Petzita (Ag <sub>3</sub> AuTe <sub>2</sub> )	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
			Yoduro de plata (Agl)	
			Acantita (Ag <sub>2</sub> S)	
			Calaverita (AuTe <sub>2</sub> )	
			(Au,Ag)Te <sub>2</sub>	
			Fischesserita (Ag <sub>3</sub> AuSe <sub>3</sub> )	
			Covellita (CuS)	
Debora	SL-101A	6	Au nativo	Qtz
	SL-111A	7		Py
	SL-111B	7		Hm
Miluska	SL-105A	4	Au nativo	Hm
	SL-105B			
	SL-105C			

### 6.3. Análisis mineralógico de los relaves

Los relaves analizados mediante DRX muestran que los minerales mayoritarios son el cuarzo. Clinocloro, illita y menores contenidos de hematites y calcita. Esta composición resulta adecuada para evitar la generación de drenaje ácido de mina, ya que el cuarzo es inerte y los restantes minerales son neutralizantes

El microscopio óptico y el SEM muestran pequeñas cantidades de oro en los relaves procedentes de cuando en San Luis se utilizaba el método de amalgamación para recuperar el oro. Sin embargo, en los relaves recientes no se han encontrado restos de oro. Esto concuerda con los resultados analíticos realizados previamente con estos relaves (Alfonso et al., 2019; Tabla 20).

Estos resultados demuestran que, si bien la técnica de amalgamación resulta la mejor opción desde el punto de vista económico para los mineros artesanales, la recuperación del oro no es eficiente. Además ahora el precio del mercurio se ha incrementado exponencialmente con lo que el método ya no resulta barato.

Con el método de la amalgamación aunque los mineros artesanales trabajen intensamente en la recuperación del oro no lograron recuperar todo el mineral valioso. Por otro lado, el uso del mercurio en la etapa de recuperación del oro muchas veces es realizado de manera indiscriminada por personas que no cuentan capacitación al respecto, constituyendo el

principal problema ambiental en la zona de estudio. En la actualidad, algunas minas como San Luis han optado por el proceso de cianuración para recuperar el mineral valiosos, técnica que resulta atractiva por ser muy eficiente en la recuperación de minerales de baja ley (Logsdos et al, 2001).

**Tabla 20.** Mineralogía de las muestras de Planta tras el análisis con microscopía óptica de luz reflejada y SEM.

Muestra	Zona	Mena	Ganga
PLO-6A	Relavera antigua	Oro nativo [Au]	Qtz
PLO-6B	Relavera antigua	Oro nativo [Au]	Qtz
PLO-8	Relavera antigua	Oro nativo [Au]	Qtz

#### 6.4. Análisis de cabellos humanos en el Sur-medio del Perú

Se ha hablado mucho sobre los marcadores biológicos para determinar el nivel de exposición al Hg; de los cuales el cabello es el más popular. Según algunos autores como WHO (2016), el nivel normal de mercurio en el cabello es de 1-2 ppm (o 1-2  $\mu\text{g/g}$ ), y para personas que consumen pescado 1 o más veces al día es de 10 ppm (o 10  $\mu\text{g/g}$ ). Por otra parte, es importante contar también con información adicional para hacer una mejor interpretación del análisis de las muestras de cabello, el cual se ha llamado variable (Ver Tabla 21). El muestreo de cabellos que se hizo en San Luis se detalla en la Tabla 21, por otro lado la Tabla 22 detalla el contenido en mercurio en las muestras de cabellos humanos recogido en visitas de cooperaciones anteriores a Perú.

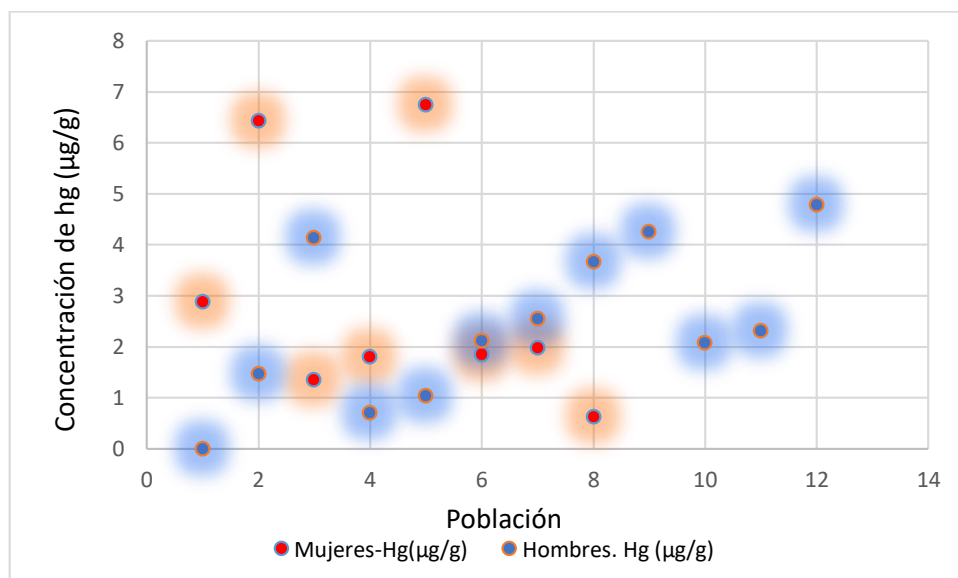
**Tabla 21.** Variables de muestreo de cabellos en San Luis.

Muestra	Concen. Hg ( $\mu\text{g/g}$ )	Edad	Sexo	Amalgama	Consumo de pescado	Fuma/ toma
1	N.D.	44	F	No	2 vec./mes	No
2	N.D.	42	F	No	2 vec./mes	No
3	N.D.	45	M	No	1 ves/sem	No
4	N.D.	25	F	No	1 ves/sem	No
5	N.D.	24	F	No	No.	No
6	N.D.	70	M	Sí	2 vec.mes	No
7	N.D.	25	M	Sí	2 vec./mes	No
8	N.D.	31	M	No	2 vec./mes	No
9	N.D.	22	M	No	1 ves/sem	No
10	N.D.	39	M	Si	2 vec./sem	No
11	N.D.	50	M	Sí	1 ves/sem	No
12	N.D.	32	M	Si	1 ves/sem	No

**Taula 22.** Resultado de la concentración de Hg en el cabello e información de variables (Palacios et al., 2013).

Muestra	Concen. Hg ( $\mu\text{g/g}$ )	Edad	Sexo	Ocupación	Amalgama	Consumo de pescado
C-1	-	25	M	Quimbaletero	no	1 vez/mes
C-2	3.66	24	M	Quimbaletero	no	no
C-3	4.24	50	M	Quimbaletero	no	1 vez/día
C-4	2.08	17	M	Quimbaletero	no	1 vez/mes
C-5	2.31	19	M	Quimbaletero	no	1 vez/mes
C-6	1.85	33	F	Vendedor Hg	no	1 vez/sem
C-7	4.78	27	M	Quimbaletero	casa	3 veces/mes
C-8	1.97	37	F	Vend/Quimb	no	2 veces/sem
C-9	0.62	44	F	Cocinera	no	3 vec./mes
C-10	2.88	38	F	Quimbaletera	Quimbalete	3 veces/mes
C-11	1.47	4	M	Estudiante	no	4 veces/mes
C-12	6.43	28	F	Quimbaletera	no	4 veces/mes
C-13	1.35	24	F	Vend/Quimb	casa	no
C-14	4.14	63	M	Quimbaletero	no	4 veces/mes
C-15	0.71	0,6	M	Bebe	no	no
C-16	1.80	4	F	Estudiante	no	4 veces/mes
C-17	1.04	39	M	Cocinero	no	4 veces/mes
C-18	2.12	6	M	Estudiante	no	4 veces/mes
C-19	2.54	10	M	Estudiante	no	4 veces/mes
C-20	6.75	40	F	Quimbaletera	no	no

De la Tabla 22 se desprende la Figura 26, donde se puede apreciar claramente que la concentración de Hg es mayor en las muestras de cabello obtenido de las mujeres.



**Figura 26.** Concentración de Hg en cabello, Misky.

Otros estudios en cabellos en el medio-sur de Perú también muestran altos niveles de exposición en las zonas en donde todavía se utiliza el mercurio, (ej. Villanueva-Ponce et al., 2015).

## 7. Conclusión y recomendaciones

- La ocurrencia del oro en el yacimiento de la mina San Luis es principalmente como granos de oro nativo y, en menor proporción, como electrum y telururos de oro.
- Los Telururos son de oro y también de plata, plomo y bismuto. Se encuentran mayoritariamente en la veta San Luís, comúnmente asociados a pirita.
- En las vetas restantes estudiadas (Débora, Monalisa y Miluska) no aparecen los telururos y el oro se halla siempre asociado a hematites o encapsulado en cuarzo. se presentan encapsuladas en vetas de cuarzo y piritas mayoritariamente, y en menor medida en óxidos de hierro.
- Los sulfuros no son muy abundantes, excepto en la veta Débora en profundidad (nivel 7), donde se encuentra de forma masiva; no obstante, esta pirita no contiene oro.
- Se recomienda el beneficio de la veta San Luis de manera separada, debido a las caracterizas peculiares de la misma.
- En las aguas de los ríos San Luis, Relave, Majes y Ocoña se han detectado elementos potencialmente tóxicos en concentraciones importantes, entre ellos el Hg; cuyas mediciones exceden 30 mil veces el límite máximo permisible de concentración en las categorías de población (agua para producción de agua potable), 60 mil veces más en la categoría de riego y consumo de animales, y 600 mil veces más en la categoría de conservación del ambiente acuático (ríos de la Costa y Sierra).
- Por otro lado, las concentraciones de As y Pb en los ríos de estudio están por debajo de los límites máximos establecidos por la ECA en la categoría población, sin embargo, con respecto a la categoría de conservación del ambiente acuático (para ríos de la costa y sierra) las concentraciones de estos elementos potencialmente tóxicos duplican el límite máximo permisible.
- Se ha identificado la presencia del oro en las muestras procedentes de la relavera antigua de San Luis. Concluyendo así que dicha técnica, de amalgamación, anterior al método de cianuración aplicado hoy en día, no era efectiva.

## Bibliografía

- Abe, T., Ohtsuka, R., Hongo, T., Suzuki, T., Tohyama, C., Nakano, A., Akimichi, T. (1995). High hair and urinary mercury levels of fish eaters in the nonpolluted environment of Papua New Guinea. *Archives of Environmental Health: An International Journal*, 50(5), 367-373.
- Abollino, O., Aceto, M., Malandrino, M., Mentaste, E., Sarzanini, C., Barberis, R. (2002). Distribution and Mobility of Metals in Contaminated Sites. *Chemometric Investigation of Pollutant Profiles. Environmental Pollution*, 119, 177.
- Acosta, J., Quispe, J., Rivera, R., Valencia, M., Chirif, H., Huanacuni, D., Santisteban, A. (2010). Mapa Metalogenético del Oro en el Perú.
- Adriano D. C. (1986). Trace elements in the terrestrial environment. Springer-Verlag. 298 - 324. New York (USA).
- Adriano, D. C. (2013). Trace elements in the terrestrial environment. Springer Science & Business Media.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR) (1999). Toxicological Profile for Mercury. US Department of Health and Human Services, Public Health Service, ATSDR. Atlanta, GA. Disponible en: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp46.html>. Consultado el 10/09/2019.
- Alfonso, P., Anticoi, H., Yubero, T., Bascompta, M., Henao, L., Garcia-Valles, M., Yáñez, J. (2019). The Importance of Mineralogical Knowledge in the Sustainability of Artisanal Gold Mining: A Mid-South Peru Case. *Minerals*, 9(6), 345.
- Angelova V., Ivanova, R., Delibaltova, V., Ivanov, K. (2004). Bio-accumulation and distribution of heavy metals in fibre crops (flax, cotton and hemp). *Industrial Crops and Products*, 19. 197–205.
- Anthony Persaud, Kevin Telmer (2014). Mercury Watch Portal: Charting the Improvement of Artisanal and Small-Scale Gold Mining, Artisanal Gold Council. Disponible en: [https://www.idrc.ca/sites/default/files/sp/Documents%20EN/IDRC\\_AGC\\_Final\\_Technical\\_Report.pdf](https://www.idrc.ca/sites/default/files/sp/Documents%20EN/IDRC_AGC_Final_Technical_Report.pdf). Consultado el 10/09/2019.
- Anuario Minero (2017). Disponible en: [https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/98805/ANUARIO\\_MINERO\\_2017\\_1\\_.pdf](https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/98805/ANUARIO_MINERO_2017_1_.pdf). Consultado el 01/09/2019.
- Arah, I. K. (2015). The impact of small-scale gold mining on mining communities in Ghana. In African Studies Association of Australasia and the Pacific (AFSAAP) 37th Annual Conference–Dunedin–New Zealand–25-26 November 2014 Conference Proceedings (published January 2015).
- Arcos Alarcón, F., Calderón Cossio, C. A. (2017). Asistencia técnica a los mineros artesanales entre Palpa y Cháparra [Boletín E 10].
- Awange, J. (2018). Environmental pollution. *Environmental Science and Engineering (Subseries: Environmental Science)*, 9783319584171, 387-401.
- Baer, J. D., Baumgartner, W. A., Hill, V. A., Bland, W. H. (1991). Hair analysis for the detection of drug use in pretrial, probation, and parole populations. *Fed. Probation*, 55, 3.
- PNUMA (2017). El Convenio de Minamata sobre el Mercurio y su implementación en la región de América Latina y el Caribe. Disponible en

- [http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/folleto\\_Minamata\\_LAC\\_ES\\_FINAL.pdf](http://www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/publications/folleto_Minamata_LAC_ES_FINAL.pdf). Consultado el 10/09/2019.
- Bencko, V. (1995). Use of human hair as a biomarker in the assessment of exposure to pollutants in occupational and environmental settings. *Toxicology*, 101(1-2), 29-39.
- Blesa M.A. (2010). La contaminación del agua por metales. *Ciencia e Investigación* 60(4), 30-48
- Blesa, M. A., Castro, G. D. (2015). *Historia Natural y Cultural del Mercurio*. Libro electrónico. Editorial AAPC (en preparación).
- Carnegie Amazon Mercury Ecosystem project. (2012). Disponible en: <http://dge.stanford.edu/research/CAMEP/Design.html>. Consultado el 20/08/2019.
- Chemicals, UNEP (2014). *Assessment Report-Excess Mercury Supply in Latin America and the Caribbean, desde 2010 hasta 2050*.
- Clarkson T.W., Magos L. (2006). The Toxicology of Mercury and Its Chemical Compounds. *Critical Reviews in Toxicology* (36) 609-662.
- Cobbing, E.J. (1982). The segmented coastal Batholith of Peru: Its relationship to volcanicity and metallogenesis. *Earth Sci.* (18) 241-251.
- Cobbing, E.J., Pitcher, W.S., Taylor, W.P. (1977). Segments and Super-Units in the Coastal Batholith of Peru. *The Journal of Geology* 85 (5), 625-631.
- Cotton F.A., Wilkinson G. (1966). *Advanced Inorganic Chemistry*. Interscience Publishers.
- DOCUMENTO DE ORIENTACIÓN (2017). *Elaboración de un plan de acción nacional para reducir y, cuando sea posible, eliminar el uso del mercurio en la extracción de oro artesanal y en pequeña escala*.
- Echegaray, R. Gomez, M. (1984). Determinación de mercurio en cabello como expresión de la exposición a mercurio, *Bol. Lima*, 6(31),92.
- Eisler, R. (1991). Cyanide Hazards to Fish, Wildlife and Invertebrates: A Synoptic Review, Peligros del cianuro para los peces, la vida silvestre y los invertebrados: Una revisión sinóptica. U.S. Fish and Wildlife Service Biological Reports, Servicio de Pesca y Vida Silvestre de los Estados Unidos, *Informes Biológicos*. 85(1.23).
- ESTAMIM, consultado en: <http://extranet.minem.gob.pe/>. Consultado el 10/08/2019.
- Gaona Martínez, J. (2004). *El mercurio como contaminante global Desarrollo de metodologías para su determinación en suelos contaminados y estrategias para la reducción de su liberación al medio ambiente*. Tesis de la Universidad Autónoma de Barcelona. Dpto. Química.Unidad Química Analítica.
- García, I., Dorronsoro, C. (2005). *Contaminación por Metales Pesados*. En *Tecnología de Suelos*. Universidad de Granada. Departamento de Edafología y Química Agrícola. Disponible en: <http://edafologia.ugr.es>. Consultado el 10/08/2019.
- Gill, US, Schwartz, H.M. and Bigras, L. (2002). Results of multiyear international interlaboratory comparison program for mercury in human hair. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*. 43 (4). 466-472.
- Glave, M., & Kuramoto, J. (2002). *Minería, minerales y desarrollo sustentable en Perú*. International Institute for Environment and development, *minería, minerales y desarrollo sustentable en américa del sur*.
- Gurrero, J. (2005). Cianuro: Toxicidad y destrucción biológica. *El Ingeniero de minas*, 10, 22-25.
- Hać, E., Krechniak, J. (1993). Mercury concentrations in hair exposed in vitro to mercury vapor. *Biological trace element research* 39(2-3), 109-115.

- Harada, M. (1995). Minamata disease: methylmercury poisoning in Japan caused by environmental pollution. *Critical Reviews in Toxicology* 25, 1-24. 154.
- Hilson, G. (2002). Promoting sustainable development in Ghanaian small-scale gold mining operations. *Environmentalist*, 22(1), 51-57.
- Hilson, G., Van der Vorst, R. (2002). Technology, Managerial, and Policy Initiatives for Improving Environmental Performance in Small-Scale Gold Mining Industry. *Environmental Management* 30, 764-777.
- Hinton, J.J., Veiga, M.M., Veiga, A.T.C. (2003). Clean artisanal gold mining: a utopian approach? *Journal of Cleaner Production* 11:99–115
- Hoedoafia, M. A., Cheabu, B. S. N., Korang, V. (2014). The effects of small scale gold mining on living conditions: A case study of the west gonja district of Ghana. *International Journal of Social Science Research*, 2(1), 151-164.
- Hunt, J.P. (2005). Geological Characteristics of Iron Oxide-Copper-Gold (IOCG) Type Mineralisation in the Western Bushveld Complex. Master Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg, South Africa
- IGF (Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development) (2017). Global Trends in Artisanal and Small-Scale Mining (ASM): A Review of Key Numbers and Issues; the International Institute for Sustainable Development: Winnipeg, MB, Canada.
- Iglesias León, S. Gonzales Torres, M.A. (2001). Gestión ambiental de las actividades artesanales de la minería aurífera, caso poblado Relave. *Rev. Inst. investig. Fac. minas metal cienc. geogr*, (5)54-59.
- INEI (2017). Recuperado de la página: <http://censo2017.inei.gob.pe/>
- Instituto Peruano de Economía (IPE) (2017). Disponible en: <https://www.ipe.org.pe/portal/ipe/>. Consultado el 19/06/2019.
- International Programme on Chemical Safety (IPCS) (1990). Environmental Health Criteria 101, Methylmercury .World Health Organization, Geneva. Disponible en: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc101.htm>. Consultado el 20/08/2019.
- International Programme on Chemical Safety (IPCS) (2000). Environmental Health Criteria 214, Human Exposure Assessment. World Health Organization, Geneva. Disponible en: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc214.htm>. Consultado el 10/06/2019.
- Kabata-Pendias, A. (2000). Trace elements in soils and plants. Third Edition. CRC Press, Inc. Boca Raton. USA. pp. 365, 413.
- Kelly, K. S., & Rogers, R. (1996). Detection of misreported drug use in forensic populations: an overview of hair analysis. *Journal of the American Academy of Psychiatry and the Law Online*, 24(1), 85-94.
- Kempson, I. M., Lombi, E. (2011). Hair analysis as a biomonitor for toxicology, disease and health status. *Chemical Society Reviews*, 40(7), 3915-3940.
- Kempson, I. M., Skinner, W. M., & Kirkbride, K. P. (2007). The occurrence and incorporation of copper and zinc in hair and their potential role as bioindicators: a review. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part B*, 10(8), 611-622.
- Kim, K.H., Browns, R.J.C., Kwon, E., Kim, I.S., Sohn, J.R. (2016). Atmospheric mercury at an urban station in Korea across three decades. *Atmos. Environ.* 131, 124-132.
- Kuramoto, J.R. (2001). La minería artesanal e informal en el Perú, Lima: Grupo de Análisis para el Desarrollo (GRADE).

- Lacerda, L.D. (1997). Global mercury emissions from gold and silver mining. *Water, Air y Soil Pollution*, 209-221.
- Lázaro, H. (1995). Estudio de la minería aurífera informal y medio ambiente en la zona de La Libertad. mimeo, Lima, IDESI.
- Lázaro, H., Trillo, A., Sánchez, P. (1995). Estudio de la minería aurífera informal y medio ambiente en la zona de Puno. *Mundo minero*, Lima, Ministerio de Energía y Minas e IDESI.
- Loaiza, C. E., Zárate, H., Galloso, A. (2008). Mineralización y explotación minera artesanal en la costa sur media del Perú. *INGEMMET. Boletín, Serie E: Minería* (4) 79.
- Lobo, F., Costa, M., Novo, E., Telmer, K. (2016). Distribution of artisanal and small-scale gold mining in the Tapajós River Basin (Brazilian Amazon) over the past 40 years and relationship with water siltation. *Remote Sensing*, 8(7), 579.
- Lobo-Guerrero S., A. (2006). Iron Oxide-Copper-Gold Mineralization in the Greater Lufilian Arc, Africa. Logemin S.A., Bogotá, Colombia, 24 pp.
- Logsdos, M., Kagelstein, K., Mudden, T. (2001). El manejo de la cianuración en la extracción del oro. Reporte, ICME - Ottawa, pp 21-29.
- Lopez Bravo, M., Santos Luna, J., Quezada Abad, C., Segura Osorio, M., & Perez Rodriguez, J. (2016). Actividad minera y su impacto en la salud humana.
- Lucho-Constantino, C. A., Álvarez-Suárez, M., Beltrán-Hernández, R. I., Prieto-García, F., & Poggi-Varaldo, H. M. (2005). A multivariate analysis of the accumulation and fractionation of major and trace elements in agricultural soils in Hidalgo State, Mexico irrigated with raw wastewater. *Environmental International* 31(3), 313-323.
- Macdonald, K. F., Lund, M. A., Blanchette, M. L., McCullough, C. D. (2014). Regulation of artisanal small scale gold mining (ASGM) in Ghana and Indonesia as currently implemented fails to adequately protect aquatic ecosystems.
- McDowell, M.A., Dillion, C.F., Osterloh, J., Bolger, P.M., Pellizzari, E., Fernando, R., Montes de Oca, R., Schober, S.E., Sinks, T., Jones, R.L., Mahaffey, K.R. (2004). Hair Mercury Levels in US Children and Women of Childbearing Age: Reference Range Data from NHANES 1999-2000. *Environmental Health Perspectives*. 112 (11): 1165-71. Disponible en: <http://www.ehponline.org/members/2004/7046/7046.html>. Consultado el 30/07/2019.
- Méndez, J. P., Ramírez, C. A. G., Gutiérrez, A. D. R., García, F. P. (2009). Contaminación y fitotoxicidad en plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 10(1), 29-44.
- Mensah, E. K., Afari, E., Wurapa, F., Sackey, S., Quainoo, A., Kenu, E., Nyarko, K. M. (2016). Exposure of small-scale gold miners in Prestea to Mercury, Ghana, 2012. *The Pan African Medical Journal*, 25(Suppl 1).
- Mosquera, C., Trillo, A., Luján, A. (1999). Propuesta para un plan de acción para el proyecto GAMA, Lima: COSUDE.
- Mujere, N., Isidro, M. (2016). Impacts of artisanal and small-scale gold mining on water quality in mozambique and zimbabwe. In *Impact of Water Pollution on Human Health and Environmental Sustainability* (pp. 101-119). IGI Global.
- O'Driscoll N. J., Rencz A., Lean D.R.S. (2005). The biogeochemical and fate of mercury in the environment. *Metal ions in biological systems*, 43, 221-238.
- Pacyna, E. G., Pacyna, J. M., Sundseth, K., Munthe, J., Kindbom, K., Wilson, S., Maxson, P. (2010). Global emission of mercury to the atmosphere from anthropogenic sources in 2005 and projections to 2020. *Atmospheric Environment*, 44(20), 2487-2499.



- Palacios Ubach, S., Alfonso Abella, M. P. (2011). Importancia de la caracterización de los yacimientos para su aprovechamiento sostenible: el ejemplo de Misky, Perú. In Patrimonio geominero, geología y minería ambiental: libro de actas del primer Congreso Internacional sobre Patrimonio Geominero, Geología y Minería Ambiental de Bolivia y de los Andes: Potosí, Bolivia, enero del 2011 (pp. 281-290). Sociedad Española para la Defensa del Patrimonio Geológico y Minero (SEDPGYM).
- Pellizzari, E.D., Fernando, R., Cramer, G.M., Meaburn, G.M., and Bangerter, K. (1999). Analysis of Mercury in Hair of EPA Region V Population. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, 9, 393-401.
- Pineau, A., Piron, M., Boiteau, H.L., Etourneau, M.J., Guillard, O. (1990). Determination of total mercury in human hair samples by cold vapour atomic absorption spectrometry. *Journal of Analysis Toxicology*, 14(4), 235-238.
- Pineda, H.R. (2004). Presencia de Hongos Micorrízicos Arbusculares y Contribución de Glomus Intraradices en la Absorción y Translocación de Cinc y Cobre en Girasol (*Helianthus Annuus* L.) Crecido en un Suelo Contaminado con Residuos de Mina. Tesis para Obtener el Grado de Doctor en Ciencias Universidad de Colima. Tecoman, Colima.
- Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA) (2008). El uso del mercurio en la minería del oro artesanal y en pequeña escala. Recuperado de [https://ige.org/archivos/IGE/mercurio\\_en\\_la\\_Mineria\\_de\\_Au.pdf](https://ige.org/archivos/IGE/mercurio_en_la_Mineria_de_Au.pdf).
- Risher, J. F., Amler, S. N. (2005). Mercury exposure: evaluation and intervention: the inappropriate use of chelating agents in the diagnosis and treatment of putative mercury poisoning. *Neurotoxicology*, 26(4), 691-699.
- Rodushkin, I., & Axelsson, M. D. (2000). Application of double focusing sector field ICP-MS for multielemental characterization of human hair and nails. Part II. A study of the inhabitants of northern Sweden. *Science of the Total Environment*, 262(1-2), 21-36.
- Roulet M. (2001). Le mercure: son cycle biogéochimique et sa repartition aux échelles planétaires et amazonienne. 81-85 p. En: *Le mercure en Amazonie*. (Carmouze J. P., Lucotte M. y Boudou A., Eds.) Intitut de Recherche pour le Développement (IRD), París.
- Sauquillo, A., Rigol, A., Rauret, G. (2003). Overview of the use of Leaching Extraction Tests for Risk Assessment of Trace Metals in Contaminated Soils and Sediments. *Trends in Analytical Chemistry*, 22, 152-159.
- Scott, J. S. y J. Ingles (1981). Removal of Cyanide from Gold Millings Effluents, Remoción del cianuro de los efluentes de molinos de oro. Canadian Mineral Processors Thirteenth Annual Meeting, Procesadores Canadienses de Minerales, 13ª Reunión Anual, Ottawa, Ontario, Canadá, Enero 20-22, pp. 380-418.
- Seccatore, J., Veiga, M., Origiasso, C., Marin, T., De Tomi, G. (2014). An estimation of the artisanal small-scale production of gold in the world. *Sci. Total Environ.*, 496, 662-667.
- Sillitoe, R.H. (2003). Iron oxide-copper-gold deposits: an Andean view. *Mineralium Deposita* (38)787-812
- Spiegel, S.J., Veiga, M.M. (2005). Building Capacity in Small-Scale Mining Communities: Health, Ecosystem Sustainability, and the Global Mercury Project. *EcoHealth* 2, 361-369.
- Suzuki, T., Imura, N., Clarkson, T.W., Eds. (1991). *Advances in Mercury Toxicology*. New York: Plenum Press. p. 459-483.

- Swain, E. B., Jakus, P. M., Rice, G., Lupi, F., Maxson, P. A., Pacyna, J. M., Veiga, M. M. (2007). Socioeconomic consequences of mercury use and pollution. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 36(1), 45-62.
- The Price of Gold (2019). Nationalgeographic.com. Consultado el 18 de agosto de 2019.
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (1999). Integrated Risk Information System (IRIS) on Elemental Mercury. National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development, Washington, DC. Ver: <http://www.epa.gov/iris/subst/0370.htm>
- UNIDO (United Nations Industrial Development Organisation) (2007). Global Impacts of Mercury Supply and Demand in Small-Scale Gold Mining: Global Mercury Project; UNEP: Nairobi, Kenya.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2002). Global Mercury Assessment. UNEP Chemicals Mercury Programme. Disponible en: [www.chem.unep.ch/mercury/Report/Final%20Assessment%20report.htm](http://www.chem.unep.ch/mercury/Report/Final%20Assessment%20report.htm). Consultado el 25/09/2019.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO) (2003). Removal of Barriers to Introduction of Cleaner Artisanal Gold Mining and Extraction Technologies. Disponible en: [http://www.cetem.gov.br/gmp/GMP\\_News/GMP\\_News\\_January\\_2003.pdf](http://www.cetem.gov.br/gmp/GMP_News/GMP_News_January_2003.pdf). Consultado el 15/09/2019.
- United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). (2003). Removal of Barriers to Introduction of Cleaner Artisanal Gold Mining and Extraction Technologies. Disponible en: [http://www.cetem.gov.br/gmp/GMP\\_News/GMP\\_News\\_January\\_2003.pdf](http://www.cetem.gov.br/gmp/GMP_News/GMP_News_January_2003.pdf). Consultado el 11/08/2019.
- US Environmental Protection Agency (US EPA) (1995). Integrated Risk Information System (IRIS) for Mercury, Elemental (CASRN 7439-97-6). Washington, DC: National Center for Environmental Assessment, Office of Research and Development. Available at: [www.epa.gov/iris/subst/0370.htm](http://www.epa.gov/iris/subst/0370.htm)
- USGS. (2009). United States Geological Survey Minerals Resources Program Disponible en: <http://www.indexmundi.com/minerals/?product=mercury>. Consultado el 26/08/2019.
- Vargas, A.R. (1978). Estudio geológico-minero de la faja aurífera Nazca-Ocoña; Technical Report; Ingemmet: Lima, Peru, p. 179.
- Veiga M. M. y Meech J.A. (1995). A brief history of amalgamation practices in the Americas. En proceeding of the 16th Brazilian Symposium on Ore Processing and Hydrometallurgy, Río de Janeiro, Brazil, 581-594.
- Veiga, M.M., Baker, R. (2004). Protocols for Environmental and Health Assessment of Mercury Released by Artisanal and Small-Scale Gold Miners; United Nations: New York, NY, USA, p 289.
- Veiga, M.M., Bermudez, D., Pacheco-Ferreira, H., Martíns Pedroso, L.R., Gunson, a.J., Berrios, G., Vos, L., Huidobro, P. Roeser, M. (2006). Mercury Pollution from Artisanal Gold Mining in Block B, El Callao, Bolivar State, Venezuela. En: N. Pirrone, K.R. Mahaffey (eds). Dynamics of Mercury Pollution on Regional and Global Scales: Atmospheric Processes and Human Exposures Around the World. Elsevier, pp 421-450.
- Vieira, R. (2006). Mercury free gold mining technologies: possibilities for adoption in the Guianas. *Journal of Cleaner Production*, 14(3-4), 448-454.

- Wang, Y. P., Chao, C.C. (1992). Effects of Vesicular- Arbuscular Mycorrhizae and Heavy Metals on the Growth of Soybean and Phosphate and Heavy Metal Uptake by Soybean in Major Soil Groups of Taiwan. *Journal Agricultural Association China New Series* 157, 6-20.
- WHO, U. (2008). *Guidance for Identifying Populations at Risk from Mercury Exposure*. Geneva, Switzerland.
- WHO. (2005). *Mercury in Drinking-water*. WHO/SDE/WSH/05.08/10.
- Williams, P., Barton, M.D., Johnson, D.A., Fontboté, L., Haller, A.d., Mark, G., Oliver, N.H.S., Marschik, R. (2005). Iron Oxide Copper-Gold Deposits: Geology, Space Time Distribution, and Possible Modes of Origin. En: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J., Richards J.P. (eds.) *Economic Geology 100th Anniversary Volume*. Society of Economic Geologists, Littleton, pp. 371-406
- World Health Organization (WHO) (2016). *Guidance for identifying populations at risk from mercury exposure*. Mercury publications. USGS
- World Health Organization (WHO), (2004). WHO Food Additive Series 52. Safety evaluation of certain food additives and contaminants. International Programme on Chemical Safety. Available at <http://whqlibdoc.who.int/publications/2004/924166052X.pdf>
- Wuana, R. A., Okieimen, F. E. (2011). Heavy metals in contaminated soils: a review of sources, chemistry, risks and best available strategies for remediation. *Isrn Ecology*.
- Yard E.E., H.J. (2012). Mercury exposed among artisanal gold miners in Madre de Dios, Perú: A cross-sectional study. *J. Med. Toxicol.* 8(4), 441-448.
- Villanueva-Ponce A., Adserias-Garriga M.J. y Chimenos-Küstner E. (2015). Nivel de mercurio en cabello de niños peruanos expuestos en una zona minera de Arequipa y de la ciudad de Lima. *Avances en Odontostomatología*. 31, 85-90.