



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa

Trabajo Final de Grado (TFG)

Afecciones ambientales producidas por la minería artesanal de oro de Bolivia



Autor: **Guillem Bel i Roset**

Tutor: **Dra. Pura Alfonso Abella**

Grado en Ingeniería Minera

Universitat Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

Manresa, 8 de julio de 2022



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Departament d'Enginyeria Minera, Industrial
i TIC



AGRADECIMIENTOS

En primer lugar me gustaría agradecer a mi profesora y amiga, Pura Alfonso Abella, por todo el conocimiento que me ha transmitido para llevar a cabo este estudio, la paciencia y el esfuerzo que hay des del principio del proyecto hasta su culminación además de los buenos momentos a lo largo de la carrera.

Agradecer al “Centre de Cooperació per al Desenvolupament” (CCD) y a la ONG “Mineria per al Desenvolupament” (MPD) por la oportunidad que me han dado de participar en un proyecto que para mí es de gran interés en el que he hecho un aprendizaje, si se me permite la expresión, no solamente acerca de la minería y sus impactos. También agradezco a la organización “Cumbre de Sajama” por su implicación des del primer momento de este proyecto.

A Maite García Vallès de la Universidad de Barcelona por su implicación en este trabajo y su ayuda acerca los análisis de microsonda electrónica y ATD.

Agradecer también a Karla, Roberto (Especialistas Ambientales), Lia y Miguel por su hospitalidad, generosidad, buen trato y gran corazón durante nuestra estancia en Bolivia.

A mis compañeros Miquel Sendrós, Nor Sidki, Roger Gaona y Arnau Matrínez, por las charlas que hemos hecho juntos que me han servido para seguir adelante. También a Quim Sanz por la realización de algunas fotografías influidas en el presente trabajo.

A la Escuela de Ingeniería de Minas e Industriales (UCLM) de Almadén por su ayuda en la realización del análisis en mercurio de los cabellos.

Finalmente quiero agradecer a mi familia que a lo largo de todo el grado me ha apoyado en todas las decisiones que he tomado, me ha animado y sigue haciéndolo cada día para que siga adelante con mi vida tan a nivel personal como profesionalmente.



RESUMEN

En el presente trabajo se ha estudiado el impacto que genera la extracción de oro mediante mercurio en la cooperativa aurífera Sin Fronteras situada en la zona de Suches, Departamento de La Paz, Bolivia. Este método es utilizado ampliamente por la minería a pequeña escala (ASM) con lo que conlleva un impacto en el medio ambiente y en la salud de las personas.

En este trabajo se ha realizado el muestreo de material de distintas fases del sistema de procesamiento mineral para conocer la composición mineralógica y el contenido en oro para valorar las características de liberación de este. Para ello se ha empleado microscopía electrónica, difracción de rayos X, análisis térmico diferencial-termogravimétrico y análisis de mercurio en cabellos.

Los resultados muestran un contenido bajo en oro aunque el grado elevado de liberación de las partículas debido a la naturaleza del depósito mineral permite una extracción a bajo coste. Por otro lado se ha encontrado abundancia en tierras raras (REE) como la monacita que podría comercializar como subproducto.

Los análisis de mercurio en cabello han mostrado un contenido inferior a los máximos permitidos por la OMS. Una posible razón sería el poco mercurio que se utiliza debido al elevado grado de liberación que presentan las partículas de mineral además de las buenas condiciones en las que se usa la retorta.

Para evitar la contaminación que supone el uso de mercurio se han de encontrar otras tecnologías alternativas más limpias, sostenibles y económicamente viables. Se ha estudiado la implementación de bórax para la extracción de oro. Esta se trata de una tecnología con mayor recuperación y con un grado de toxicidad muy bajo.



ABSTRACT

This paper has studied the impact of gold extraction using mercury in the gold mining cooperative Sin Fronteras located in the area of Suches, Department of La Paz, Bolivia. This method is widely used by small-scale mining (ASM), which has an impact on the environment and people's health.

In this work, material from different stages of the mineral processing system was sampled to determine the mineralogical composition and gold content in order to assess the characteristics of gold liberation. For this purpose, electron microscopy, X-ray diffraction, differential thermal-thermogravimetric analysis and hair mercury analysis were used.

The results show a low gold content although the high degree of liberation of the particles due to the nature of the mineral deposit allows a low cost extraction. On the other hand, an abundance of rare earths (REE) such as monazite has been found, which could be marketed as a by-product.

Analysis of mercury in hair has shown a content lower than the maximum allowed by the WHO. One possible reason could be that little mercury is used due to the high degree of liberation of the mineral particles and the good conditions in which the retort is used.

In order to avoid mercury pollution, cleaner, more sustainable and economically viable alternative technologies have to be found. The implementation of borax for gold extraction has been studied. This is a technology with higher recovery and a very low toxicity level.



ÍNDICE

Página

AGRADECIMIENTOS	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	5
1. INTRODUCCIÓN	10
2. OBJETIVOS.....	13
3. ESTUDIOS PREVIOS O ANTECEDENTES	13
4. SITUACIÓN GEOGRÁFICA	15
4.1. ENCUADRE GEOGRÁFICO.....	16
5. GEOLOGÍA	17
5.1. GEOLOGÍA REGIONAL	17
5.2. CORDILLERA DE APOLOBAMBA.....	19
5.3. GEOLOGÍA LOCAL: SUCHES.....	20
6. MINERÍA	22
6.1. MINERÍA REGIONAL.....	22
6.2. CASO DE ESTUDIO: COOPERATIVA MINERA AURÍFERA SIN FRONTERAS	23
6.2.1. DESCRIPCIÓN DE LOS TRABAJOS MINEROS	24
6.2.1.1. EXTRACCIÓN DEL DEPÓSITO PRIMARIO	24
6.2.1.2. PROCESAMIENTO DEL MINERAL: CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA	24
6.2.1.3 PROCESAMIENTO DEL MINERAL: AMALGAMACIÓN CON MERCURIO	25
7. MATERIALES Y MÉTODOS	26
7.1. MUESTREO MATERIAL DE ALIMENTACIÓN Y PROCESAMIENTO	26
7.2. MUESTREO DE CABELLO	27
7.3. MÉTODOS ANALÍTICOS	28
7.3.1. GRANULOMETRÍA	28
7.3.2. ANÁLISIS QUÍMICO.....	28
7.3.3. DIFRACCIÓN DE RAYOS X.....	28
7.3.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA	29
7.3.5. ANÁLISIS TÉRMICO DIFERENCIAL-TERMOGRAVIMÉTRICO.....	29
7.3.6. ANÁLISIS DE MERCURIO EN CABELLOS Y MATERIAL AURÍFERO.....	30



8. RESULTADOS	31
8.1. GRANULOMETRÍA	31
8.2. COMPOSICIÓN QUÍMICA.....	31
8.3. MINERALOGÍA.....	33
8.4. QUÍMICA MINERAL	35
8.4.1. MONACITA	35
8.4.2. MORFOLOGÍA Y COMPOSICIÓN DE LAS PARTÍCULAS DE ORO	37
8.5. CONTENIDO DE MERCURIO EN CABELLOS	39
8.6. ALTERNATIVA AL USO DEL MERCURIO: OBTENCIÓN DEL ORO MEDIANTE BÓRAX	41
9. DISCUSIÓN	43
9.1. EFICIENCIA DEL PROCESAMIENTO GRAVIMÉTRICO	43
9.2. EFICIENCIA DEL USO DEL MERCURIO	44
9.3. LA ALTERNATIVA DEL MÉTODO DE BÓRAX	45
9.4. OTROS METALES DE INTERÉS DEL DEPÓSITO DE SUCHES	45
10. CONCLUSIONES.....	46
11. REFERENCIAS	48
12. APÉNDICES.....	51
12.1. APÉNDICE 1: DESCRIPCIÓN DETALLADA DE LAS MUESTRAS TOMADAS	52
12.2. APÉNDICE 2: FOTOGRAFÍAS DEL ORO	53
12.3 APÉNDICE 3: RESPUESTAS DE LOS TRABAJADORES MINEROS	55

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. <i>Objetivos de desarrollo sostenible para el año 2030.</i>	12
Figura 2. <i>Situación geográfica de la zona de estudio. En amarillo el límite fronterizo entre Perú y Bolivia</i>	16
Figura 3. <i>Localización de Suches en área protegida de Apolobamba.</i>	17
Figura 4. <i>Ubicación del cinturón Au-Sb de la Cordillera Andina Este. Modificado de Mlynarczyk y William-Jones, 2005.</i>	18
Figura 5. <i>Cinturones metalogenéticos de Bolivia (Arce-Burgoa, 2009).</i>	19
Figura 6. <i>Geología del área de estudio (Japan International Cooperation Agency (2003). En rojo se señala el distrito de Suches.</i>	21
Figura 11. <i>Principios en que se basan las técnicas de ATD (https://www.hitachi-hightech.com/global/products/science/tech/ana/thermal/descriptions/dta.html).</i>	30
Figura 12. <i>Distribución de tamaños de partículas de las muestras del depósito, reutilización de escombreras y alimentación respectivamente.</i>	31
Figura 13. <i>Diagramas de difracción con rayos X comparativos entre los materiales que forman el concentrado de la alfombra y los del material separado de éste mediante un imán y que constituyen el concentrado magnético.</i>	33
Figura 14. <i>Imagen de SEM procedentes del lavado de alfombras. La imagen muestra una visión general de los diferentes minerales del yacimiento de Suches.</i>	34
Figura 15. <i>Imágenes SEM del concentrado magnético. a, b, c) vista de fragmentos de monacita. d) vista de fragmentos de monacita, zirconio e ilmenita.</i>	37
Figura 16. <i>Imagen de SEM de un grano de oro totalmente liberado con morfología parcialmente redondeada y morfología laminar.</i>	38
Figura 17. <i>Imágenes de SEM. Se observan distintas trazas de oro pertenecientes al concentrado por alfombras. En la imagen a, c) se observa un grano de oro rodeado de monacita y hematites. En b) un grano de oro al lado de una monacita.</i>	38
Figura 18. <i>Imagen SEM del concentrado por alfombras. Se observa un grano de oro con impurezas de cuarzo al lado de una monacita.</i>	39
Figura 19. <i>Comparativa de concentraciones de mercurio en el cabello de habitantes de los sectores de Yani, Señor de Mayo (Freixas Berenguer, 2016) y Suches. La raya roja vertical indica el límite permisible establecido por WHO para el contenido en cabellos humanos (WHO, 2006).</i>	40
Figura 21. <i>Comparativa entre las curvas de los ATD de la muestra de concentrado aurífero con diferentes proporciones de bórax y Na₂CO₃.</i>	42
Figura 22. <i>Diferencias entre el concentrado a) a partir de material de un depósito primario (Martínez et al., 2021) y b) a partir de un placer. El oro está representado de color negro.</i>	43



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición química del material magnético extraído del concentrado de la alfombra..	32
Tabla 2. Concentrado en peso %, para la fracción magnética de concentrado con alfombra.	34
Tabla 3. Composición química de los minerales de tierras raras procedentes del concentrado por alfombras.	35
Tabla 4. Composición química de los minerales de tierras raras procedentes del concentrado magnético.	36
Tabla 5. Resultados de concentración de mercurio en materiales del depósito de Suches.	40



1. Introducció

Bolivia fue desde antes de las épocas coloniales, uno de los mayores productores y exportadores del mundo de los recursos minerales. Representando estos una de las principales fuentes de ingresos del país. Este país ha sido líder en varias ocasiones en la producción mundial de algún recurso a lo largo de la historia como de estaño, plata y oro.

En el siglo XVII hubo un importante auge de la plata que eclipsó rápidamente la minería del oro hasta mediados de siglo donde alcanzó más del 99% de las exportaciones minerales de América hispánica (Hamilton, 1975). Este auge fue en gran parte gracias a las minas ubicadas en la región boliviana de Potosí, donde posteriormente se hallaría el principal centro de operaciones de exportación por parte de los colonos (Enríquez, 1998). Un claro ejemplo es el cerro rico de Potosí, que hoy día se sigue extrayendo mineral, en este caso estaño, de los socavones que abrieron los españoles y de los montículos en donde arrojaron cómo basura gran cantidad de mineral (Galeano, 1971).

Aunque se haya llevado a cabo mucha labor minera en el continente sudamericano actualmente se estima que sólo el 10% del potencial minero del país fue explotado (Enríquez, 1998). A largo de los años las tendencias en la tecnología han ido cambiando y también lo ha hecho la demanda de las materias primas. Aunque el potencial mineralógico de Bolivia sea de gran envergadura, no se han efectuado trabajos de exploración de manera sistemática por lo que no se tiene constancia de datos oficiales sobre reservas globales de los recursos minerales del país (Félix & Lazo, 2015).

Según Veiga & Baker (2004) la diferencia entre una minería convencional y una artesanal es la necesidad del minero de sobrevivir. Estas operaciones carecen de estudios geológicos previos, perforaciones o estudios de ingeniería. La falta de apoyo tecnológico y financiero para que la pequeña minería desarrolle una mejora en sus trabajos es de difícil obtención, y esto determina que estas operen en condiciones arcaicas y precarias, donde se crea un círculo vicioso de falta de recursos e incapacidad de evolucionar.

La minería en países en vías desarrollo cómo es el caso de Bolivia se puede llevar a cabo de dos maneras distintas. Una de ellas es a través de grandes empresas mineras que poseen un gran poder económico y tecnológico. La otra es mediante pequeñas explotaciones normalmente formado por cooperativas que extraen el mineral de forma artesanal y/o a pequeña escala (ASM). Además estas operaciones extractivas se pueden hacer de manera legal o desafortunadamente, de manera ilegal. La minería artesanal o pequeña escala cómo definición recibe distintas connotaciones según jurisdicciones. La Organización de las Naciones Unidas (ONU) propuso en 1972 la definición de la minería a pequeña escala cómo “Cualquier operación minera con una producción anual de material sin procesar de 50,000 toneladas métricas o menos medidas a la entrada de la mina” (Seccatore et al., 2014).

Se estima que más de 15 millones de personas trabajan en la minería artesanal (ASM) (Veiga & Baker, 2004) y los datos señalan que cada vez esta actividad va a más. En el año 2014 se estimaron alrededor de 30 millones de trabajadores y en 2017 unos 40.5 millones (Intergovernmental Forum on Mining,



Minerals, 2018). Además entre los años 2002 y 2012 el precio del oro ha subido un 400% y que aún sigue haciéndolo, cosa que ha ayudado que cada vez más haya actividades de este tipo por todo el mundo (Seccatore et al., 2014). En el caso de Bolivia, el oro es explotado a través de cooperativas, que, aunque no se pueden contabilizar con certeza, ya que muchas de ellas no están registradas, en 2007 eran alrededor de 500, mientras que en 2014 aumentaron hasta alrededor de 1700 (Barybar Hidalgo & Dargent, 2020).

La minería artesanal es la mayor fuente de contaminación de mercurio a escala mundial por lo que genera graves problemas al medio ambiente y expone a las poblaciones cercanas a una contaminación que puede resultar muy perjudicial para la salud humana. La mayoría de países de América Latina comparten dichas problemáticas ambientales derivadas de la minería a pequeña escala. Bolivia es el cuarto país del mundo en cuanto a emisiones de mercurio, le preceden Indonesia, Perú y Colombia, emitiendo alrededor de 120 toneladas de mercurio anualmente, en cambio en producción de oro ocupa la posición 19 (Yoshimura et al., 2021).

Los mineros que trabajan en la minería a pequeña escala a nivel mundial utilizan alrededor de 1400 t de mercurio anualmente. Según Yoshimura et al. (2021) la emisión en América Latina sería de alrededor de 1000 t de mercurio anuales. De ellos 120 t corresponden a las emisiones de Bolivia, siendo el cuarto país del mundo, detrás de Indonesia, Perú y Colombia situándose incluso por delante de Brasil. Además se estima que se pierden entre 5 y 10 kg de mercurio por cada kilo de oro recuperado (Eppers, 2017). Køster-Rasmussen et al. (2016) sostiene que el 37% de la emisión de mercurio antropogénico proviene de ASM.

El mercurio procedente de las colas de procesamiento y la amalgamación queda en las aguas que después se vierten al ecosistema acuático como los ríos o lagos. Esto genera un impacto directo para el ecosistema que además puede producir una intoxicación por la ingestión de pescado o de aguas procedentes del mismo foco de contaminación o proximidades (Appel et al., 2015). Los síntomas de envenenamiento de mercurio se detectan en mineros, comerciantes de oro y ciudadanos que viven cerca de los focos de emisión. La baja exposición al mercurio puede producir daños respiratorios leves como dolores de pecho, tos, disnea, hemoptisis, deterioro de la función pulmonar, entre otros. Mientras que en exposiciones altas puede conducir a la muerte o causar daños permanentes en el sistema nervioso (Poulin et al., 2008; EPA, 2011). Además las comunidades donde parte de su dieta se basa en el pescado han mostrado niveles altos de mercurio en la sangre. Las mujeres y los niños representan la mayoría de las víctimas debido a la poca información que se tiene sobre el peligro del mercurio (Veiga, 1997).

En la ASM existe una falta de apoyo tecnológico y de conocimiento, lo que favorece la generación de estos impactos (Alfonso et al., 2019; Gaona, 2021). Es por eso que se deben estudiar alternativas a los métodos de obtención del mineral tradicionales para llegar al desarrollo de una minería más sostenible en el que se realice una máxima recuperación y beneficio del metal y llegar a mínimo impacto en el medio ambiente. Esto hará un medio ambiente de calidad y supondrá un beneficio a largo alcance para las futuras generaciones (Spooren et al., 2020).

Estos cambios están estrechamente ligados a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) de la ONU que dentro de la Agenda 2030 promueven una sostenibilidad económica, social y ambiental mediante la participación de representantes de gobierno, sociedad, ámbito privado y académico (CIES, 2018). El sector de la minería está fuertemente vinculada a estos objetivos debido a la importancia que tiene a nivel mundial. Estos no sólo van dirigidos a grandes empresas mineras para favorecer su desarrollo sostenible sino también para la minería a pequeña escala que influye al medio ambiente durante sus actividades. De los diecisiete objetivos (Figura 1) hay una serie de ellos que influyen directa o indirectamente a la minería artesanal (ASM).

En primer lugar la contaminación provocada por el mercurio en el agua está ligado con la Salud y Bienestar (3), Agua Limpia y Saneamiento (6), Ciudades y Comunidades Sostenibles (11), Vida Submarina (14) y Vida de Ecosistemas Terrestres (15). Para la transición a tecnologías más verdes y sostenibles están los anteriormente mencionados que son consecuencia directa de este además se le añaden Trabajo Decente y Crecimiento Económico (8), Producción y Consumo Responsables (12) y Acción por el Clima (13). Finalmente las Alianzas para Lograr los Objetivos (17) se refiere a trabajos como el que se presenta que coopera con las comunidades para alcanzar objetivos conjuntamente.



Figura 1. Objetivos de desarrollo sostenible para el año 2030.

Es por eso que en el presente trabajo se analizan los inconvenientes de la utilización del mercurio, tanto por la afección a la salud de las personas cómo por los resultados en el procesamiento del oro. También se incluye la propuesta de soluciones alternativas hacia el uso de nuevos medios para la obtención del oro. Este trabajo pretende servir como referencia para no sólo futuras investigaciones o estudios de esta temática sino que sirva de guía para el desarrollo de buenas prácticas, o la mejora de ellas, en este caso para la obtención del oro, para que las operaciones mineras sean, seguras, económicamente beneficiosas, eficientes en el uso de los recursos y ambientalmente limpia (Laurence, 2011).



Gracias al *Centre de Cooperació per al Desenvolupament (CCD)* de la *Universitat Politècnica de Catalunya* y con la ayuda de la organización local “Especialistas Ambientales” se ha podido llevar a cabo este proyecto de cooperación para el estudiar los impactos ambientales producidos por la minería a pequeña escala en Bolivia con el objetivo de conseguir mejoras en el medio ambiente, la salud y la seguridad en el trabajo de los jornaleros.

2. Objetivos

La finalidad de este trabajo es la de contribuir a la valoración de la eficacia de los métodos de obtención del oro en el aprovechamiento de los placeres de oro de Bolivia. Para ello, la investigación se centra en las actividades de la cooperativa aurífera “Sin Fronteras” ubicada en las proximidad de la población de Suches, norte del departamento de La Paz (Bolivia). Para ello se examinarán las técnicas empleadas por esta cooperativa, tanto desde el punto de vista del aprovechamiento como de las consideraciones ambientales derivadas del tipo de procesamiento utilizado. También se pretende ofrecer soluciones para lo que se valorara la aplicabilidad de un método de obtención del oro mediante el uso de bórax.

Para conseguir el fin propuesto los objetivos específicos planteados son:

- Realizar una inspección de campo con la observación de los diferentes materiales que van a ser utilizados para la extracción del oro.
- Realizar un muestreo de los materiales de alimentación, contenido y colas del procesamiento.
- Efectuar estudios de microscopía para valorar la mineralogía y las características de liberación del oro.
- Valorar el contenido de mercurio (Hg) en el muestreo de cabello de los trabajadores de la cooperativa minera aurífera.
- Estudiar la implementación de bórax como alternativa al uso de mercurio a partir de ensayos de laboratorio.

3. Estudios previos o antecedentes

Existen varios estudios geológicos acerca del yacimiento de Suches. Uno de los primeros se llevó a cabo por Forani et al (1987) donde se describe la mayor parte de los depósitos que se encuentran a lo largo de la Cordillera de Apolobamba, entre ellos la cuenca de Suches. En él se constata la presencia de terrazas fluvio-glaciares, la distribución del oro sobre el terreno y las bajas leyes que presenta este. Posteriormente Forani (1990) lleva a cabo más estudios al respecto definiendo también depósitos cercanos como el de La Rinconada en la región peruana o en Pelechuco, en la parte boliviana.



Algunos estudios más extensos como el realizado por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (Japan International Cooperation Agency (2003) se estudia la exploración de yacimientos minerales a partir de datos existentes y exploración geoquímica. En él se lleva a cabo un mapeo que engloba parte de la zona de estudio. También se describe la geología con mayor detalle. El Instituto Geológico Minero y Metalúrgico (INGEMMET) realizan en 2009 y 2010 estudios de la situación de las concesiones mineras en la cuenca binacional del río Suches. En estos informes se realiza un inventario detallado de las explotaciones mineras que se encuentran hasta la fecha. En estos informes también se hace un estudio primario respecto el impacto ambiental de las explotaciones.

Teran-Mita et al. (2009) realizan la primera valoración ambiental significativa de la utilización del mercurio en la cordillera de Apolobamba, limitada a la zona de labor de la Cooperativa Rayo Rojo, en el municipio de Pelechuco. Analizaron suelos, plantas y aguas, indicando altas concentraciones de Hg en los suelos. Más adelante, analizan la contaminación por metales producida por la minería del oro en el distrito de Sunchullí, también en la cordillera de Apolobamba (Teran et al., 2010). Los resultados que aportan indican que las actividades mineras de la región no aportan cantidades significativas de metales pesados, a excepción de Hg, el cual se halla altas concentraciones.

Posteriormente Acosta et al. (2011) realizan otro estudio para caracterizar la contaminación potencial que supone la presencia de Hg total en suelos, sedimentos, agua y plantas en la Cordillera de Apolobamba. Obtuvieron que la acumulación de mercurio en suelos y sedimentos de algunos sectores de Apolobamba se halla entre las más elevadas del mundo.

Higuera et al. (2014) reportan el contenido en mercurio gaseoso a escala global. Entre otros lugares tratan el contenido en un transepto realizado a través de la cordillera de Apolobamba con un espectrómetro de absorción atómica portátil (LUMEX) en el marco de un proyecto de la Agencia española de cooperación al desarrollo (AECID) liderado desde la Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa.

Diferentes proyectos de cooperación subvencionados por el CCD han realizado estudios para la valoración de las actividades mineras auríferas del departamento de la paz. Cabe destacar el estudio del contenido en mercurio en cabellos de mineros y otros pobladores de las comunidades mineras, el cual dio lugar al Trabajo Final de Máster (TFM) de Anna Freixas (Freixas, 2016). En otros casos se realizaron valoraciones de la eficiencia, tanto en depósitos primarios, como el de la explotación que lleva a cabo la cooperativa 26 de septiembre, el cual también concluyó en un TFM (López, 2017) y en la cooperativa de Cotapata, que dio lugar un Trabajo Final de Grado, TFG, (Gaona, 2021). En cuanto a depósitos de tipo placer se ha estudiado el de Mapiri, dando lugar a otro TFG (Forns, 2020). Además, los resultados se han presentado en diversos congresos (Villegas et al. 2012; Alfonso et al. 2016), aportando información acerca del impacto de la contaminación de mercurio en el la zona norte de Bolivia, en el área protegida de la cordillera de Apolobamba y en el distrito de Yani, respectivamente. En el TFM realizado por Freixas (2016) se estudia el impacto ambiental de la minería a pequeña escala en los yacimientos primarios auríferos del distrito de Yani, un área próxima a Sorata, en el departamento de La Paz. En él, se valoran los niveles de contaminación en mercurio



que pueden afectar a la salud, evidenciados a través de análisis de cabellos en habitantes de diferentes poblaciones mineras en las que se utiliza el mercurio para la recuperación del oro.

Recientemente, los sedimentos del río Suches han sido evaluados con el fin de determinar su contenido en elementos potencialmente tóxicos. Según Salas-Mercado et al. (2022) la evaluación de los índices de contaminación y la correlación indican aparecen altos contenidos de Co, Ni y Zn, los cuales están asociados a la minería del oro y a las actividades agrícolas.

En 2021 se presenta una tesis doctoral sobre la evaluación de los efectos ambientales de la minería aurífera a pequeña escala en la Cordillera de Apolobamba (Teran, 2021). Este trabajo representa un importante aporte y recopilación de información en el establecimiento de la línea de base necesaria para el emprendimiento de acciones para subsanar la contaminación que se está produciendo en el área a partir de la minería del oro.

Appel et al. (2015) realizan un estudio en Sorata, Bolivia acerca del uso de mercurio para la extracción de oro y la implementación del uso de bórax como método alternativo más sostenible. Según estos autores, los resultados muestran una mayor recuperación en oro mediante el uso de bórax en comparación al del mercurio.

Appel & Jøsson (2010) y Mwapwele (2018) realizan estudios acerca del impacto en el medio ambiente y al ser humano que genera el uso del mercurio y algunas posibles soluciones. Eppers (2017) también referente a la temática del bórax para la minería a pequeña escala. En él se realiza un estudio de comparación en la región de Arequipa, Bolivia y en dos regiones septentrionales de Filipinas en el que se prueban los dos distintos métodos de recuperar el oro. Køster-Rasmussen et al. (2016) también demuestran la efectividad del método con bórax en los asentamientos mineros de Filipinas.

4. Situación Geográfica

La explotación minera estudiada corresponde a la Cooperativa Minera Aurífera Sin Fronteras ubicada en el departamento de La Paz (Bolivia), concretamente en la región de Suches dentro del Área Natural de Manejo Integrado Apolobamba (ANMI) (Figura 2) en la Cordillera de Apolobamba, situada a 250 km al Norte de la ciudad de La Paz. La cooperativa se halla en la cuenca de Ulla Ulla situada a unos 4400 m sobre el nivel del mar, ubicada al Sur-Este de la línea de cumbres mayores de la Cordillera que se encuentra separada del Altiplano por los relieves de la pre-cordillera de Carabaya que se extiende desde Perú.

La explotación comunica con La Paz mediante la carretera Ruta Nacional 2 hasta el municipio de Huarina dónde se toma la Ruta Nacional 16 en el que se transcurren unos 163 kilómetros hasta un desvío donde se toman una serie de caminos sin asfalto con un total de 66 kilómetros que atraviesa el área de Ulla Ulla y Sorapata hasta llegar a la región (o laguna) de Suches. Una vez se llega a Suches se toma un camino de escasos cientos de metros hasta llegar a la explotación minera. El recorrido de La Paz hasta la cooperativa minera en Suches tiene un total de 303 km.

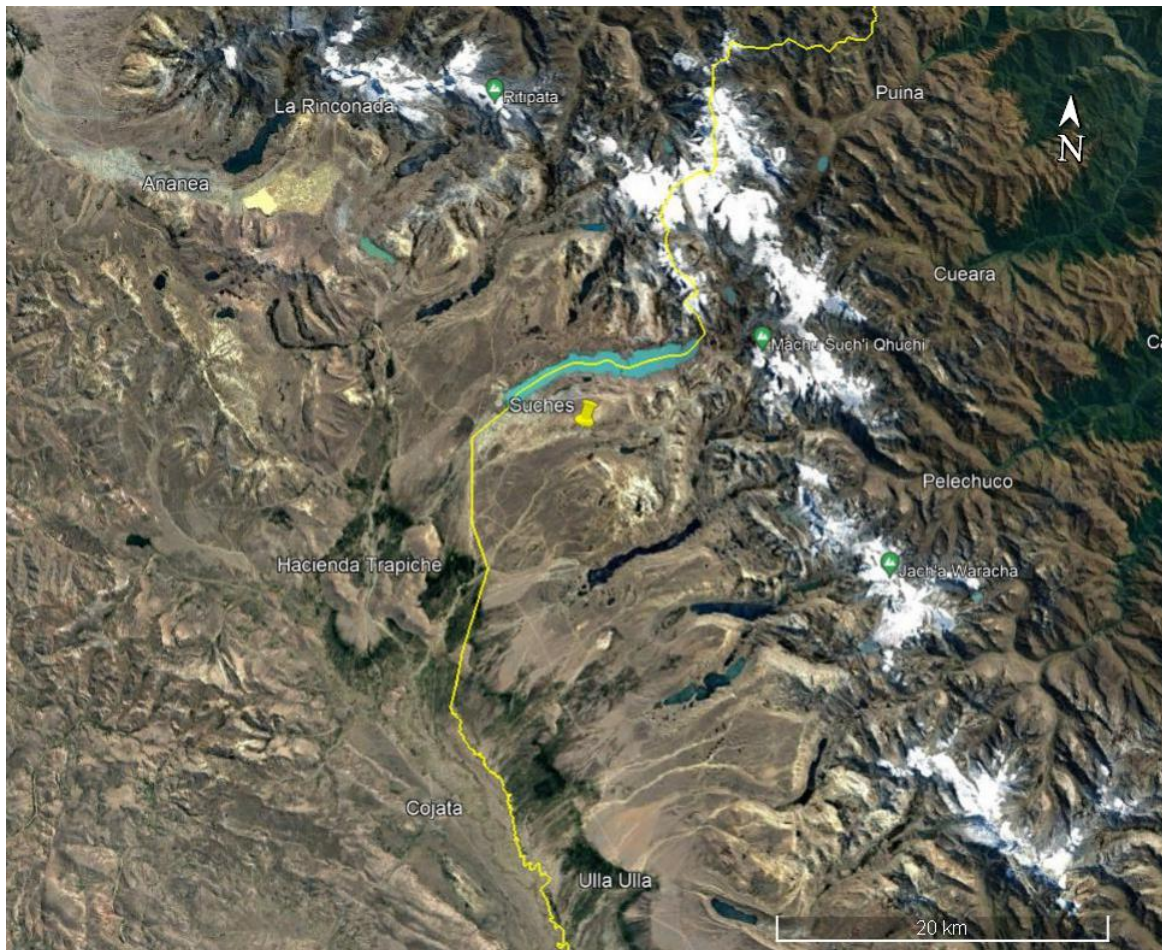


Figura 2. Situación geográfica de la zona de estudio. En amarillo el límite fronterizo entre Perú y Bolivia

4.1. Encuadre geográfico

La Cordillera de Apolobamba, se sitúa a 250 km al Norte de La Paz y forma parte de la extremidad septentrional de la Cordillera Oriental. El área se encuentra en altitudes alrededor de los 5000 m. La línea definida a lo largo de 85 km por la cresta de la Cordillera separa la cuenca amazónica con la cuenca altiplánica al Sur-Oeste y alcanza una superficie aproximada de 40 km². Esta cordillera montañosa nace en la frontera de Perú-Bolivia situada al norte del lago Titicaca, concretamente en el Nevado Chaupi Orca (6.044 m) y los tres Palomanis (alrededor de 5730 m).

La región de Suches se encuentra en la cuenca de Ulla Ulla al noroeste de Bolivia que abarca una superficie aproximada de 600 km² tomando alturas de 4300 a 4800 m (Figura 3). En esta zona se encuentra la laguna de Suches que con una superficie de 14 km² hace de frontera entre Perú y Bolivia. De esta laguna nace el río con el mismo nombre que es uno de los principales afluentes del lago Titicaca y discurre un tramo de 161 km hasta desembocar en él.

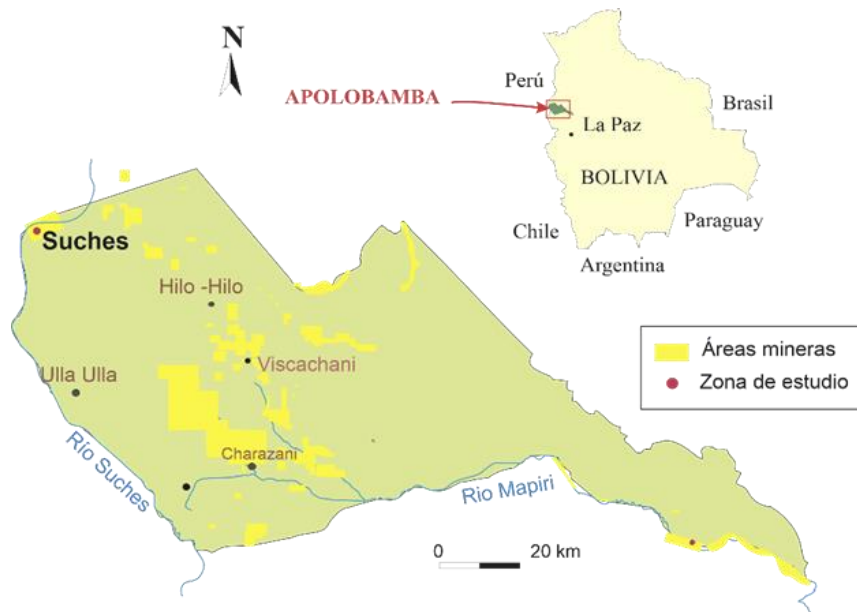


Figura 3. Localización de Suches en área protegida de Apolobamba.

5. Geología

5.1. Geología Regional

Desde un punto de vista metalogénico la mitad occidental de Bolivia se encuentra constituida por dos grandes cinturones que cruzan de norte a sur. Uno de ellos es el cinturón de Sn Centro Andino y el otro el cinturón de Au-Sb. Ambos presentan una gran longitud y se superponen en una gran parte (Figura 4). El cinturón de Au-Sb se encuentra en la Cordillera Andina Oriental alcanzando una longitud de 1.600 km entre Cuzco (Perú) y Salta (Argentina). El cinturón se constatan más de 500 depósitos y ocurrencias a lo largo de la Cordillera dónde el oro es el principal metal de valor que se extrae. Este comienza en la zona de Santo Domingo y Cananea en Perú, donde se encuentran importantes yacimientos de oro como son el de Pataz y Bolívar. Más hacia el sur pasa por la zona de investigación, el distrito de Suches, seguido del sub-cinturón de Yani-Aucapata.

Muchos de estos distritos auríferos tienen asociadas mineralizaciones de estaño debido a las intrusiones que tuvieron lugar en el Mesozoico y Terciario.

Los yacimientos auríferos están alojados en las rocas paleozoicas que están formadas por materiales de origen detrítico, principalmente pizarras y areniscas, que se depositaron en una zona extensa entre el escudo brasileño y la zona de Arequipa. Además se tiene constancia de que ha habido una tectónica extensional que ha producido un sistema de fosas continentales acompañado un vulcanismo de tipo básico o intermedio (Mission, 1991).

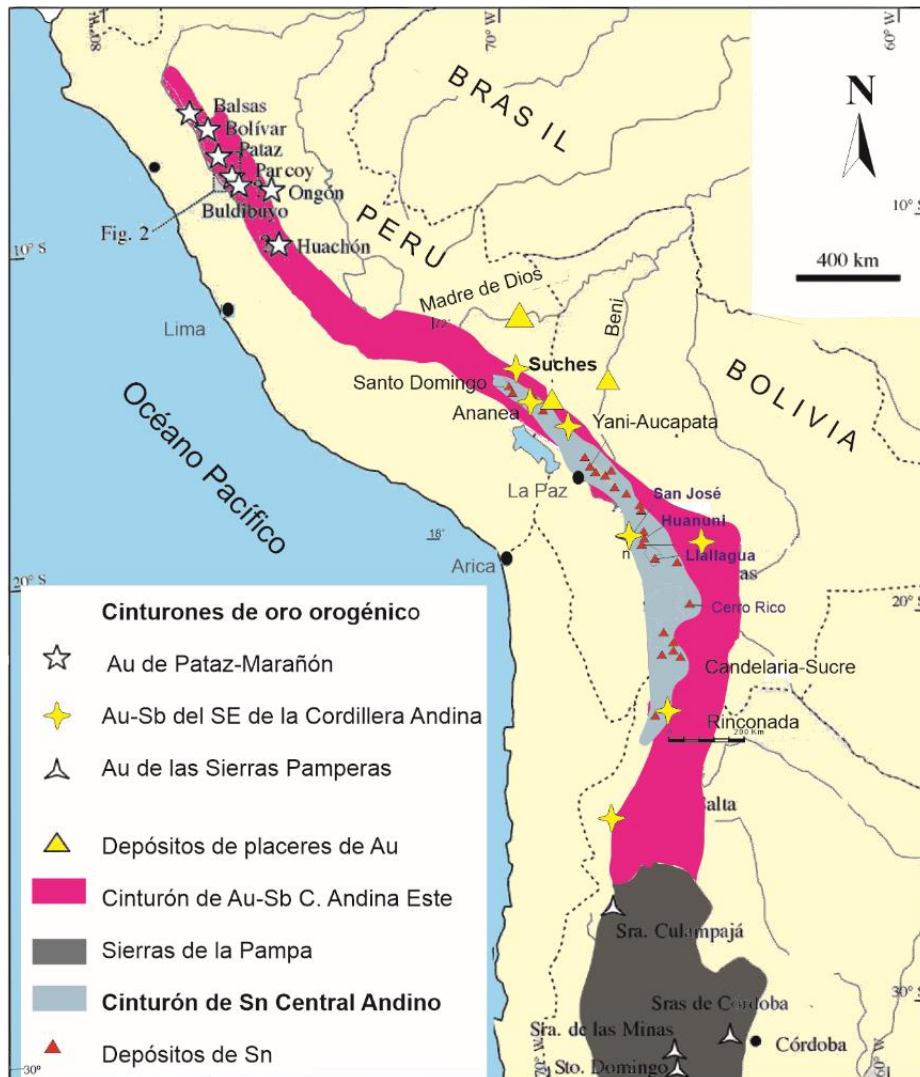


Figura 4. Ubicación del cinturón Au-Sb de la Cordillera Andina Este. Modificado de Mlynarczyk y William-Jones, 2005.

El oro orogénico es depositado en vetas, mantos o diseminados en minerales comúnmente encajados en rocas, frecuentemente pizarras, del Ordovícico medio y Silúrico inferior (Arce-Burgos & Goldfarb, 2009). El cinturón de Au-Sb se diferencia en otros tres cinturones distintivos de depósitos orogénicos (Figura 5):

- Cinturón de tendencia noroeste cerca de la ciudad de La Paz hasta el cinturón de Oruro-Challapata ubicado en el distrito de Amayapampa.
- Cinturón de tendencia norte-sur que va desde Caracota-Carma hasta el distrito de Candelaria en la frontera con Argentina.
- Cinturón de tendencia noroeste que se inicia en el distrito de Apolobamba pasando por los distritos de Aucapata-Yani y Cajuata-Los Machos, hasta Cocapata-El Molino.

Los productos más tempranos son oro, pirita, arsenopirita y minerales de wolframio hallados en cuarzo lechoso. Posteriormente a menor temperatura se depositaron Pb-Zn-Cu y sulfosales de Sb en cuarzo gris azulado (Lehrberger, 1992; Dill, 1998; Arce-Burgoa, 1999, 2002).

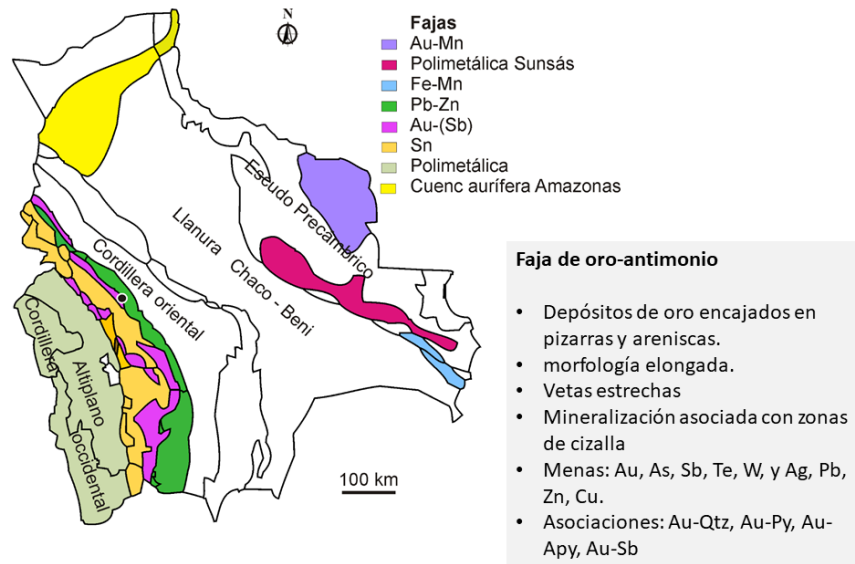


Figura 5. Cinturones metalogénicos de Bolivia (Arce-Burgoa, 2009).

El cinturón de estaño Central Andino se extiende a lo largo de aproximadamente 900 km desde Perú y Chile hasta Argentina. Forma un arco compuesto por rocas sedimentarias marinas del Paleozoico inferior, que experimentó una extensa deformación y anatexia de la corteza en el Cenozoico, y son estos procesos los que en última instancia deben haber llevado a la acumulación de grandes cantidades de metales distribuidos en cinturones metalogénicos (Sillitoe, 1976; Mlynarczyk y William-Jones (2005). Las épocas metalogénicas más importantes en este sector se produjeron a los 26-20 Ma y a los 16 y 12 Ma debido a la migración del arco (Mlynarczyk y William-Jones, 2005).

5.2. Cordillera de Apolobamba

Actualmente en la Cordillera es de los pocos lugares que aún presentan glaciares y concretamente en la región de Ulla Ulla, dónde se encuentran los glaciares más importantes del territorio boliviano, algunos de ellos alcanzan de 4 a 5 km² de superficie.

El subsuelo de la Cordillera de Apolobamba está constituido por terrenos Paleozoicos con areniscas y pizarras del Paleozoico Inferior, lutitas, areniscas y calizas del Paleozoico Superior, materiales Cretácicos pertenecientes a una serie de areniscas rojas y Terciarios (lutitas y rocas volcánicas no datadas). Por lo que respecta el Cuaternario, forma depósitos morrénicos, fluvio-glaciales, coluviales y fluviales que, después del Plioceno Superior, el Altiplano pasó a ser un lugar de sedimentación conglomerática o arcillosa-arenosa.



En la Cordillera de Apolobamba también se encuentran intrusivos constituidos por plutones graníticos triásicos y otros cuerpos subvolcánicos de composición riolítica. Son ejemplos el Plutón de Hauto se halla en la zona sureste del área i conforma una superficie de 140 km² o el intrusivo riolítico de Charazani, que aflora en la parte central de la Cordillera con una superficie aproximada de 160 km² (Sanjines et al, 2002). Estos materiales han ido sufriendo procesos de plegamiento, fallamiento y metamorfismo regional. Algunos se deben a la tectónica hercínica mientras que otros se deben a los eventos compresivos que sufrió la Cordillera de los Andes a partir del Oligoceno Superior (Ramírez y Terán, 2002).

5.3. Geología Local: Suches

La zona donde se encuentra Suches (Figura 6) está constituida por rocas paleozoicas de gran espesor cuya edad está comprendida entre el Ordovícico medio y el Pérmico pertenecientes a la formación Copacabana (Coila Choque, 2009).

El oro primario se evidencia en la formación Ananea, de edad Siluro-Devoniana que aflora en la Cordillera Oriental y se extiende desde la frontera de Perú con Bolivia hacia el noroeste recorriendo una distancia de 110 km. Está compuesta por intercalaciones de pizarras con cuarcitas y el espesor de la formación es de aproximadamente 2,5 km.

Además se encuentran filones de cuarzo son sulfuros intercalados con las pizarras. La mineralogía de la roca comprende cuarzo, moscovita, clorita como minerales principales y como accesorios se halla plagioclasas, arsenopirita, pirita, turmalina y zircón (Coila et al., 2010).

Los sedimentos pliocenos predominan en el sector norte de la cuenca, intercalados por vulcanitas cubiertas por los depósitos glaciales, fluviales y fluvioglaciares. Las morrenas, fruto de la actividad glaciario, dominan la mayor parte del paisaje. Hacia el sureste se hallan llanuras más suaves debido a la deposición de estos materiales y se desarrollan a lo largo de los ríos Suches, Antaquilla, etc. (Coila et al., 2010).

En todo el sector se encuentran morrenas frontales y laterales que discurren a lo largo de los ríos Suches y Antaquilla. Los rellenos cuaternarios del sector se dividen en distintas fases de sedimento.

- Formación Wila Aja: esta se caracteriza por el aglomerado con cantos bien redondeados donde la matriz ocupa un importante volumen. Los bloques de más de 30 cm son escasos. La estructura de la formación es bastante homogénea.
- Glaciación Ajanani y Glacis Putina: Las morrenas sedimentadas son fruto de la glaciación Ajanani que se encuentra sobre la formación de *Wila Aja* y el glacis Soratera. La base está formada por gravas glaciales con matriz arcillosa y parcialmente compactada y los clastos tienen un tamaño promedio de 10 a 15 cm.
- Glaciación Antaquilla: Materiales glaciales y fluvioglaciares de alrededor de 60 m de potencia que se encuentran aguas abajo y descansan en contacto erosivo sobre los sedimentos Ajanani.

Estan constituidas por cuarcitas y pizarras arenosas producto de la erosión ordovícica en la parte alta de los valles. Los clastos de encuentran de 0,7 a 1 m de diámetro en matriz arenarcillo-limoso.

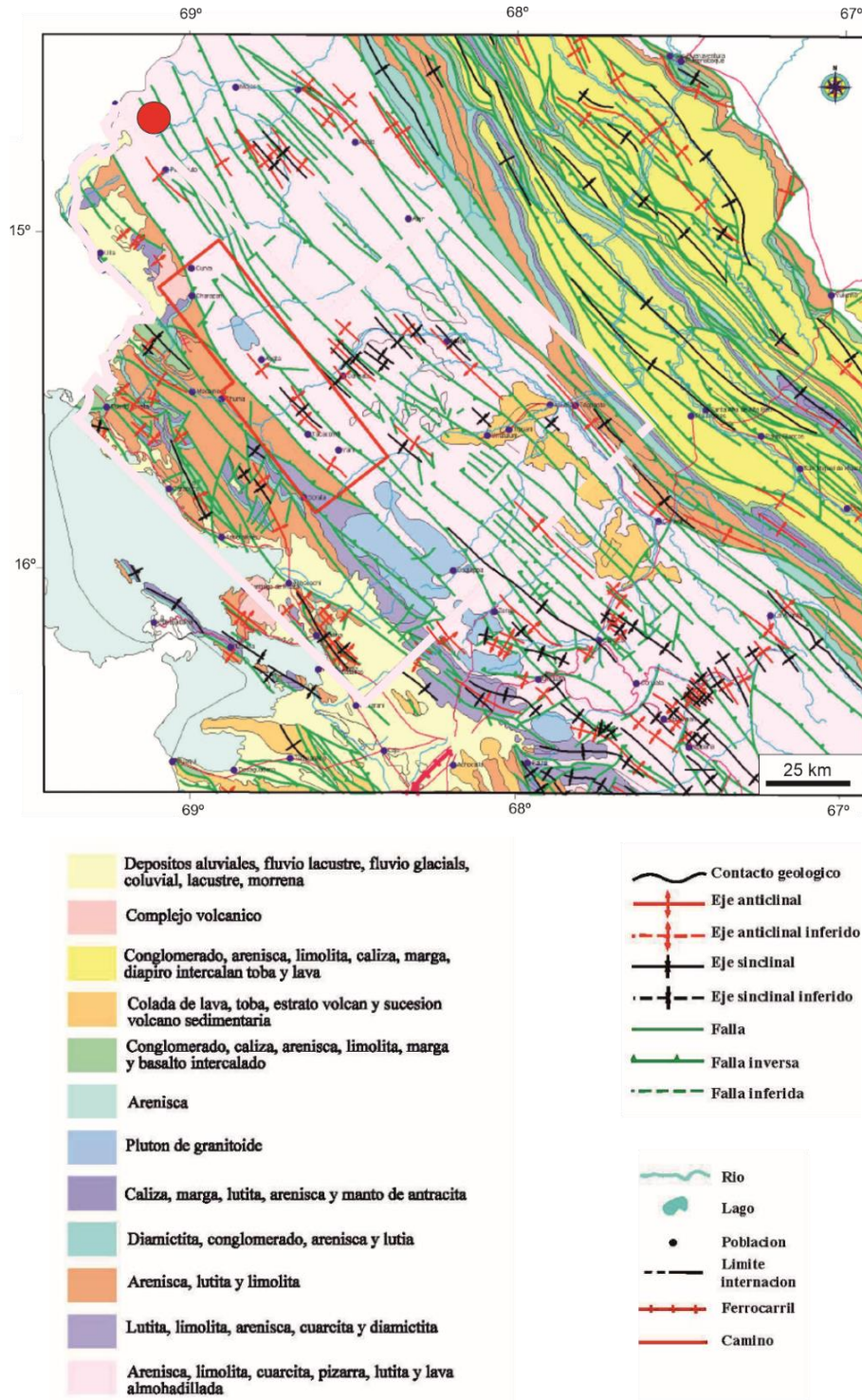


Figura 6. Geología del área de estudio (Japan International Cooperation Agency (2003). En rojo se señala el distrito de Suches.

En Antaquilla, a unos 11 kilómetros de la laguna de Suches, se tiene constancia de la existencia de materiales pesados como el zircón, la turmalina en mayor abundancia, rutilo, anatasa y epidota. Además de conocer la presencia de hornablenda, augita e hiperstena, procedentes de las rocas magmáticas de Altarani y Pelechuco En Suches la presencia de estos es muy similar aunque hay que añadirle la ocurrencia de granate procedente de un intrusivo aguas arriba (Ruiz y Herail, 1992).

Las partículas de oro presentan una forma regularizada, con bordes poco desgastados y un estiramiento nítido muy característico del transporte en ambiente glaciar (Ruiz y Herail, 1992). El oro se distribuye homogéneamente y se concentra en bancos de mayor sección granulométrica. En los concentrados de los sedimentos asociados al oro se halla magnetita, casiterita, arsenopirita, wolframita, marcasita, circón y berilio.

6. Minería

6.1. Minería regional

En esta región se tiene constancia de las prácticas de la minería desde tiempos precolombinos hasta la fecha, donde se siguen usando técnicas de extracción y concentrado arcaicas. En Bolivia existen 1406 cooperativas para la explotación de oro, la mayoría de ellas se encuentran en el departamento de La Paz, y una parte significativa en áreas protegidas, como es el caso de la Área de Manejo Integrado (ANMI) Apolobamba (Figura 7). En esta área se explotan por una parte los yacimientos primarios situados a mayor altura y por otra los yacimientos secundarios en piedemonte altiplánico donde se encuentran los depósitos de placer glacial.

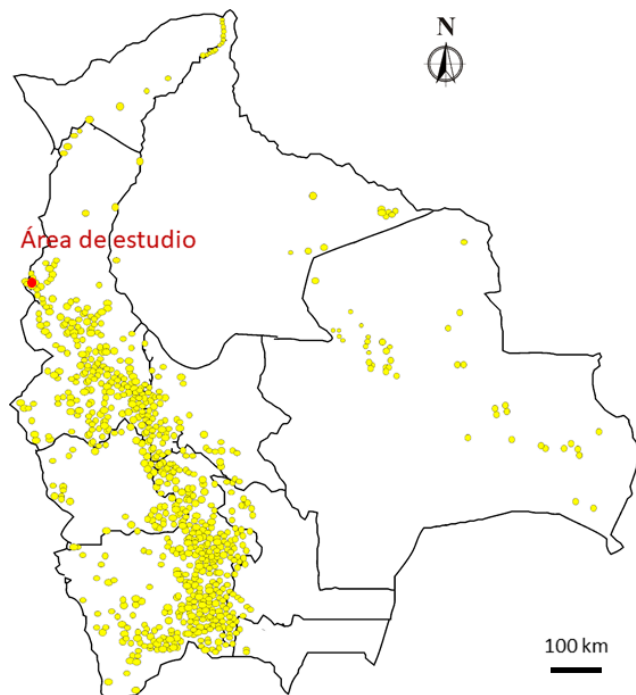


Figura 7. Localización de las cooperativas auríferas en Bolivia (MEDMIN, 2009).



La actividad minera en la cuenca del río Suches se ha intensificado cada vez más desde el año 2006. Este tipo de operaciones mineras en su mayoría no cumplen con los requisitos normativos, dando lugar a actividades informales que son participes de la problemática ambiental que afecta actualmente la zona. El que la zona sea un área protegida magnifica el problema, ya que existen aquí numerosas especies animales que deben ser protegidas.

En los años 2009 y 2010, Coila et al realizaron un inventario de las concesiones mineras en la laguna del río Suches así como el estado que presentaban dichas concesiones. A continuación se explica brevemente el estado de estas concesiones y su evolución entre 2009 y 2010. En el año 2009 se constataron 116 derechos mineros situados en territorio peruano, dónde sólo dos de ellos con estudios de impacto ambiental aprobados. En 2010 se constataron 138 (aproximadamente un 20% más que el año anterior), los cuales 81 se encontraban titulados, 53 en trámite y uno en estado de extinción. En el ámbito boliviano en funcionamiento para el otorgamiento de concesiones mineras funciona de distinta forma; las concesiones se otorgan en función de su medida.

- Concesiones por pertenencias: se trata de una cuadrícula de 100 m de ancho por 100 m de largo. Estas se cuentan por múltiples de cien y se pueden hallar contiguas unas con otras. En el año 2009 se describieron 3 concesiones de este tipo. El año siguiente el número de estas seguía siendo el mismo.
- Concesiones y áreas de contrato minero por cuadrículas: esta se refiere a una extensión de 500 m por 500 m, albergando una superficie de 25 hectáreas. En 2009 se constataron 31 concesiones de esta tipología; el año siguiente en cambio se contaron 24 de ellas.

Además se notifica de la existencia de nueve áreas de explotación (datos del 2009) regidas por contrato minero con COMIBOL (Corporación Minera de Bolivia). En el año 2010 se registraron 12 áreas del contrato minero, suponiendo un aumento del 33% respecto el año anterior. Estos representan el 30% de las concesiones mineras en Suches.

En el año 2010 se evidenciaron la existencia de 114 sitios de operaciones mineras o también llamados “shutes”. La mayoría de ellos se encontraban dentro de los límites de concesión. Algunos pero, se hallaban fuera, en área de Reserva Fiscal (Coila et al., 2010). También se observó la inexistencia de orientación técnica para el desarrollo de las operaciones, el desarrollo de labores de manera improvisada y una recuperación del oro no superior al 60% regido por condiciones precarias y rústicas.

6.2. Caso de estudio: Cooperativa Minera Aurífera Sin Fronteras

La cooperativa aurífera “Sin Fronteras” se ubica en la zona de la laguna de Suches, dentro de la Reserva Nacional de Ulla Ulla, en la Cordillera de Apolobamba. La explotación minera, como muchas otras, se lleva a cabo sobre depósitos fluvioglaciares y aluviales. La extracción del oro del material detrítico se realiza mayormente por separación gravimétrica y posterior amalgamación con mercurio para obtener el concentrado en oro. En el lado peruano, a la otra orilla de la laguna de Suches, se

hallan más explotaciones auríferas que operan en condiciones similares a las del sector boliviano y corresponde al área denominada de La Rinconada.

6.2.1. Descripción de los trabajos mineros

6.2.1.1. Extracción del depósito primario

La cooperativa aurífera de Suches lleva a cabo la extracción de sedimentos y gravas de depósitos fluvioglaciares. El depósito mineral permite el uso de retroexcavadora como elemento principal para extraer el mineral de donde se halla apilado debido a que se trata de materiales no cohesionados. Las palas cargan a volquetas de 24 t que viajan hasta el alimentador dónde vierten el material situadas aproximadamente a una distancia máxima de 150 m. La cooperativa posee dos volquetes y una excavadora (Figura 8).

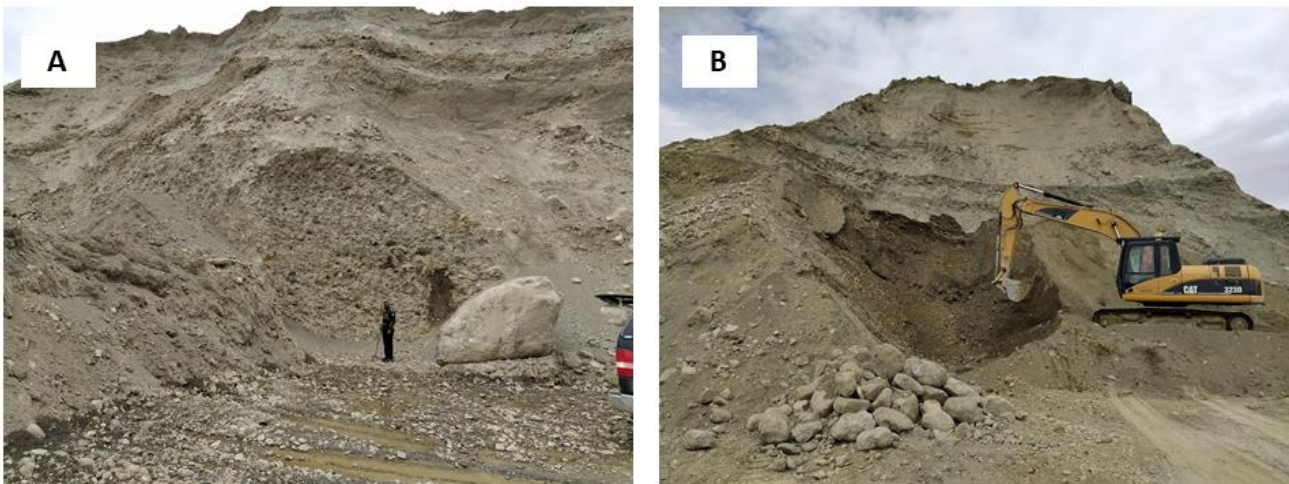


Figura 8. Explotación a cielo abierto. A) Se observa el depósito primario actualmente paralizada su explotación. B) Se observa el material de colas, el cual se explota en la actualidad.

6.2.1.2. Procesamiento del mineral: Concentración gravimétrica

Una vez las volquetas descargan al alimentador situado a más altura, los “mangueros” rocían con agua el material que inicia el descenso por gravedad debido al pendiente. A unos escasos metros se encuentra una reja de barras de 4 cm de ancho dónde se hace una primera separación por tamaños. Pasada esta reja hay la canaleta con alfombras preparada para llevar a cabo la concentración gravimétrica.

La etapa de concentrado por gravedad consta de dos canaletas: una primera de 8,1 m de largo por 2,1 m de ancho y otra de 3,1 m de largo por 1,25 m de ancho. La inclinación de estas varía a lo largo de su recorrido debido a las imperfecciones del terreno pero se calculó un pendiente alrededor del 8 %. Una vez el agua ha pasado por las canaletas se procede a bombearla a una poza de sedimentación dónde posteriormente se va a utilizar de nuevo para el lavado (Figura 9).

Cada cinco horas los “mangueros” cesan su actividad para dar paso al lavado de las alfombras. Estas se extraen una por una y se lavan de forma minuciosa en un recipiente grande. Una vez terminado con todas el ciclo vuelve a empezar y el concentrado se lleva a la retorta. Según los trabajadores de la explotación para el material que ya ha sido lavado anteriormente parra cada lavado de las alfombras se extraen de seis a ocho gramos de oro. Para el depósito “virgen” el lavado se hace de tres a cuatro veces por jornada llegando a extraer 21 gramos diarios.



Figura 9. Canaletas. a) toma de muestra, b, c) lavado de alfombras, d) el agua de las canaletas se lleva a una poza de sedimentación para usarla nuevamente

6.2.1.3 Procesamiento del mineral: amalgamación con mercurio

El proceso de extracción con mercurio empieza cuando el concentrado de las alfombras se procede a lavar mediante uso de bateas. Seguidamente se realiza este proceso se usa un imán que sirve para separar el material magnético con el que no lo es. Luego se añade el mercurio al concentrado que poco a poco va capturando las partículas dando lugar a la amalgama de Hg-Au.

El concentrado se lleva a la retorta donde se vierte en un crisol. Con la ayuda de un soplete se alcanza la fusión del mercurio el cual se separa de la amalgama en forma de gas. Las retortas están dotadas

de una chimenea de extracción de gases y un sistema de recuperación del mercurio que normalmente tiene un grado elevado de recuperación (Costa, 2009). El uso de ellas puede llegar a reducir las emisiones hasta más del 99%. Este proceso se lleva a cabo en un lugar con chimenea de extracción de humo y con el uso de guantes y gafas de seguridad.

En la Figura 10 se muestra el diagrama de flujo de la planta de la cooperativa minera.

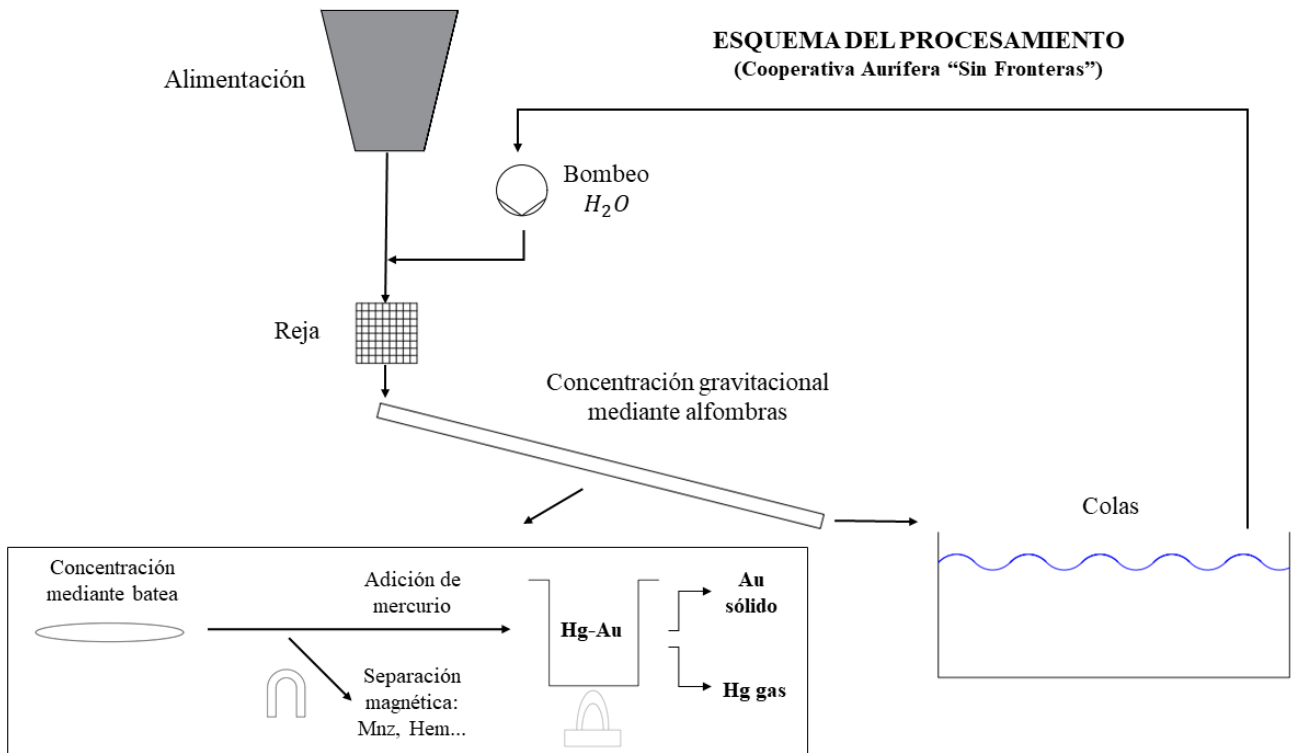


Figura 10. Diagrama de flujo en la Cooperativa Aurífera "Sin Fronteras".

7. Materiales y métodos

El muestro de los distintos materiales que se exponen de forma detallada a continuación se realizaron el día 6 de septiembre del 2021. Debido a la naturaleza y variabilidad de las muestras se exponen en tres apartados distintos para obtener así una mayor clasificación. En el presente trabajo se pretende analizar y caracterizar los materiales valiosos del depósito de placer aluvial de Suches explotado por la cooperativa aurífera "Sin Fronteras".

7.1. Muestreo material de alimentación y procesamiento

Se tomaron muestras del depósito natural primario formado por gravas y arenas constituidas por particular más o menos redondeadas debido a su naturaleza aluvial. Se tomaron tres muestras en distintos puntos referentes al depósito. También se tomaron muestras de un depósito de colas de un procesamiento antiguo, el cual se está comenzando a explotar de nuevo. El peso de las muestras quedó



en 11,35 kg para el depósito primario, 8,26 kg para el procesamiento antiguo y 12,13 kg para la canaleta. Para la realización de estas muestras se descartaron la toma de grandes bloques ya que estos no se utilizan en la alimentación de la canaleta.

Seguidamente se realizó un muestreo en las distintas fases del procesado del mineral cómo el concentrado en alfombras, el material de retorta o el extraído con imán que se comentará más adelante. Se puede consultar en detalle las distintas muestras tomadas en el apartado de Anexos.

Los materiales fueron procesados en el laboratorio de procesamiento de minerales de la Universidad Técnica de Oruro, UTO. Los posteriores trabajos tuvieron lugar en distintos lugares de España durante los meses de septiembre a junio de 2021 y 2022.

7.2. Muestreo de cabello

El muestreo de cabellos se ha realizado el mismo día que el de los materiales rocosos. Este pertenece a cabello humano de los trabajadores de la cooperativa minera “Sin Fronteras”. Este se efectuó con el fin de valorar el contenido de mercurio en el cuerpo de los trabajadores de la cooperativa. El muestreo se realizó en todos los casos de la misma manera, cortando cabello lo más cerca posible de la parte inferior de la nuca. Los cabellos se colocaron en una bolsa que se mantuvo en el refrigerador la mayor parte del tiempo posible.

La toma de cabello resulta ser una muestra representativa por lo que respecta la ingesta de mercurio en la dieta y es además, una técnica sencilla y no invasiva (RNC, 2000). Las concentraciones en el pelo más alejadas de la raíz proporcionan una mayor información sobre la exposición a lo largo del tiempo. (Poulin & Gibb, 2008). Antes de la toma de cabello se obtuvo información acerca de los donadores en forma de cuestionario. La Tabla de respuestas y resultados analíticos se encuentran en los Anexos de este trabajo. Las preguntas se muestran a continuación.

- Nombre del entrevistado? Respuesta nombre.
- Edad del entrevistado? Respuesta años.
- Puesto de trabajo? Respuesta puesto.
- Hábito de fumar? Respuesta (S/N)
- Hábito de beber? Respuesta (S/N)
- Come pescado? Respuesta (S/N)
- Con qué frecuencia? Para respuestas afirmativas a la pregunta anterior, Respuesta número/mes.
- Tiempo que lleva trabajando en la cooperativa minera? Respuesta años.

Las preguntas sobre la ingestión de pescado son importantes ya que ciertas partes del pescado son propensas a almacenar mercurio. En esta zona se come pescado del lago Titicaca, el cual está rodeado de zonas de minería aurífera, donde se utiliza mercurio habitualmente para el procesamiento del oro.



7.3. Métodos analíticos

7.3.1. Granulometría

Estos trabajos se realizaron para determinar en las muestras la distribución del tamaño de partículas de cada una. Los tamices se colocan de mayor tamaño a más fino en orden descendente para que el material de menor tamaño vaya pasando por los tamices de abertura mayor y el grueso quede en los niveles superiores.

Las muestras fueron tratadas por medios húmedos debido a la gran concentración de finos que contenían estas. Los trabajos de granulometría se desarrollaron en los laboratorios de la Universidad Técnica de la ciudad de Oruro, Bolivia (UTO). Para todas las muestras se llevaron a cabo con el material en húmedo debido a la mayor precisión que presenta hacerlo respecto en seco. Las mallas utilizadas para el análisis granulométrico fueron: 6,73 mm, 2,38 mm, 2 mm, 1,19 mm, 841 μm , 595 μm , finos inferiores a 75 μm . Para la realización de estos análisis se han usado tres muestras: SH – 1, SH – 2, SH – 3.

Una vez obtenidos los datos granulométricos se procedió a la molturación del material para su posterior cuarteo y análisis químico y demás ensayos. Así, la molturación tuvo lugar en la Universidad Técnica de Oruro (UTO). Se desechó gran parte de la muestra debido a la menor demanda de material que se necesita para cada ensayo de laboratorio, aun así se tomó alrededor de 1,5 kg para cada una.

7.3.2. Análisis químico

Los análisis químicos se realizaron para conocer principalmente el contenido de oro e investigar la composición del concentrado para determinar que minerales acompañan al oro. Esto ha sido gracias a que en la cooperativa el responsable había manifestado un problema que se produce al intentar recuperar el oro a partir de la amalgamación directamente del material que se acumula en la alfombra con el mercurio en la retorta. Este era que el oro adquiriría una coloración negra.

Las muestras tomadas en campo se enviaron a los laboratorios ALS MINERALS (ALS Laboratory Group S.L) para el cual se ha seleccionado el método AU-GRA21 con límites de detección de entre 0,05 y 1000 ppm.

También se ha analizado la muestra del material extraído a partir del contado de la alfombra mediante un imán (muestra SH – 8). El método analítico fue el ME-MS81TM+ME-ICP06. Se han determinado gran cantidad de elementos traza: Ba, Ce, Cr, Cs, Dy, Er, Eu, Gd, Hf, Ho, La, Lu, Nb, Nd, Pr, Rb, Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Tm, Th, U, V, W, Y, Yb y Zr.

7.3.3. Difracción de rayos X

La difracción de polvo de rayos X (DRX) permite identificar minerales de una muestra cualitativa y semicuantitativamente. Se trata de un análisis estructural el cual permite identificar la geometría tridimensional de materiales cristalinos.



La preparación de la muestra consistió en cuartear el total de ella y, para obtener un número de granos elevado, se molturaron con un mortero de ágata hasta alcanzar un tamaño de partícula de 60 μm aproximadamente. La caracterización mineralógica mediante DRX se ha realizado para determinar los minerales presentes en el concentrado magnético con el fin de obtener información acerca del proceso que produce el ennegrecimiento del concentrado de oro.

El análisis DRX se efectuó con un difractómetro de polvo Bruker D8-A25, con radiación $K\alpha\text{Cu}$ ($\lambda = 1,5418 \text{ \AA}$), monocromador de grafito y detector de centelleo, bajo condiciones del tubo de rayos X de 30 mA y 40 kV. La velocidad angular fue de 0,05 (2θ) cada 3 s, con un rango de barrido de 2θ entre 5° y 60° . Para interpretar los resultados se ha utilizado el software X'Pert HighScore Plus que permite realizar una valoración semicuantitativa del contenido en los diferentes minerales, siempre y cuando se encuentren en una concentración a partir del 1% .

7.3.4. Microscopía electrónica

Para realizar la caracterización de la textura de los materiales, así como contribuir a su identificación y determinación de su quimismo se ha utilizado un microscopio electrónico de barrido (SEM). Se ha utilizado un equipo JEOL, JSM-7001F ubicado en el Sevei de microscopia electrónica del Campus Besòs de la UPC. Este equipo permite la caracterización y observación de muestras sólidas mediante imágenes obtenidas con electrones secundarios y retrodispersados, así como la caracterización de materiales por espectrometría de energía dispersiva de raos X de alta resolución. Permite realizar análisis químicos cualitativos y semicuantitativos.

7.3.5. Análisis térmico diferencial-termogravimétrico

El análisis térmico diferencial-termogravimétrico (ATD-TG) se utiliza para ver el comportamiento de una muestra al ser sometida a temperatura. El análisis mide el aporte de calor necesario para aumentar la temperatura de una muestra; los cambios en la muestra se miden con respecto a un material de referencia estándar, de manera que se mide el cambio de temperatura diferencial entre la muestra y la referencia para una cantidad fija de entrada de calor. Cuando se inicia el calentamiento del horno, la referencia y la muestra comienzan a calentarse con un ligero retraso en función de su respectiva capacidad calorífica.

Cuando la temperatura aumenta y se produce la fusión en la muestra, por ejemplo, el aumento de la temperatura se detiene (Fig. 11a) y la diferencia de temperatura entre la muestra y el patrón aumenta, produciéndose un pico endotérmico. Cuando la fusión termina, la curva de temperatura vuelve rápidamente a la línea de base (Figura 11b). Por lo tanto, a partir de esto, podemos detectar la temperatura de transición de la muestras y la temperatura de reacción a partir de los picos generados por la diferencia de temperatura entre la muestra y el patrón.

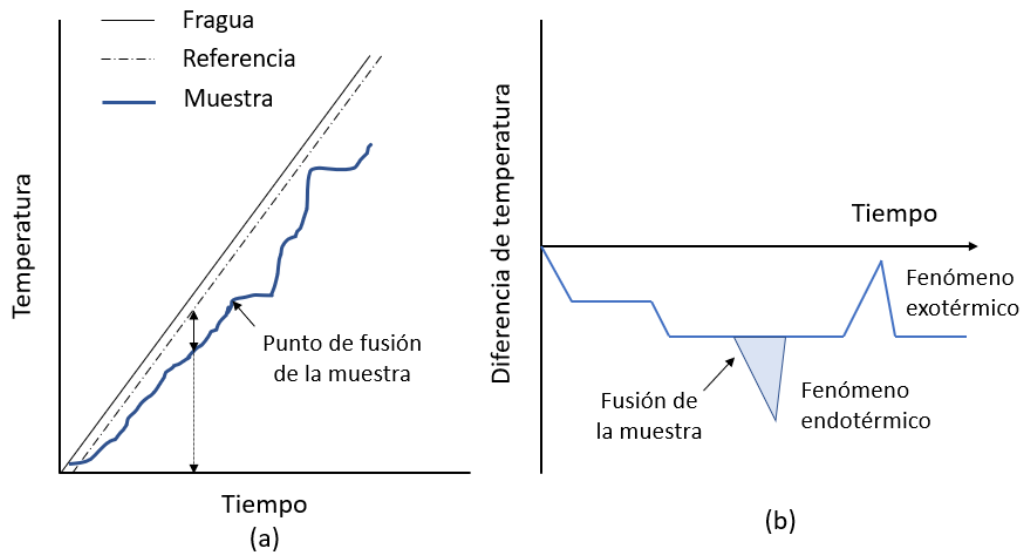


Figura 7. Principios en que se basan las técnicas de ATD (<https://www.hitachi-hightech.com/global/products/science/tech/ana/thermal/descriptions/dta.html>).

En el análisis termogravimétrico (TGA), se registran los cambios de masa resultantes del aumento de la temperatura. Ambas técnicas se realizan simultáneamente. El instrumento utilizado fue un Netzsch (Modelo STA 409C). Los análisis se llevaron a cabo en el rango de temperatura de 25-1200 ° C bajo el aire atmósfera, a un caudal constante de 80 mL / min, en un crisol de alúmina (Al₂O₃) y a una velocidad de calentamiento de 10 ° C / min. La cantidad de muestra analizada fue ~ 80 mg.

7.3.6. Análisis de mercurio en cabellos y material aurífero

Los cabellos fueron analizados en el Laboratorio de Biogeoquímica de Metales Pesados (IGeA) de la Escuela de Ingeniería Minera e Industrial de Almadén de la Universidad de Castilla la Mancha y los llevó a cabo la Ing. Karla Villegas Flores.

Para la realización de los análisis de cabello se utilizó el espectrómetro de absorción atómica con vaporización electrotérmica Lumex RA-915+ con un accesorio de pirolisis PYRO-915+. La muestra introducida fue de 10 a 15 g de cabello.

También se analizaron mediante esta técnica materiales procedentes del depósito natural, del concentrado mediante la alfombra y de las escombreras producto del procesamiento antiguo de la zona.

8. Resultados

8.1. Granulometría

El material del depósito natural, presenta un tamaño de partícula muy variado, incluso con bloques de varias decenas de centímetros. No, obstante el material que es procesado es el que pasa por un tamiz que no supera los 4 cm. Este material seleccionado se halla mayoritariamente entre 0,9-6,73mm. De éste, un 48,89 % de la masa total se encuentra en un tamaño inferior a 1.19 mm (Figura 12). También se utiliza el material correspondiente a una escombrera de un procesamiento anterior. En este caso, aunque el material ha sido lavado anteriormente presenta una distribución parecida a la curva anterior. Para el material del depósito natural y el material de reutilización de las escombreras puede observarse una similitud en cuanto a distribución de tamaño de partícula (Figura 12). Esto indica que el material tomado es representativo del depósito mineral. Además el procedente de la alimentación varía su distribución con el resto a partir del tamaño mayor de 900 μm , debido a la rejilla que se encuentra antes de la canaleta para descartar el material grueso.

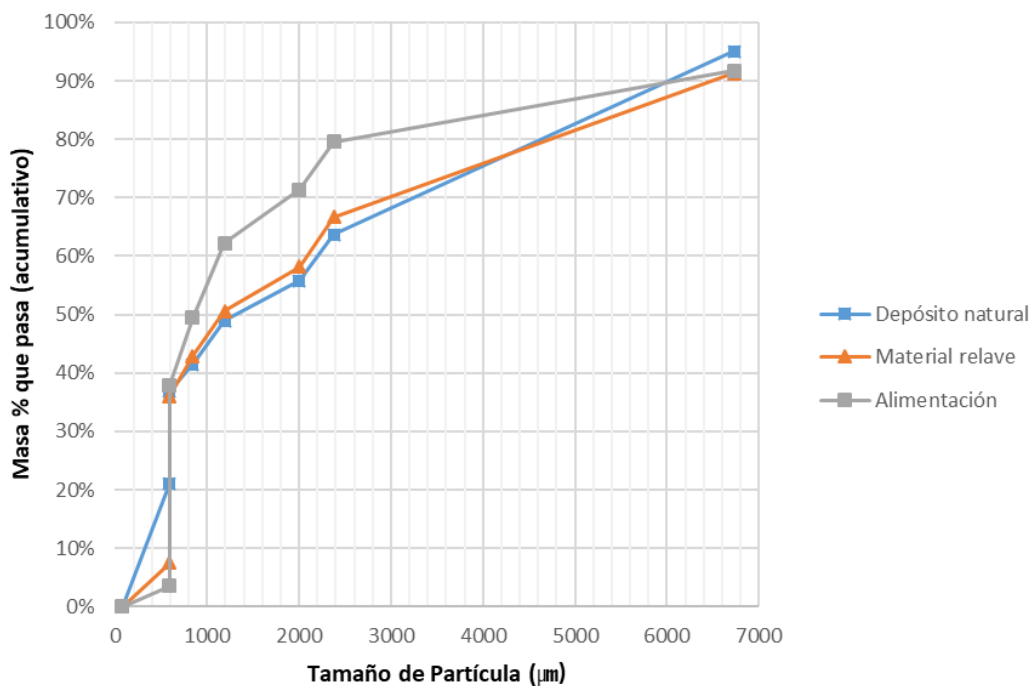


Figura 8. Distribución de tamaños de partículas de las muestras del depósito, reutilización de escombreras y alimentación respectivamente.

8.2. Composición química

La obtención de muestras representativas en material donde el oro es muy escaso y se halla en granos de tamaño relativamente grande es muy difícil, ya que se necesitan volúmenes extraordinariamente grandes. Por ello, únicamente se ha analizado el material que se separa del concentrado obtenido a partir del lavado de la alfombra mediante un imán. Este material contiene una gran cantidad de Fe_2O_3 , 36,00 % en peso y también destaca el elevado contenido en P_2O_5 , con un 4,00 % en peso (Tabla 1).

En cuanto a los elementos traza destaca la gran riqueza en elementos del grupo de las tierra raras (REE), con más del 1 % en peso en Ce, en Nd y en La (Tabla 1).

Tabla 1. Composición química del material magnético extraído del concentrado de la alfombra.

Óxidos, %		Trazas, ppm	
SiO ₂	30,90	HF	269
Al ₂ O ₃	4,47	Nb	135
Fe ₂ O ₃	36,00	Sn	8650
CaO	0,15	Ta	8
MgO	0,51	Th	550
Na ₂ O	0,35	U	81,9
K ₂ O	0,61	V	352
Cr ₂ O ₃	0,04	W	158
TiO ₂	5,85	Y	972
MnO	0,31	Zr	>10000
P ₂ O ₅	4,00		
SrO	0,05	Ce	>10000
BaO	0,01	Dy	437
LOI	3,92	Er	84,1
Total	87,17	Eu	650
		Gd	>1000
		Ho	48,8
		La	>10000
		Lu	7,61
		Nd	>10000
		Pr	>1000
		Sm	>1000
		Tb	145
		Tm	9,97
		Yb	68
		Σ REE	>1.450,48

En la Tabla 2 para los elementos no pertenecientes a REE se puede observar la elevada concentración de Zr, Sn principalmente. Para las REE se han encontrado grandes concentraciones de Ce, La, Nd, Gd, Pr y Sm.

En cuanto al oro, este se ha analizado en el yacimiento primario, en la zona de alimentación y otro en las colas de procesamiento. Para el material de alimentación, se hicieron los análisis a partir de las distintas granulometrías. Los resultados mostraron una concentración inferior a los <0,05 ppm de

contenido de Au aunque para el material del yacimiento primario correspondiente a la granulometría -28 mallas resultó de 0,37 g/t en Au.

8.3. Mineralogía

La mineralogía del material procedente de la alfombra, a pesar de tratarse de un concentrado gravimétrico del material de alimentación, contiene principalmente cuarzo, algunos filosilicatos y cantidades significativas de hematites. También contiene algunos filosilicatos, principalmente biotita, sericita y clorita. Se ha detectado la presencia de casiterita monacita, llegando contenido de ésta al 1%, rutilo y circón. El oro no es detectado ya que esta técnica no es sensible para composiciones inferiores a 0.5-1 % en peso.

El material del concentrado magnético contiene principalmente hematites y cuarzo. También hay presencia de biotita y monacita. A continuación en la Tabla 2 se muestran las concentraciones en peso %. Se debe tener en cuenta que los análisis de DRX son de una superficie, por lo que los filosilicatos se disponen en la superficie de manera que acostumbra a salir sobrevalorados.

En la Figura 13 se muestra la comparativa de la mineralogía para el concentrado de las alfombras y el material magnético que se concentra mediante un imán. En ella se puede observar una gran cantidad de cuarzo al pico más alto. Para el concentrado magnético hay presente una mayor cantidad de monacita y hematites. Para la posición de 28,9 % se halla un pico de monacita dónde en el concentrado gravitacional no existe.

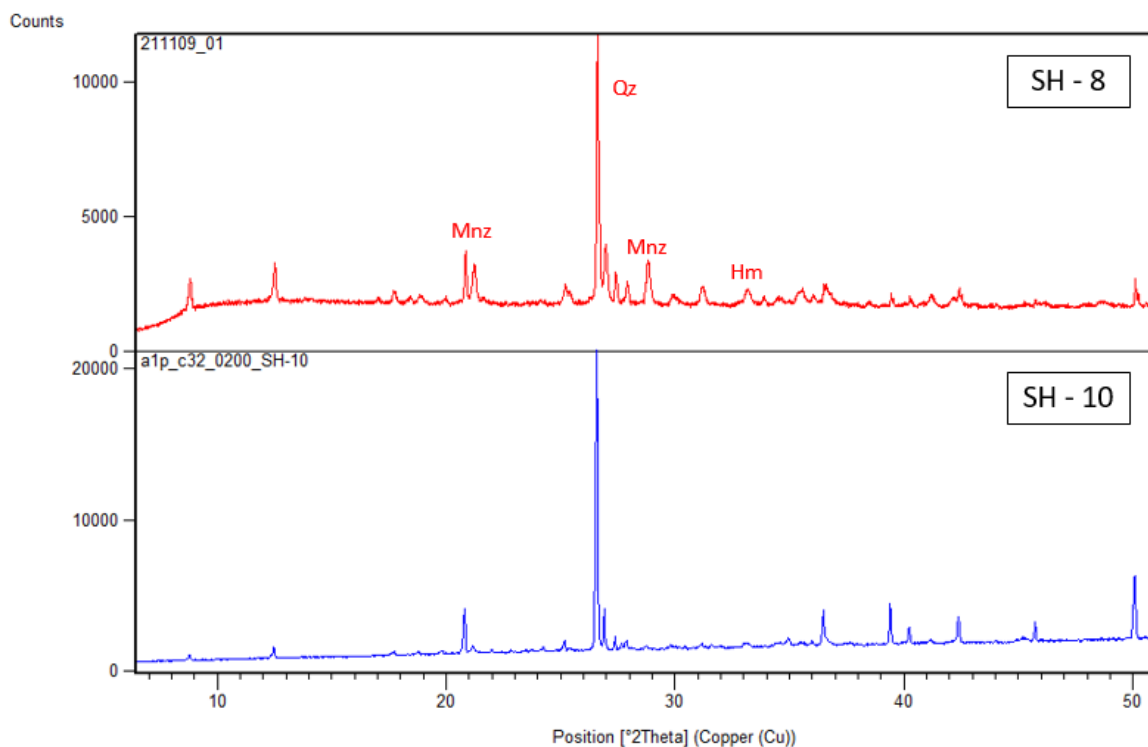


Figura 9. Diagramas de difracción con rayos X comparativos entre los materiales que forman el concentrado de la alfombra y los del material separado de éste mediante un imán y que constituyen el concentrado magnético.

Tabla 2. Concentrado en peso %, para la fracción magnética de concentrado con alfombra.

Mineral	Concentrado alfombra	Concentrado magnético
Cuarzo	32	28
Rutilo	1	2
Monacita	1	4
Hematites	10	50
Casiterita	-	3
Zircón	-	2
Clorita	6	2
Biotita	11	9
Sericita	37	-
Albita	3	-
Goethita	1	-

Esta composición mineralógica ha podido ser corroborada mediante la observación al SEM (Figura 14).

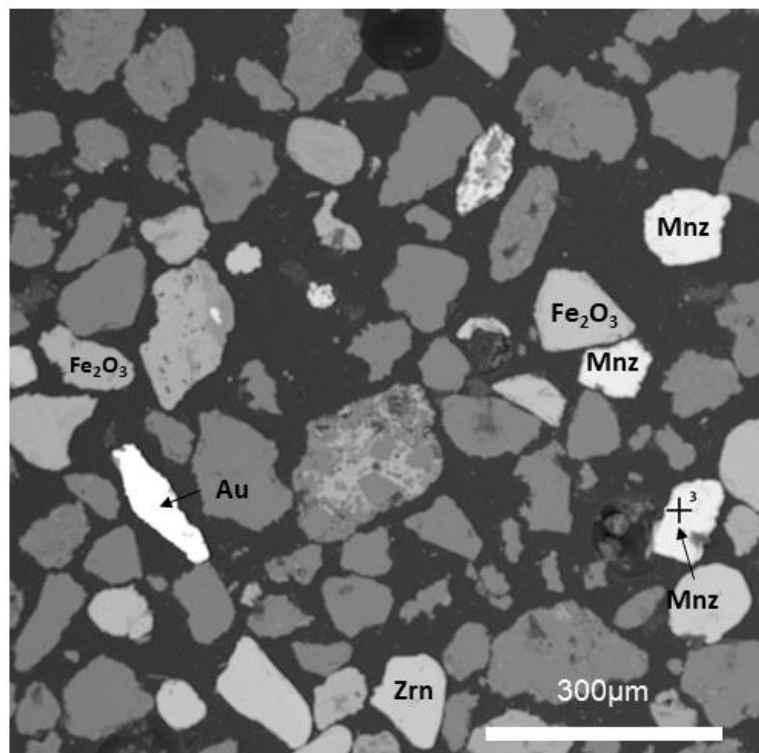


Figura 10. Imagen de SEM procedentes del lavado de alfombras. La imagen muestra una visión general de los diferentes minerales del yacimiento de Suches.

8.4. Química mineral

8.4.1. Monacita

La monacita es un fosfato de tierras raras principalmente rica en Ce, de fórmula general $Ce,Nd,La,Sm)PO_4$, aunque puede llegar a tener diferentes composiciones (Tablas 3 y 4). En la Tabla 4 se muestra el concentrado por alfombras en composiciones químicas de diferentes granos de monacita determinadas a partir del SEM. Aquí aparece un mineral que podría tratarse de la familia de las Allanitas (All) que en este caso es rica en Ti y Th.

Tabla 3. Composición química de los minerales de tierras raras procedentes del concentrado por alfombras.

Element	43	45a	45b	45c	45d	46b	47d	48a	53a	55a	56a	56b	58a	59a	60a	60b	61a	62a	63a
%																			All
Ce	33.32	40.74	42.65	42.65	38.67	42.38	22.72	39.99	29.65	38.26	39.81	41.01	39.24	37.98	39.05	31.87	41.50	42.45	27.96
Nd	26.19	16.51	17.41	17.41	16.47	17.57	39.28	18.80	33.97	19.18	17.29	18.80	20.38	16.26	18.70	27.72	19.22	17.66	5.76
La	8.49	18.47	19.32	19.32	16.60	13.63	4.03	15.70		17.45	16.15	18.69	14.00	15.84	17.05	7.48	17.65	18.46	14.13
P	12.34	11.06	11.89	11.89	11.44	11.38	9.30	11.62	12.53	11.44	12.46	12.20	12.20	10.90	11.09	10.95	12.32	11.97	
Pr	5.96	3.92			4.32	6.07	7.16	5.29	9.66	4.85	4.61		5.22	5.23	5.57	4.38			
Si	1.09						4.54												11.70
Fe																			6.17
Y					1.78				1.74										
Sm														4.18		6.34			
Al							2.89												
Ca																			3.56
Gd																			
Sb		0.99																	
Ti																			10.55
Th																			4.32

at	43	45a	45b	45c	45d	46b	47d	48a	53a	55a	56a	56b	58a	59a	60a	60b	61a	62a	63a
Ce	14.22	20.05	20.37	20.37	18.43	20.25	9.65	19.30	13.22	18.36	18.21	19.10	18.50	18.57	19.06	15.06	19.28	19.72	9.94
Nd	10.86	7.89	8.08	8.08	7.62	8.16	16.20	8.81	14.72	8.94	7.68	8.51	9.33	7.72	8.86	12.72	8.67	7.97	1.99
La	3.66	9.17	9.31	9.31	7.98	6.57	1.73	7.64		8.45	7.45	8.78	6.66	7.81	8.39	3.57	8.27	8.65	5.07
P	23.83	24.63	25.70	25.70	24.65	24.59	17.86	25.38	25.27	24.84	25.78	25.69	26.03	24.11	24.47	23.41	25.90	25.15	
Pr	2.53	1.92			2.05	2.89	3.02	2.54	4.28	2.31	2.10		2.45	2.54	2.70	2.06			
Si	2.31						9.61												20.75
Fe																			5.51
Y					1.33				1.22										
Sm														1.91		2.79			
Al							6.37												
Ca																			4.43
Sb		0.56					1.34												
Ti																			10.98
Th																			0.93

En la Tabla 4 se muestra la composición de diferentes puntos de la muestra procedente del concentrado magnético. En ella se observa cómo principalmente el Ce seguido del Nd, La y P con los elementos principales. En algunos casos (análisis 28 y 34) la composición química del mineral se corresponde con un silicato del grupo de la Allanita, probablemente allanita-(Ce).

Tabla 4. Composición química de los minerales de tierras raras procedentes del concentrado magnético.

Element	21	22a	22b	23	24	27a	27b	33	41	28	34
%										All	All
Ce	38.22	33.62	35.03	36.34	36.07	38.44	33.06	39.09	33.46	15.64	15.52
Nd	16.66	24.17	16.79	17.83	16.55	16.97	23.82	17.79	23.35		
La	13.63	8.51	11.30	15.67	15.78	16.43	9.32	20.30	10.18	7.23	6.75
P	12.39	12.86	10.88	12.35	12.37	12.96	11.35	11.54	11.31		
Pr	5.37	5.46	5.07	4.38	4.94				5.03		
Si		1.30	5.09	0.72						19.75	20.92
Fe			2.31							10.17	13.22
Y				0.55							
Sm							5.67				
Al										10.89	10.41
Ca										7.25	10.03
Gd									3.67		

at	21	22a	22b	23	24	27a	27b	33	41	28	34
Ce	15.30	12.98	13.13	15.10	14.19	14.60	14.22	18.18	14.11	3.23	3.43
Nd	6.48	9.07	6.11	7.19	6.32	6.26	9.96	8.04	9.56		
La	5.50	3.31	4.27	6.57	6.26	6.30	4.04	9.53	4.33	1.51	1.51
P	22.44	22.46	18.44	23.20	22.01	22.27	22.10	24.28	21.57		
Pr	2.14	2.10	1.89	1.81	1.93				2.11		
Si		2.51	9.51	1.50			2.60			20.38	23.10
Fe			2.17							5.28	7.34
Y				0.36							
Sm							2.27				
Al										11.69	11.97
Ca										5.24	7.76
Gd									1.38		

Se ha podido observar una cantidad considerable de monacita en SEM. Esta presenta una morfología ideomórfica con tamaños no superiores a los 300 μm . La mayor parte de los granos observados presentan un grado de liberación muy elevado. En la Figura 15 se presentan una serie de granos que pertenecen al concentrado magnético donde se puede observar otros minerales como el zircón o la ilmenita.

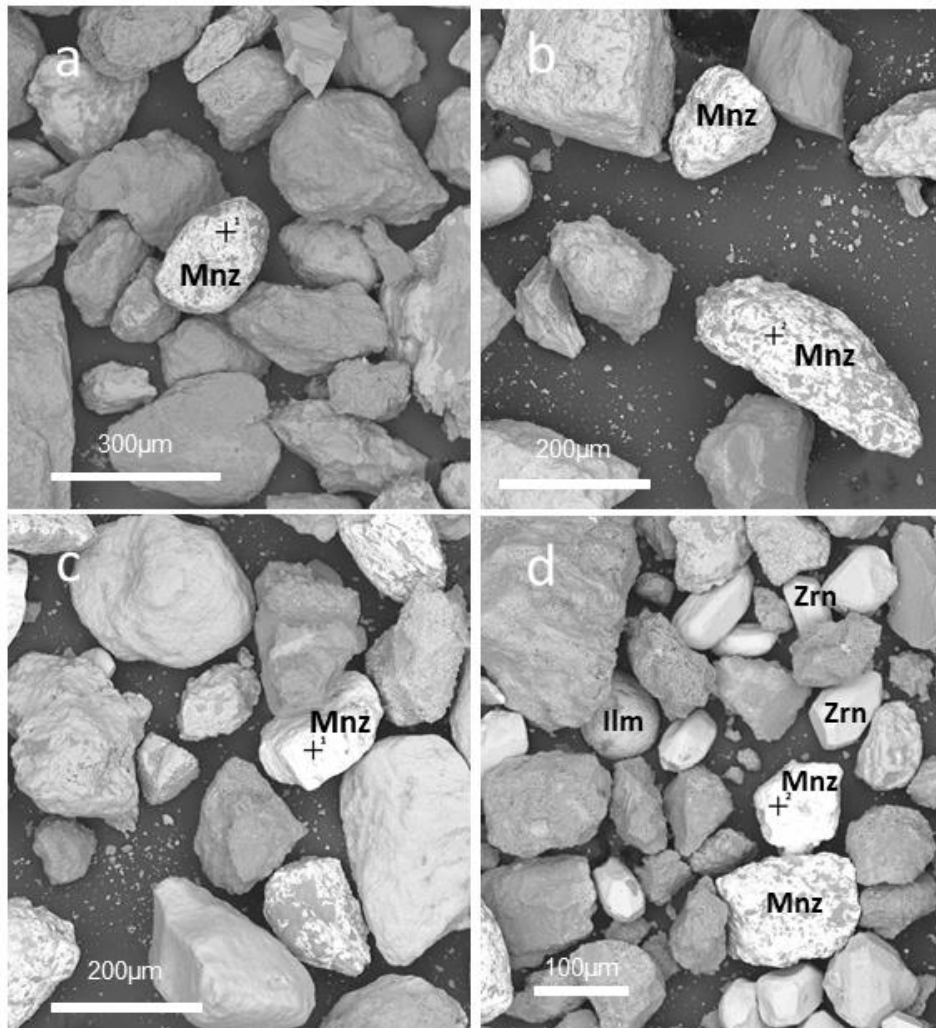


Figura 11. Imágenes SEM del concentrado magnético. a, b, c) vista de fragmentos de monacita. d) vista de fragmentos de monacita, zirconio e ilmenita.

8.4.2. Morfología y composición de las partículas de oro

Las partículas de oro presentan un grado de liberación elevado debido al tipo de depósito que nos encontramos. El oro se observa totalmente liberado, aunque en ocasiones presentan algún resto de minera acompañante, principalmente cuarzo. Se encuentra en forma de pepitas alrededor de la magnitud de 330 µm de longitud y 100 µm de ancho. En la Figura 16 tomada con el microscopio SEM se observa un grano de oro procedente del concentrado de alfombras que se encuentra totalmente liberado.

En cuanto a su composición se trata de oro casi totalmente puro, el EDS que acompaña el SEM no ha detectado contenidos de Ag u otros elementos en los granos de oro.

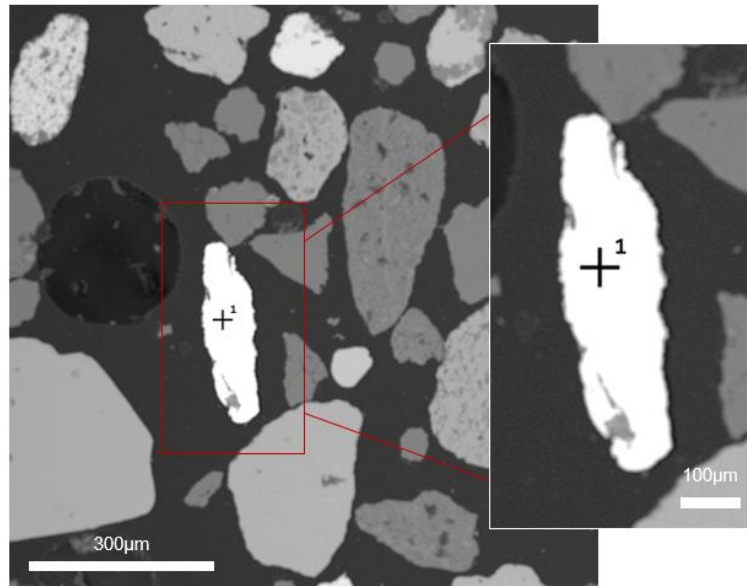


Figura 12. Imagen de SEM de un grano de oro totalmente liberado con morfología parcialmente redondeada y morfología laminar.

En la Figura 17 se presentan una serie de imágenes tomadas con SEM donde se pueden observar partículas de oro, apreciándose sus características en cuanto a liberación, morfología y tamaño.

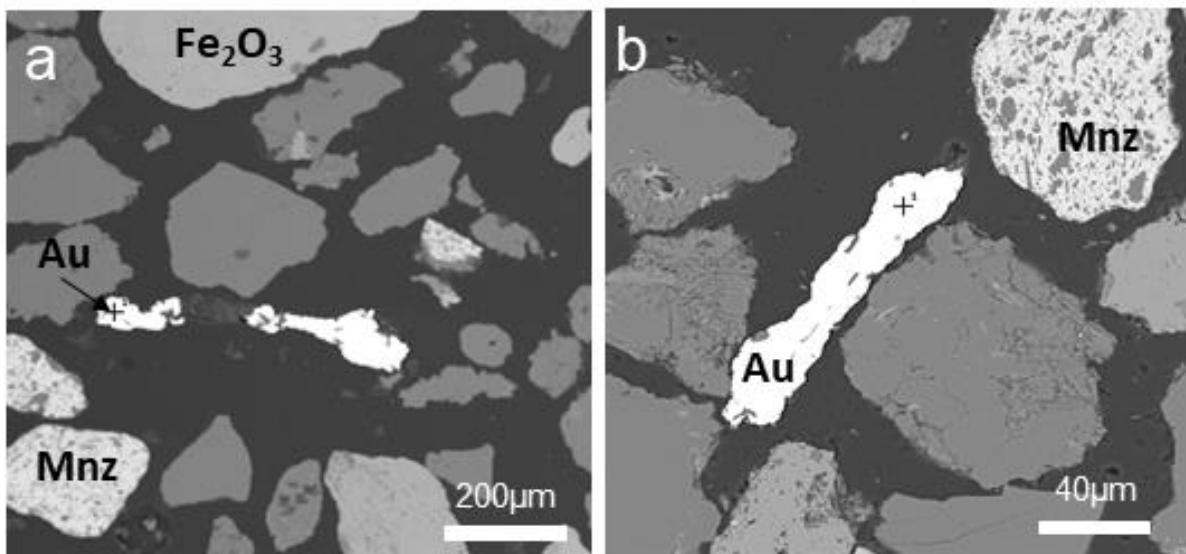


Figura 13. Imágenes de SEM. Se observan distintas trazas de oro pertenecientes al concentrado por alfombras. En la imagen a, c) se observa un grano de oro rodeado de monacita y hematites. En b) un grano de oro al lado de una monacita.

Aunque las imágenes de la Figura 17 representan el caso más general, donde las partículas se encuentran totalmente liberadas, en la Figura 18 se puede observar un grano de oro con el que se encuentra asociado a cuarzo.

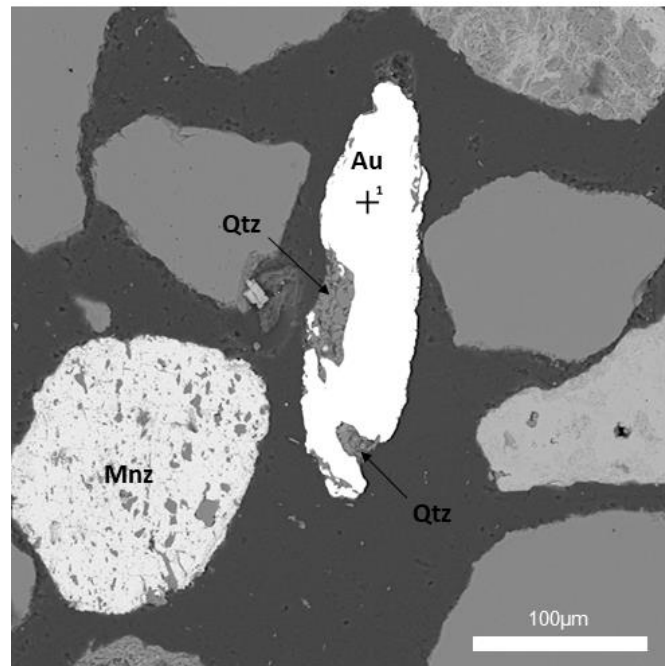


Figura 14. Imagen SEM del concentrado por alfombras. Se observa un grano de oro con impurezas de cuarzo al lado de una monacita.

Los granos de oro presentan una morfología redondeada con claros indicios de rodamiento. Esta se debe a la naturaleza del depósito que es aluvial por lo que los granos están en contacto con otros elementos que lo van moldeando.

8.5. Contenido de mercurio en cabellos

Como ya se ha mencionado anteriormente, el uso del mercurio para la extracción de oro produce una contaminación al medio ambiente y también afecta a la salud humana. En el pasado se han realizado informes cerca de la zona de estudio que inciden en la problemática del mercurio.

Los resultados de los análisis del cabello mostraron que una cantidad significativa de mineros y de personas que viven en comunidades mineras tiene un contenido de Hg superior al umbral para el cabello humano. Esto es debido al grado de encapsulamiento que se encuentran los granos por lo que se requiere de mayor mercurio para llevar a cabo su liberación. En el caso de los mineros de placer, sólo se analizaron los mineros que están en contacto directo con el mercurio y el Hg en el cabello era menor. En la Figura 19 se compara el Hg en cabello referentes a dos explotaciones auríferas en depósitos primarios con la de Suches. En la Tabla 3 se puede observar los resultados de análisis referentes al contenido en mercurio para distintas muestras.

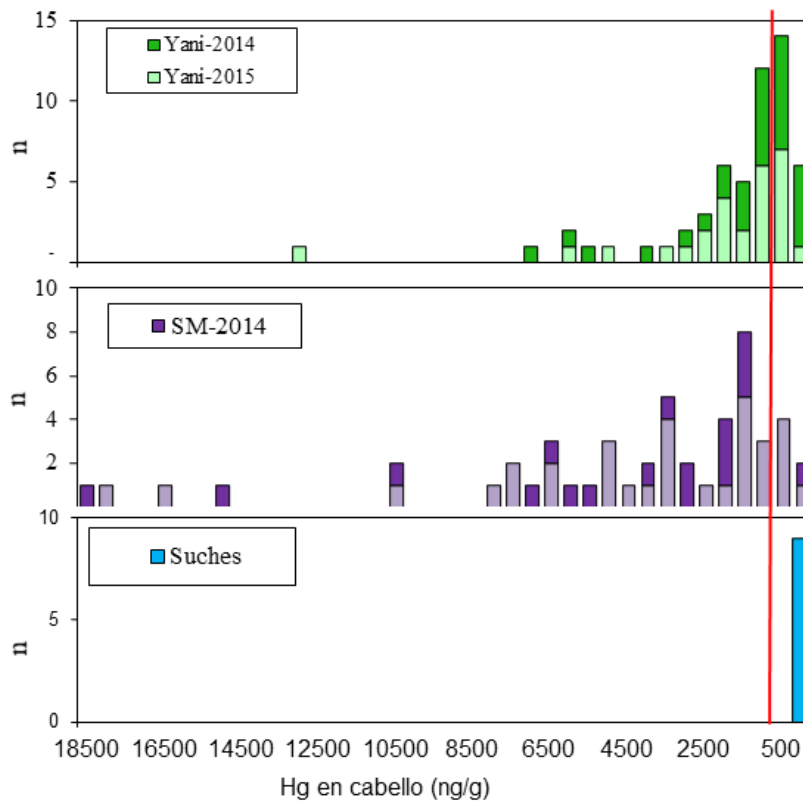


Figura 15. Comparativa de concentraciones de mercurio en el cabello de habitantes de los sectores de Yani, Señor de Mayo (Freixas Berenguer, 2016) y Suches. La raya roja vertical indica el límite permisible establecido por WHO para el contenido en cabellos humanos (WHO, 2006).

Tabla 5. Resultados de concentración de mercurio en materiales del depósito de Suches.

Muestra	Material	Hg-T, ng/g
SH-1	Mineral del depósito	11
SH-8	Concentrado de alfombra	36
SH-9	Antiguas colas en procesamiento	3428

La concentración de mercurio en los cabellos (Figura 20) no sobrepasa los niveles límites de exposición a esta sustancia por lo que en la actualidad no supone un peligro de gran envergadura. Aun así estos datos podrían variar si se sigue procesando el material procedente de la reutilización de escombreras antiguas o también llamado por los mineros locales, “relaves”.



8.6. Alternativa al uso del mercurio: obtención del oro mediante bórax

El método del bórax consiste en la adición de bórax al concentrado aurífero para ser beneficiado por pirometalurgia, permitiendo de este modo alcanzar temperaturas más bajas que si el concentrado no tuviese ningún aditivo. El método requiere un bajo coste de operatividad, se obtiene una buena recuperación, presenta una baja toxicidad y es de fácil obtención (Eppers, 2017). El bórax es más barato que el mercurio y su posesión está regularizada además de que se precisa de una infraestructura de similar complejidad (Køster-Rasmussen et al., 2016). El oro que se obtiene es de mayor pureza por lo que se suele vender a mayor precio a diferencia del mercurio dónde pueden quedar trazas de la amalgamación en el concentrado.

Para llevar a cabo el método del bórax primero se recomienda hacer molturación para reducir el tamaño de partícula a los 2 mm para que haya una mayor recuperación (Grayson, 2007). Para los depósitos placer como lo son el caso de estudio no se considera necesaria la molienda para liberar el oro (Mária & Otegui., 2018). Luego se debe verter este en alfombras para la concentración gravimétrica dónde se capturan los materiales más densos que luego se sacan para su lavado y concentrado. Después se vierte jabón para que las partículas de oro queden al fondo del recipiente. La mezcla se lava poco a poco con agua para conseguir el mayor concentrado de oro posible. Según el grado de liberación que presente el oro se le añadirá más o menos bórax lo que hará bajar considerablemente la temperatura de fusión de este, que normalmente es de 1064 °C, por lo que se pueden utilizar quemadores menos potentes.

Aunque el bórax se presente como una tecnología sustitutoria al mercurio se debe evitar el contacto de polvo de bórax que puede llegar a producir irritación en ojos y cuello por lo que se recomienda el uso de guantes, mascarilla y gafas de seguridad durante su manipulación (Appel & Na-Oy, 2014).

En el presente trabajo se realizó una caracterización mineralógica y térmica del concentrado de oro junto con diferentes proporciones de bórax y Na_2CO_3 provenientes de la minería aluvial de oro en la zona de Suches, Bolivia, mediante difracción de rayos X en polvo y análisis térmico diferencial-termogravimetría (ATD-TG). El concentrado se obtuvo por concentración gravitacional con el uso de alfombras para retener las partículas densas. Este concentrado está compuesto principalmente por cuarzo, biotita, clorita, hematites, goethita, monacita, circón, rutilo y oro.

Las curvas del ATD-TG de las muestras del concentrado aurífero mezclado con bórax se muestran en la Figura 20. De estas curvas se deduce que a la de temperatura 102 y 200 °C se produce una liberación repentina de 19 wt% de H_2O , lo que está marcado por una pronunciada pendiente en la curva TG y un endotérmico en las curvas ATD a alrededor de 161 °C. Otra pérdida de masa significativa, de un 4.23 %, se produce entre 500 y 700 °C y es debida a la pérdida del agua de la estructura del bórax.

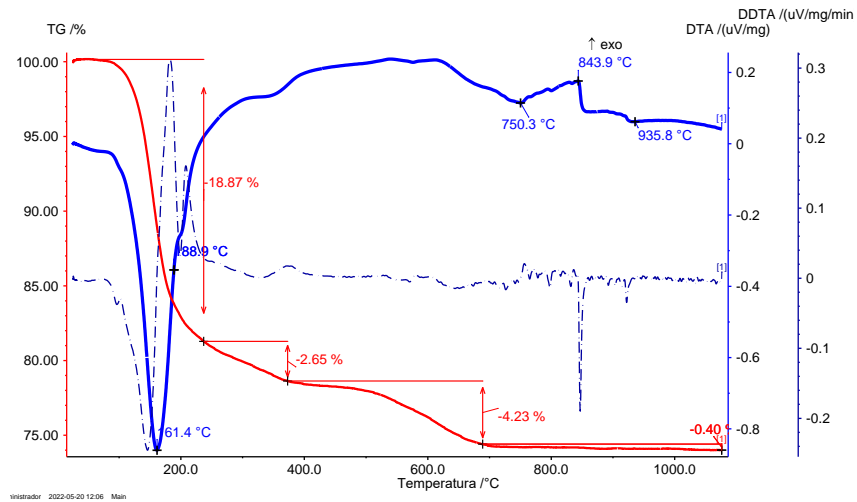


Figura 20. Curvas ATD-TG de la muestra de concentrado aurífero obtenida de la alfombra mezclada con un 45% de bórax y un 10% de Na_2CO_3 .

Más adelante, el ATD muestra un pico exotérmico a 1029 °C relacionado con la fusión del material. En el caso de la adición de bórax, el pico exotérmico se produce a temperaturas más bajas; con un 25 % en masa de adición de bórax, se encuentra a 1024 °C, con un 50 % en masa de bórax, este evento se produce a 1000 °C. Al añadir a esta última muestra un 10 % en masa de Na_2CO_3 , la temperatura baja a 844 °C. Sin embargo, los valores más bajos se obtienen con la adición de 75 % en masa de bórax, donde el evento exotérmico se produce a 811 °C (Figura 21).

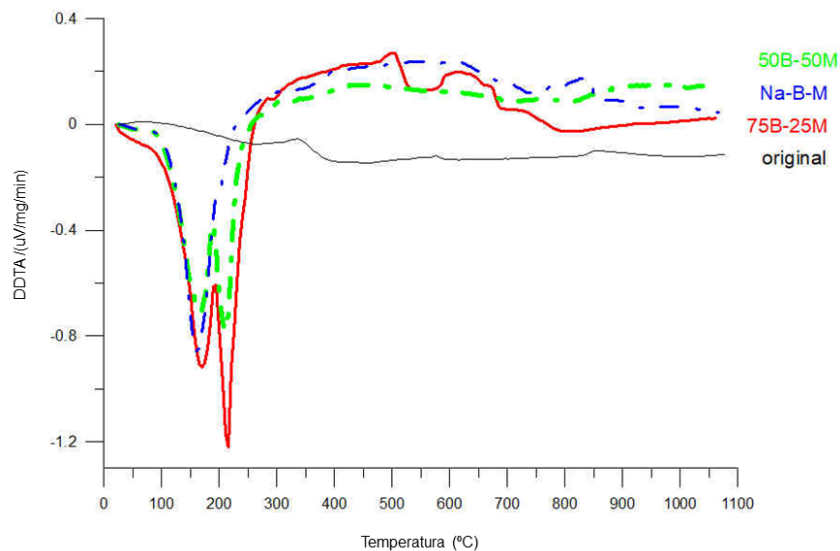


Figura 16. Comparativa entre las curvas de los ATD de la muestra de concentrado aurífero con diferentes proporciones de bórax y Na_2CO_3 .

Por lo tanto, cuanto mayor sea la proporción entre el bórax y el concentrado, menor será la temperatura de fusión de la mezcla. La cantidad de bórax a añadir debe calcularse en función de la temperatura proporcionada por la fuente de calor aplicada.

9. Discusión

9.1. Eficiencia del procesamiento gravimétrico

Los materiales finos del yacimiento natural explotado por la cooperativa Sin Fronteras, en Suches, presentan niveles muy bajos de oro. Esto podría ser debido a distintos factores. En primer lugar hay que tener en cuenta las limitaciones que tiene la concentración por alfombras para la recuperación de partículas más finas de cierto tamaño. Para diámetros inferiores a 0,25 mm la recuperación es parcial pero cuando se trata de tamaños inferiores a 0,13 mm la efectividad de las alfombras pasa a ser nula (Veiga & Gunson, 2020). Es por eso que se podría estudiar la implantación de otras tecnología para mejorar la eficiencia . Un ejemplo podría ser el de las mesas de sacudidas (o “shaking table” en inglés) que abarcan un rango de 1,7 hasta 0,074 mm o la de un Centrifugador Knelson entre otros.

El tiempo de lavado también influye en la recuperación del oro. Si este tiempo es demasiado largo, la pérdida de partículas finas será mayor con el cual recuperaremos menos oro. sin mencionar que el método de amalgamación del oro se le suma una mala eficiencia en la recuperación del material (Veiga & Gunson, 2020).

Cuando se extrae el oro del depósito primario se requiere de procesos de molturación para liberar este y una mayor cantidad de mercurio. En la Figura 22 se puede comparar el grado de liberación en un tipo de depósito y el otro pues en el pacer la concentración de los minerales pesados es más sencilla al mismo tiempo que la recuperación es mayor mientras en depósitos primarios será menos efectiva.

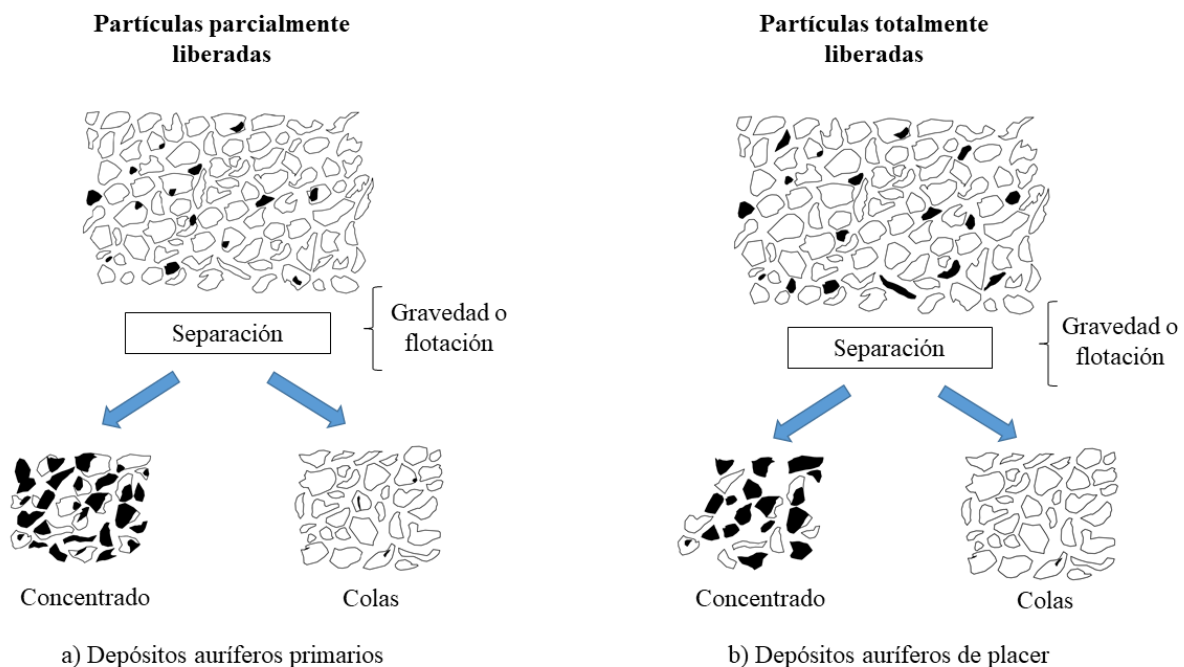


Figura 17. Diferencias entre el concentrado a) a partir de material de un depósito primario (Martínez et al., 2021) y b) a partir de un placer. El oro está representado de color negro.



9.2. Eficiencia del uso del mercurio

El mercurio se sigue utilizando con frecuencia para la recuperación del oro en la minería artesanal, a pesar de que perjudica gravemente la salud. Por ello en 2013 se elaboró un nuevo convenio internacional para controlar las emisiones de mercurios llamado convenio de Minamata, el cual regula la utilización del mercurio, disminuyéndola progresivamente hasta su completa desaparición en todo el mundo (Kesler, 2013). A raíz del convenio el mercurio es ilegal en muchos países. Bolivia ha suscrito el convenio pero, sin embargo, éste es el único país de Sudamérica donde todavía es legal el uso y comercialización del mercurio. Esto provoca que el mercurio presente en Bolivia no sólo afecta a este país, sino que es adquirido de forma ilegal por los países vecinos en los que su compra está prohibida y, con ello, extiende el problema de su uso a su alrededor.

Además de los problemas de contaminación ambiental y afecciones a la salud, se debe añadir la baja eficiencia del método de amalgamación con mercurio. En depósitos primarios se calcula que con este método sólo se aprovecha alrededor de un tercio del oro que contiene el material de alimentación (Alfonso et al., 2019). En los depósitos de tipo placer no existen estos cálculos debido a las dificultades de obtener muestras representativas a la hora de efectuar los análisis para determinar las leyes, sin embargo, se ha observado que en la zona de estudio se está comenzando a reprocesar un depósito de colas producto de un tratamiento anterior. De ello se deduce que el aprovechamiento no fue lo suficientemente bueno.

Se precisa de una cantidad mayor de mercurio en relación del oro para efectuar su extracción. Según Yoshimura et al. (2021) para la producción de 1 g de oro se requieren de 1 a 3 g de mercurio solamente en el concentrado de amalgama. Para explotaciones donde se usa el mercurio en todo el circuito de procesamiento se requieren de 10 a 25 g y se tienen pérdidas alrededor de 15 veces. Estos datos podrían confirmar las bajas concentraciones de mercurio en cabello que se han encontrado durante la realización de este trabajo.

Además de todos estos inconvenientes, el precio del mercurio cada vez es más elevado y se prevé que siga subiendo. No se han encontrado datos acerca del precio exacto de este pero seguramente dista del precio que realmente se paga en el contrabando. El aumento de precio podría representar cada vez más un coste mayor de los mineros para poder extraer el oro. Por esta razón se deberían estudiar nuevas técnicas de procesamiento.



9.3. La alternativa del método de bórax

Por los problemas mencionados previamente, se deben impulsar alternativas al mercurio para que la minería artesanal cambie a métodos más sostenibles y menos perjudiciales para la salud. Una de esas alternativas es el uso de bórax. Lo que se denomina bórax es un tetraborato de sodio ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) que se encuentra de forma natural y en abundancia en Bolivia, como el gran depósito de boratos en las proximidades del Rio Grande cerca del Lago de Uyuni (Garcia-Valles et al., 2016).

El método consiste en un proceso pirometalúrgico en el que el concentrado de oro se mezcla con boro y se funde a una temperatura próxima a los 743 °C, de manera que al enfriarse se separa el oro del resto del material con el que se encuentra (Eppers, 2017). Este proceso se puede llevar a cabo prácticamente con la misma infraestructura que la amalgamación con mercurio (Køster-Rasmussen et al., 2016). De esta manera es posible determinar las proporciones óptimas entre el bórax y el concentrado de oro para realizar el procesamiento metalúrgico.

Para establecer un protocolo, es necesario conocer el comportamiento térmico de la mezcla del concentrado con el bórax. Se trata de un proceso con mayor recuperación de mineral comparado con el mercurio (Eppers, 2017), tiene un coste de operatividad reducido y afecta menos a la salud humana y al medio ambiente.

9.4. Otros metales de interés del depósito de Suches

Los análisis que se han realizado para este trabajo han mostrado una cantidad en tierras raras (REE). La mayoría de ellas pertenecen al grupo de la monacita, un fosfato de REE rico normalmente en Ce. Esta gran cantidad podría ser dada por el contacto de los cinturones situados a más altura dónde se habrían alterado dando lugar a nuevos minerales. La presencia de monacita no es aislada en el país. En la zona de Llallagua también se ha hallado presencia de REE (Alfonso et al., 2022).

La monacita podría ser un mineral de interés económico el cual se podría comercializar como subproducto. La separación magnética que se lleva a cabo actualmente separa elementos como el neodimio y otros materiales ferrosos. Si se mejorara el proceso de separación de magnéticos se podrían clasificar estos para obtener un concentrado por separado de cada uno.

En los análisis también se ha observado una presencia elevada de zirconio. Teniendo en cuenta que este elemento es de gran interés además de sus múltiples aplicaciones en numerosos campos también se podría estudiar la separación de este para su comercialización como subproducto.



10. Conclusiones

En el concentrado gravitacional de la Cooperativa Aurífera Sin Fronteras en la zona de Suches se han encontrado concentraciones bajas en oro aunque la extracción de este resulta poco costosa económicamente ya que gran parte de los granos presentan una total liberación debido a que el yacimiento es de tipo placer como lo son ejemplo algunas explotaciones cercanas como la de Ananea, Bolivia o en La Rinconada, Perú.

La composición mineralógica del concentrado por alfombras nos indica que el mineral más abundante es la sericita seguida del cuarzo, con menor cantidad de biotita y hematites. Los análisis de la separación magnética indican el hematites como mineral más abundante seguido de cuarzo, biotita, monacita y casiterita. Mediante los análisis de composición química se pudo observar una concentración superior a 10000 ppm en neodimio, cerio, lantano y zirconio. Además se ha hallado una concentración superior a 1000 ppm en gadolinio, praseodimio y samario.

La abundancia de tierras raras que se ha encontrado en las distintas muestras expone a la luz una posible comercialización en forma de subproducto. Este se podría llevar a cabo si se mejorara su separación como se ha estado haciendo hasta el momento mediante un imán.

Por otro lado los análisis de cabellos muestran un contenido de mercurio que se considera de nivel bajo teniendo en cuenta los máximos permitidos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Estos resultados podrían explicarse por dos razones. En primer lugar hay que tener en cuenta que el grado de liberación de las partículas de oro permite usar menor mercurio para su extracción dada la naturaleza del depósito. En segundo lugar el uso de una retorta en buenas condiciones influye en una buena recuperación del mercurio que puede llegar a ser grande, generando una liberación en el medio ambiente menor. Aun así, en las colas de reprocesado que se están explotando actualmente se ha hallado una concentración de mercurio elevada por lo que los niveles de contaminación podrían aumentar a lo largo del tiempo.

Como se ha mencionado anteriormente el mercurio resulta perjudicial para la salud humana, puede afectar al desarrollo y el funcionamiento del cerebro, así como desencadenar otras enfermedades. Su ingesta mediante agua contaminada o pescado hace que aumente el riesgo por envenenamiento. Además, se trata de un método poco eficiente dónde se pueden generar grandes pérdidas de oro. Es por eso que la implementación de nuevas tecnologías alternativas al mercurio puede suponer una mejora no sólo económica sino también en la salud de las comunidades mineras.

Una alternativa al mercurio podría tratarse del bórax un método que presenta mayor recuperación, es de baja toxicidad y bajo coste. Este permitiría extraer el oro de manera más limpia y sostenible. Además el bórax es un recurso abundante en Bolivia por lo que es de fácil obtención. Se debe tener en cuenta la cantidad de bórax necesaria para extraer el oro sería poca ya que se trata de un depósito dónde la mayoría de granos están totalmente liberados.



Aun así, la variabilidad de los yacimientos y otros factores puede llegar a condicionar la implementación de tecnologías alternativas, por lo que hay que estudiar previamente la viabilidad de estas.

En última instancia, se reclama la realización de proyectos en un futuro para profundizar más en este tipo de estudios para así mejorar la actividad minera, haciéndola más sostenible y responsable.



11. Referencias

- Alfonso, P., Freixas, A., Bascompta, M., Aranibar, A. M., Villegas, K., María, E., Higuera, P., & Saraiva, A. C. (2016). *Mercury pollution from the artisanal mining in Yani gold district, Northern Bolivia*. 18, 11223.
- Alfonso, P., Ruiz, M., Zambrana, R. N., Sendrós, M., Garcia-valles, M., Anticoi, H., Sidki-rius, N., & Salas, A. (2022). Process Mineralogy of the Tailings from Llallagua: Towards a Sustainable Activity. *Minerals*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/min12020214>
- Appel, Peter W. U., Andersen, A., Na-Oy, L. D., & Onos, R. (2015). Introduction of Mercury-free Gold Extraction Methods to Medium-Scale Miners and Education of Health Care Providers to Reduce the use of Mercury in Sorata, Bolivia. *Journal of Health and Pollution*, 5(9), 12–17. <https://doi.org/10.5696/2156-9614-5-9.12>
- Appel, Peter W.U., & Jøsson, J. B. (2010). Borax - an alternative to mercury for gold extraction by small-scale miners: Introducing the method in Tanzania. *Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin*, 20, 87–90. <https://doi.org/10.34194/geusb.v20.4988>
- Appel, Peter Wiltje Uitterdijk, & Na-Oy, L. D. (2014). Mercury-Free Gold Extraction Using Borax for Small-Scale Gold Miners. *Journal of Environmental Protection*, 05(06), 493–499. <https://doi.org/10.4236/jep.2014.56052>
- CIES. (2018). La minería peruana y los objetivos de desarrollo sostenible. *Consortio de Investigación Económica y Social-CIES*, 32.
- Coila, Y. A., Huisa, Fi., Quispe, E., Almendras, O., Bustillo, H., & Salamanca, G. (2010). *Actualización del inventario y situación técnico-legal de los derechos y operaciones mineras en la cuenca binacional del río suches Perú – Bolivia*. http://51.79.70.226/bitstream/20.500.12544/2473/1/CBN-Actualización_inventario_cuenca_río_Suches.pdf
- Colia Choque, Y. A. (2009). *INVENTARIO Y SITUACIÓN LEGAL DE LAS OPERACIONES Y CONCESIONES MINERAS UBICADAS EN LA CUENCA DEL RÍO SUCHES (PERÚ - BOLIVIA), IMPLEMENTACIÓN DE LAS ACTIVIDADES CONDUCENTES A LA CONSTRUCCIÓN DE POZAS DE SEDIMENTACIÓN*.
- Costa, M. (2009). *PROCESO DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN DE ORO EN EL ASENTAMIENTO MINERO ARTESANAL DE MISKY, PERÚ*. 231–242.
- Enríquez, J. C. (1998). *Capítulo 4-Minería, Minerales y Desarrollo Sustentable en Bolivia*. 67. <http://biblioteca.unmsm.edu.pe/redlieds/Recursos/archivos/MineriaDesarrolloSostenible/Responsabilidadsocial/enriquez.pdf>
- Eppers, O. (2017). El uso de bórax para una producción de oro sin mercurio en la minería a pequeña escala. *SIAR Arequipa*, July, 11. <http://siar.regionarequipa.gob.pe/documentos/uso-borax-una-produccion-oro-sin-mercurio-mineria-pequena-escala>
- Félix, M., Camacho, D., General, D., Udape, E. De, & Lizarazú, G. A. (n.d.). *Diagnósticos*



*Sectoriales Minería Minería Diagnósticos Sectoriales-Minería Autoridades Responsables:
Actualización*: Minería.*

- Forns, P. (2020). *La explotación del oro en el río Mapiri sistema actual y mejoras (TFG)*.
- Freixas, A., Tutor, B., Abella, P. A., Polit, M. E., & Manresa, M. (n.d.). *Mejora intergral de la minería del oro, Bolivia*.
- Gaona Boixader, R. (2021). *Caracterización del oro orogénico de Bolivia (TFG)*.
- García-Valles, M., Alfonso, P., Arancibia, J. R. H., Martínez, S., & Parcerisa, D. (2016). Mineralogical and thermal characterization of borate minerals from Rio Grande deposit, Uyuni (Bolivia). *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 125(2), 673–679. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-5161-4>
- Grayson, R. (2007). Fine Gold Recovery – Alternatives to Mercury and Cyanide. *World Placer Journal*, 7(March), 66–161.
- Hamilton, E. J. (n.d.). *El tesoro americano y la revolución de los precios en España, 1501-1650*. 1975. Retrieved May 26, 2022, from https://books.google.es/books?id=bz8TDROuHqQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gb_s_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, M. and S. D. (IGF). (2018). *GLOBAL TRENDS IN ARTISANAL AND SMALL-SCALE MINING (ASM): A REVIEW OF KEY NUMBERS AND ISSUES Secretariat hosted by Secretariat funded by*. <http://pubs.iied.org/pdfs/G04266.pdf>
- Køster-Rasmussen, R., Westergaard, M. L., Brasholt, M., Gutierrez, R., Jørs, E., & Thomsen, J. F. (2016). Mercury pollution from small-scale gold mining can be stopped by implementing the gravity-borax method – A two-year follow-up study from two mining communities in the Philippines. *New Solutions*, 25(4), 567–587. <https://doi.org/10.1177/1048291115607929>
- Laurence, D. (2011). Establishing a sustainable mining operation: An overview. *Journal of Cleaner Production*, 19(2–3), 278–284. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.08.019>
- López, D. (2017). *Problemas derivados de la recuperación de oro mediante amalgamación con mercurio en la cooperativa 24 de septiembre, Bolivia (TFM)*.
- Mária, V. de, & Otegui., C. (2018). Guía Práctica. *Revista Colombiana de Ciencias Químico-Farmacéuticas*, 2(457896321), 31. http://www.abm.org.ar/docs/campanas/erc/guiapRACTICA_examen_orina.pdf
- Mission, O. (1991). *Lower Paleozoic gold occurrences in the ' Eastern Cordillera ' of Southern Peru and Northern Bolivia : A genetic model*.
- Poulin, J., & Gibb, H. (2008). Mercury Assessing the environmental burden of disease at national and local levels. *WHO Environmental Burden of Disease*, 16(16), 1–42. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/43875/1/9789241596572_eng.pdf
- RNC. (2000). *RNC*. <https://doi.org/10.17226/9899>



- Seccatore, J., Veiga, M., Origliasso, C., Marin, T., & De Tomi, G. (2014). An estimation of the artisanal small-scale production of gold in the world. *Science of the Total Environment*, 496, 662–667. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.003>
- Spooren, J., Binnemans, K., Björkmalm, J., Breemers, K., Dams, Y., Folens, K., González-Moya, M., Horckmans, L., Komnitsas, K., Kurylak, W., Lopez, M., Mäkinen, J., Onisei, S., Oorts, K., Peys, A., Pietek, G., Pontikes, Y., Snellings, R., Tripiana, M., ... Kinnunen, P. (2020). Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 160(May), 104919. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104919>
- Sustentable, D., & Cap, B. (n.d.). *Sección ii informes nacionales*.
- Veiga, M., & Baker, R. (2004). *Protocols for environmental and health assessment of mercury released by Artisanal and Small Scale Miners. Report to the Global Mercury Project: Removal of barriers to introduction of cleaner Artisanal Gold Mining and extraction technologies, GEF/UNDP/UNI*.
- Veiga, M. M. (1997). Introducing new technologies for abatement of global mercury pollution in Latin America. In *United Nations Industrial Development Organization (UNIDO), University of British Columbia (UBC), Center of Mineral Technology (CETEM)*.
- Veiga, M. M., & Gunson, A. J. (2020). Gravity concentration in artisanal gold mining. *Minerals*, 10(11), 1–50. <https://doi.org/10.3390/min10111026>
- Villegas, K. S., Alfonso, P., Higuera, P., Palacios, S., Esbrí, J. M., & García-Noguero, E. M. (2012). Environmental pollution produced by gold artisanal mining in the Mapiri river basin, Apolobamba, Bolivia. *European Mineralogical Conference Vol. 1, 1, 1*. <http://hdl.handle.net/2117/116747>
- WHO. (2006). Exposure to Mercury: A major public health concern. *Preventing Disease Through Healthy Environments*, 4, 4.
- Yoshimura, A., Suemasu, K., & Veiga, M. M. (2021). Estimation of Mercury Losses and Gold Production by Artisanal and Small-Scale Gold Mining (ASGM). *Journal of Sustainable Metallurgy*, 7(3), 1045–1059. <https://doi.org/10.1007/s40831-021-00394-8>



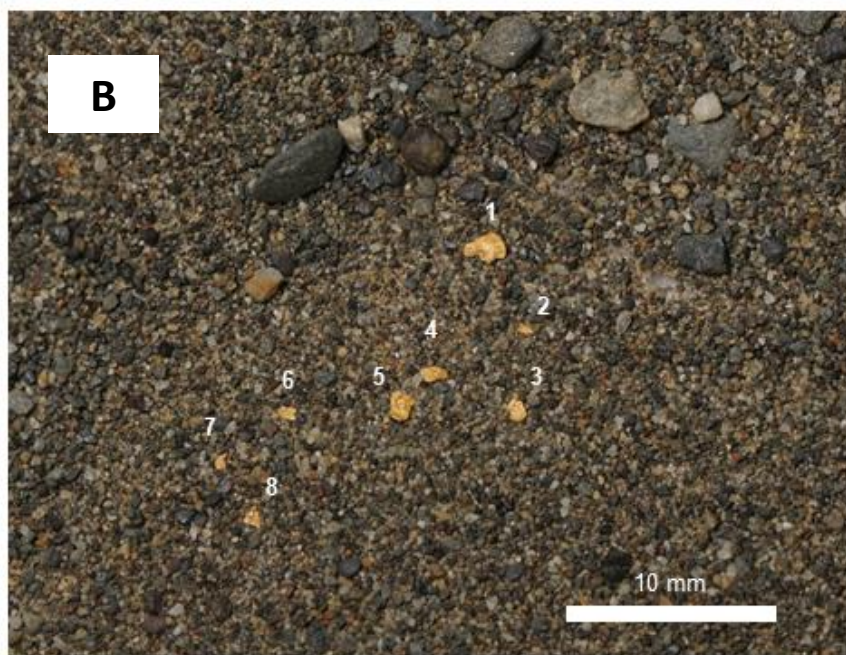
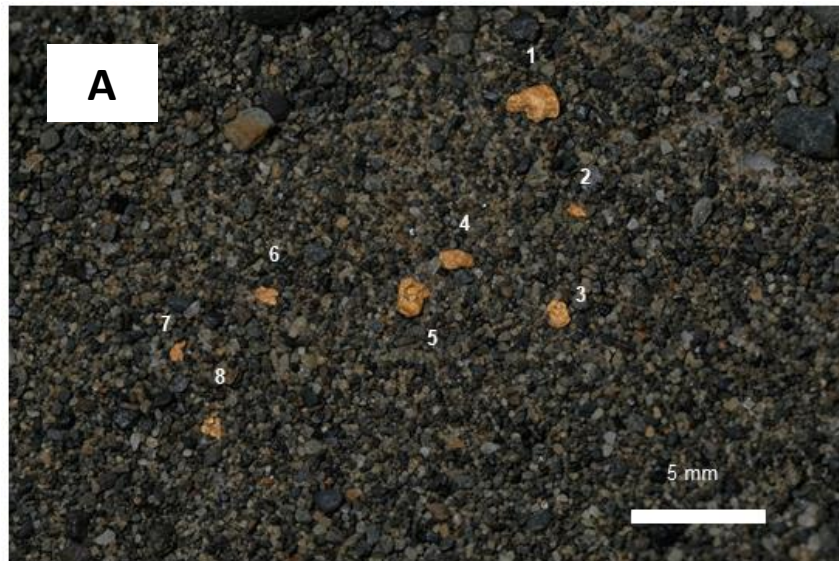
12. Apéndices



12.1. Apéndice 1: Descripción detallada de las muestras tomadas

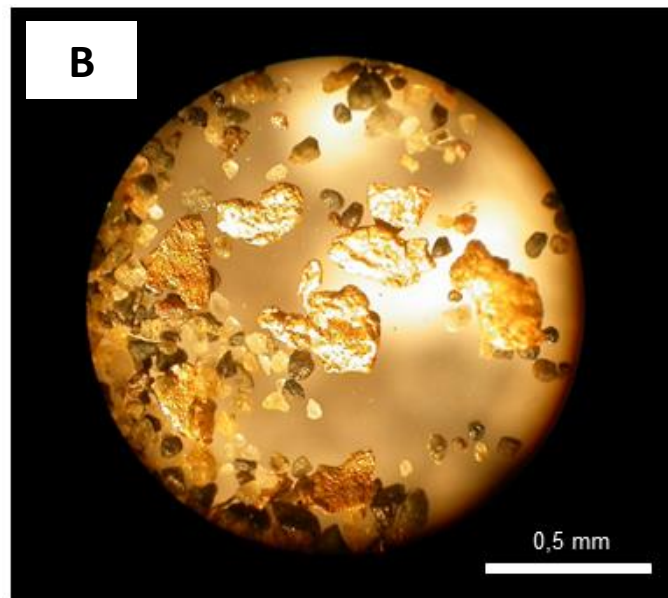
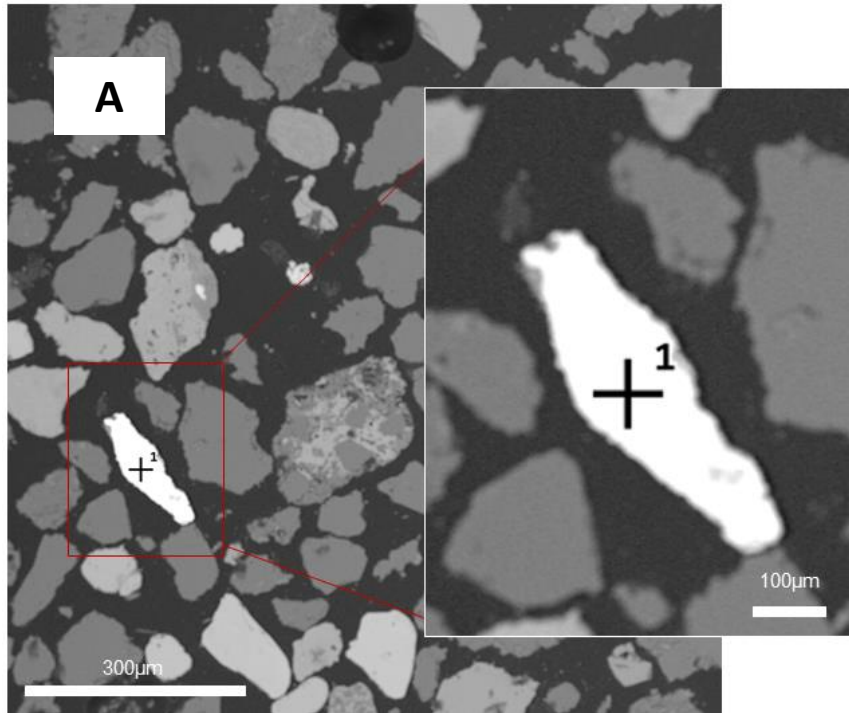
- **SH – 1:** Muestra tomada del yacimiento de origen fluvio-glaciar formado por clastos más o menos redondeados procedentes de la actividad glaciar. Arena y grava de tamaño no uniforme hasta 30 cm aunque algunos superan los 50 cm. El material está conformado principalmente por calcáreas y bloques de cuarzo. Toma de material de 11,35 kg en seco. Coordenadas aproximadas de la toma ETRS89 (XYZ) en 19L: 0465275, 8364275, 4663 m.
- **SH – 2:** Muestreo perteneciente a la reutilización de las escombreras. Éste se trata de material ya procesado que se depositó para futuros lavados y que por lo general contiene menor ley de oro que el extraído en el depósito primario. Este material es el que se estaba explotando en ese momento. Conformado mayoritariamente por arenas y gravas más o menos finas con algunos clastos alrededor de los 10 cm. Toma del material de 8,26 kg en seco. Ubicación alrededor de 30 metros respecto a la muestra SH – 1.
- **SH – 3:** Muestra tomada en el inicio de la canaleta del lavado. Este material se desliza con la ayuda de inyección de agua por la canaleta donde los materiales pesados quedan retenidos en las alfombras colocadas a lo largo de toda ella. Peso en seco de 12,14 kg.
- **SH – 7:** Material procedente de la retorta. Se trata del concentrado acumulado en las alfombras que se deja reposando con mercurio para posteriormente llevar a cabo la amalgamación. Peso aproximado de 500 g en seco.
- **SH – 8:** Material procedente de la posterior a amalgama con mercurio para la concentración del oro.. Este material se trata como “waste” debido a la alta concentración de materiales ferruginosos que se encuentra en ella. Estos pueden ser debidos al desgaste de palas u otras máquinas aunque también puede proceder del propio depósito mineral (magnetitas, etc.). Se hace la separación con imán y se vierte en cubos que posteriormente venden a externos para que puedan extraer más oro de él. Peso aproximado de 1,5 kg en seco
- **SH – 9:** Muestra de la reutilización de las escombreras procedente del acopio de donde se extraía. Se observa que la mayoría de granos son redondeados y/o erosionados. Fracción granulométrica muy baja aunque hay presencia de partículas de 2 cm de diámetro. Peso aproximado de unos 600 g en seco.
- **SH – 10:** Material procedente de las alfombras que retienen los pesados y son lavados cada cinco horas de trabajo. Este seguramente sea donde se encuentra la mayor cantidad de oro. Peso aproximado de 300 g en seco.

12.2. Apéndice 2: Fotografías del oro



A: Muestra de partículas de oro procedentes del concentrado de alfombras.

B: Muestra de partículas de oro procedentes del concentrado de alfombras.



A: Fotografia tomada con microscopio SEM del material de concentración por alfombras dónde se observa una partícula de oro.

B: Fotografia tomada con microscopio óptico dónde se observan algunas partículas de oro.

12.3 Apéndice 3: Respuestas de los trabajadores mineros

Nombre	Edad	Puesto de trabajo	Fuma	Bebe	Come pescado	Frecuencia	Años trabajando
Franklyn	23	Administración de la explotación	N	S	S	4 v/mes	2
José David Challco	41	Capataz	S	N	S	1 - 2 v/mes	7
Walter	35	Operador	S	S	S	1 v/mes	8
Anselmo	42	Planta de lavado	N	N	N	-	2
Rubón	29	Planta de lavado	N	S	S	2 v/mes	4 meses
Sergio	30	Planta de lavado	S	N	S	4 v/mes	2
Victor	40	Chófer pala	N	N	S	1 v/mes	2
Unurato	43	Empleado	N	N	N	-	1
Grillo	39	Pala cargadora	N	N	S	1 v/mes	1