



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROCESAMIENTO SOSTENIBLE DEL ORO EN SAN CRISTÓBAL, SUR DEL PERÚ

Autor: Hernán Anticoi Sudzuki

Núm. de registre:2037

Tutora: Pura Alfonso Abella

Titulació: Enginyeria Tècnica de Mines

Especialitat: Explotació de mines

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

Manresa, 11 de Gener de 2011

RESUMEN

San Cristóbal, poblado minero al sur del Perú, desarrolla la actividad en forma artesanal. Los mineros se organizan en pequeñas asociaciones para extraer el mineral. Mismo así, viven en precarias condiciones.

Los objetivos de este trabajo son: Caracterizar los materiales de este yacimiento, estudiar el procesamiento del mineral, evaluar su rendimiento, identificar las técnicas medioambientalmente nocivas, proponer mejoras y probar mediante ensayos de laboratorio alguna de las técnicas propuestas, con tal de verificar la idoneidad de estos métodos con respecto a los materiales encontrados. El objetivo final es conseguir el desarrollo de la actividad, en aspectos sociales, económicos y medioambientales, es decir, intentar que sea sostenible.

Se utilizó una metodología dividida en dos etapas: trabajo de campo, donde se hizo un muestreo de los materiales que intervienen en estos procesos, y una etapa de laboratorio, donde se utilizaron técnicas como la microscopía óptica, microscopía electrónica, se hicieron ensayos granulométricos y análisis químicos de las muestras obtenidas.

El oro se encuentra formando yacimientos en vetas de cuarzo de edad Cretácica. La mineralogía de las menas está compuesta mayoritariamente por sulfuros como la pirita, calcopirita, galena, y esfalerita, también abunda la arsenopirita y sulfosales de bismuto y el oro. Entre estos sulfuros se deposita el oro, y es el único recurso explotado por los mineros. Se han identificado altas leyes de plata, cobre y plomo.

La extracción es por medio de labores subterráneas, utilizando explosivos para su arranque. El material es transportado con mulas y procesado en plantas a un costado del poblado. Sus sistemas rústicos de trituración no hacen posible la fragmentación necesaria del material para conseguir liberar de manera eficiente el oro encapsulado en los sulfuros.

La recuperación del oro se realiza por medio de amalgamación con mercurio, lo cual es altamente contaminante. El rendimiento del mercurio para amalgamar el oro también es bajo, por la presencia de la arsenopirita y los sulfosales de bismuto. Utilizan la cianuración de manera complementaria a la recuperación de oro con mercurio. No controlan en ninguna fase los residuos y los efluentes que la actividad genera.

Se ha comprobado la eficiencia de los diferentes métodos utilizados en San Cristóbal para la recuperación del oro, mediante el análisis químico de las muestras recogidas en la etapa de trabajo de campo

Se han estudiado diversos métodos para mejorar los usados actualmente, y se han practicado ensayos de laboratorio con uno de ellos. La técnica ensayada se denomina cloración, y los resultados si bien no son muy favorables de cara a recuperar el oro, parece resultar efectivo para lixiviar otros elementos, como el cobre.

Finalmente, se propone una reestructuración del actual sistema de procesamiento utilizado en San Cristóbal, el cual conjuga la eficiencia en la recuperación del oro, neutralización de residuos generados y un mayor lucro de la actividad. Para esto se ha presentado una comparación económica de ambos métodos. Sin embargo, esta reestructuración implica también un cambio en la estructura organizativa del poblado, lo que llevaría también a una reforma social importante.

ÍNDICE

RESUMEN	2
AGRADECIMIENTOS.....	9
MEMORIA.....	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
2. PROBLEMÁTICA.....	12
3. OBJETIVOS.....	13
4. ALCANCE.....	14
5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO	15
5.1. TRABAJO DE CAMPO	15
5.1.1. ITINERARIOS TOPOGRÁFICOS.....	15
5.1.1.1. Metodología para itinerarios	15
5.1.2. MUESTREO	16
5.1.2.1. Muestreo para estudio geológico	16
5.1.2.2. Muestreo para estudio del procesamiento del mineral.....	16
5.2. ETAPA DE LABORATORIO	17
5.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO.....	17
5.2.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS.....	17
5.2.3. MICROSCOPIA ÓPTICA	17
5.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA	18
6. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	19
6.1. SITUACIÓN SOCIO-ECONÓMICA.....	19
6.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA.....	20
6.3. GEOGRAFÍA FÍSICA.....	22
6.3.1. TOPOGRAFÍA	22
6.3.2. GEOMORFOLOGÍA.....	23
6.3.3. HIDROLOGÍA.....	23
6.3.4. SUELOS	24

6.3.5.	CLIMATOLOGÍA.....	24
6.4.	GEOLOGÍA	26
6.4.1.	FORMACIONES EN TERRITORIO PERUANO	26
6.4.2.	GEOLOGÍA LOCAL	27
6.4.3.	TECTÓNICA	29
6.4.4.	MINERALIZACIÓN	30
7.	MINERÍA	33
7.1.	TIPO DE ACTIVIDAD MINERA.....	33
7.2.	PROCESAMIENTO	35
7.2.1.	TRITURACIÓN	36
7.2.1.1.	Molino de bolas.....	37
7.2.1.2.	Parámetros que afectan el rendimiento del molino	38
7.2.1.3.	Molino quimbaleta.....	41
7.2.1.4.	Parámetros que afectan el rendimiento del quimbaleta.....	43
7.2.1.5.	Discusión sobre el proceso de trituración.....	44
7.2.2.	TEORÍA DE LIBERACIÓN DE PARTÍCULAS.....	45
7.2.2.1.	Diámetro de partícula	47
7.2.2.2.	Leyes.....	48
7.2.2.3.	Relación pirita-oro.....	48
7.2.2.4.	Relación cuarzo-pirita.....	50
7.2.2.5.	Discusión sobre teoría de liberación	51
7.2.3.	VALORACIÓN DE LA ENERGÍA UTILIZADA.....	52
7.2.3.1.	Energía de bond	52
7.2.3.2.	Discusión de resultados.....	55
7.2.4.	AMALGAMACIÓN CON MERCURIO	56
7.2.4.1.	Aleación de metales	57
7.2.4.2.	Rendimiento del proceso	58

7.2.5.	CIANURACIÓN POST PROCESO	60
7.2.5.1.	Descripción del proceso	60
7.2.5.2.	Desventajas del cianuro para la minería artesanal	63
7.2.6.	LODOS RESIDUALES	63
7.2.6.1.	Caracterización de lodos	64
7.2.6.2.	Utilización de lodos	65
8.	IMPACTO AMBIENTAL Y A LA SALUD HUMANA	66
8.1.	MERCURIO	66
8.1.1.	TOXICIDAD DEL MERCURIO Y SUS COMPONENTES	67
8.2.	CIANURO	69
8.2.1.	TOXICIDAD Y EPIDEMIOLOGÍA DEL CIANURO EN SERES HUMANOS	69
8.2.2.	TOXICOLOGÍA EN EL MEDIO	70
8.3.	COMBINACIÓN TOXICOLÓGICA DEL MERCURIO CON CIANURO	70
8.4.	ARSENICO	70
8.5.	LODOS RESIDUALES Y SU IMPACTO VISUAL	71
9.	NORMATIVA MEDIOAMBIENTAL ACTUAL	72
9.1.	POLÍTICAS MEDIOAMBIENTALES EXPLÍCITAS	73
9.1.1.	ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL (EIA)	73
9.1.2.	PROGRAMA DE ADECUACIÓN DE MANEJO AMBIENTAL (PAMA)	73
9.1.3.	DECLARACIÓN JURADA ANUAL	74
9.1.4.	DISPOSICIONES REFERIDAS AL MEDIO AMBIENTE	74
9.1.5.	PLAN DE RESTAURACIÓN	75
9.2.	MINERÍA ARTESANAL	75
9.2.1.	CARACTERÍSTICAS	75
9.2.2.	COMERCIO JUSTO	77
10.	EVALUACIÓN GENERAL DEL PROCESAMIENTO	78
11.	MÉTODOS SOSTENIBLES DE RECUPERACIÓN DE ORO	79

11.1.	CARACTERIZACIÓN DE LOS MATERIALES CONTENEDORES DEL ORO	79
11.2.	CLORACIÓN DE METALES	80
11.2.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CLORACIÓN	80
11.2.2.	ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DEL PROCESO	82
11.3.	PROCESOS DE CIANURACIÓN	83
11.3.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE RECUPERACIÓN DEL ORO POR CIANURACIÓN	84
11.3.2.	PRECIPITACIÓN SIMPLE CON ZN	84
11.3.3.	ABSORCIÓN CON CARBÓN ACTIVO Y PRECIPITACIÓN CON ZN.....	84
11.3.4.	ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DEL PROCESO	85
11.3.5.	TRATAMIENTO DE SOLUCIONES CIANURADAS	86
11.3.6.	TRATAMIENTO DE LODOS CIANURADOS	87
11.4.	TECNOLOGÍA DE FITO-EXTRACCIÓN DE ORO	87
11.4.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	88
11.4.2.	ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DEL PROCESO	89
11.5.	TECNOLOGÍA DE BIO-OXIDACIÓN PARA RECUPERAR ORO	89
11.5.1.	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	89
11.5.2.	ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES DEL PROCESO	90
12.	FASE EXPERIMENTAL.....	91
12.1.	ENSAYOS DE CLORACIÓN	91
12.1.1.	PRIMER ENSAYO	91
12.1.1.1.	Materiales.....	92
12.1.1.2.	Procedimiento de cloración	92
12.1.1.3.	Precipitación.....	94
12.1.1.4.	Medidas de seguridad y neutralización de los efluentes	95
12.1.2.	SEGUNDO ENSAYO DE PRECIPITACIÓN	95
12.1.3.	RESULTADOS ESPERADOS Y DISCUSIÓN DE LOS ENSAYOS	95
13.	VALORACIÓN ECONÓMICA DEL PROCESO EN SAN CRISTÓBAL	98

13.1.	GASTOS.....	98
13.2.	BENEFICIO.....	100
14.	PROPUESTA DE RE-ESTRUCTURACIÓN DEL PROCESAMIENTO EN SAN CRISTÓBAL.....	102
14.1.	FASE DE TRITURACIÓN	102
14.2.	ACCIÓN ALTERNATIVA CON CLORACIÓN	103
14.3.	FASE DE CINAURACIÓN	103
14.3.1.	TANQUE DE CIANURACIÓN	103
14.3.2.	PREPARACIÓN DE LA MEZCLA, SOLUCIÓN CIANURADA Y CURADO	104
14.3.3.	ABSORCIÓN Y DESORCIÓN	105
14.4.	LODOS RESIDUALES.....	106
14.5.	CONTROL DE LOS EFLUENTES.....	107
15.	VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA NUEVA PROPUESTA	109
15.1.	GASTOS.....	110
15.2.	BENEFICIOS.....	111
15.3.	COMPARATIVA DEL NUEVO PROCESO CON EL ACTUAL.....	112
15.4.	PREVISIÓN DE VENTAS Y RECUPERACIÓN DE INVERSIÓN.....	112
16.	CONCLUSIONES	114
17.	ABREVIATURAS.....	115
18.	BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS	119
ANEXO 1:	RELACIÓN DE MUESTRAS DE CAMPO	120
ANEXO 2:	ANÁLISIS QUÍMICO DE LAS MUESTRAS.....	121
ANEXO 3:	ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS DE LAS MUESTRAS	122
ANEXO 4:	ITINEARIOS TOPOGRÁFICOS	123
ANEXO 5:	DISEÑO DEL TANQUE DE CIANURACIÓN	125

AGRADECIMIENTOS

Sin dudas, este proyecto se ha podido llevar a cabo gracias mi directora, Pura Alfonso, a quien definiría como una Persona-Biblioteca. En primer lugar, Persona, porque ante todo es un excelente ser humano, con valores y principios ejemplares. Su implicación desde el comienzo, en el viaje a Perú y durante toda la evolución de este trabajo, ha sido fundamental para el desarrollo de este. Además es una Biblioteca, fuente inagotable de conocimientos, con quien puedes consultar cualquier tópico, y de manera amena y agradable.

Forman parte importante de este trabajo mis amigos que me han acompañado durante el el viaje a Perú, en especial Sílvia, con quien es la segunda vez que compartimos esta aventura de vivir en una comunidad de las características que describo en este proyecto. Se incluyen en este viaje, Carla y Carles, que también han sido un soporte y una ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A Minería para el Desarrollo, y todos sus integrantes, en especial Marta, Marc, Claudia, Eva y J.M.Mata, que han participado conmigo en diferentes actividades dentro del marco de este proyecto. Al CCD, que ha hecho posible la materialización de este proyecto, por medio de la cooperación internacional que fomenta. A Manuel Reinoso, presidente de AMASUC, a Olinda y Federico, de Red Social, que juntos son pilares fundamentales en el desarrollo no sólo de este proyecto, sino también de la minería artesanal en Perú.

A todos los integrantes del Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals, su inagotable paciencia en mis largas horas de ensayos de laboratorio. A la Xesca y el Jordi del laboratorio de química, siempre dispuestos a proporcionarme el material que necesitaba.

A todos mis amigos de la escuela, que he conocido en estos tres años, ha sido una experiencia inolvidable, y han hecho muy grata mi estancia en este país. A todos los profesores, que me han dado sus conocimientos a lo largo de la carrera.

A mis padres, Roberto y Margarita, que si bien están muy lejos, pero en la distancia me han dado todo su apoyo y fuerza, sobre todo en los momentos críticos, solo un par de palabras de ellos eran suficientes para renovarme y seguir adelante. También a mis hermanos, Ricardo, Andrea, Roberto y Cristian, siempre me han apoyado con su fuerza a la distancia.

No puedo dejar de agradecer a unos de los artífices que impulsó a vivir esta aventura, Juan Pablo y Pancha, además del nuevo integrante de su familia, Leo. Su apoyo, antes de entrar a la EPSEM, ha sido fundamental, a eso se agrega que son 20 años de amistad, y aún seguimos viajando. Junto con Víctor, otro gran amigo, además compartimos la misma filosofía de vida.

MEMORIA

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo sostenible responde a las necesidades del presente sin poner en peligro la capacidad de las generaciones futuras de responder a las suyas. Este consta de tres vertientes, la económica, la social y la medioambiental.

Además, es nuestra misión el procurar nivelar las condiciones de vida de los países en vías de desarrollo, pero inyectando esta filosofía sostenible. Y la minería es una actividad que debe ser un referente en este aspecto.

Los países del sur destacan por su gran potencial en recursos minerales, pero a pesar de eso, hay grandes diferencias entre la gran minería y la minería artesanal. Tradicionalmente las leyes medioambientales han sido más tolerantes en los países en desarrollo, lo que se ve reflejada en la diferencia de usos de tecnologías para extraer y procesar los minerales.

En Perú la minería artesanal del oro está muy extendida. Estos mineros mayoritariamente utilizan mercurio, y a veces cianuro, para el procesamiento de su mineral y la población vive expuesta a estas emanaciones contaminantes. Una localidad de estas características es San Cristóbal, en Arequipa. Los métodos de extracción de oro en San Cristóbal son rústicos y poco eficientes, pero sobre todo, muy contaminantes.

El presente trabajo intenta localizar los puntos de bajo rendimiento del procesamiento del oro en el asentamiento minero de San Cristóbal, identificar los potenciales riesgos a la salud humana de la actividad y proponer medidas correctoras, tomando como estandarte la solidaridad con el medio ambiente.

El trabajo se desarrolla en dos grandes fases. La primera de ellas incluye el desplazamiento al lugar en estudio, donde se observan las labores mineras, evaluando los diferentes materiales explotados por medio de un muestreo in situ. Se estudiaron los métodos utilizados en el procesamiento de estos materiales y se hizo una primera evaluación económica del método de extracción de oro utilizado en las diferentes agrupaciones mineras.

Es urgente la necesidad de disminuir o eliminar totalmente, si es posible, la utilización de mercurio en los procesos. Por esto se propone implementar métodos que permitan lixiviar los metales presentes, y procesos de precipitación de estos por medio de sustancias orgánicas, con el fin de eliminar el mercurio de los procesos actuales. Si bien el principal elemento a recuperar es el oro, también se pretende extender estos métodos para recuperar los otros metales asociados.

2. PROBLEMÁTICA

El asentamiento minero de San Cristóbal presenta la mayoría de problemas que caracteriza a la minería artesanal en el Perú: Informalidad, equipos rústicos de trabajo, abuso de la mano de obra en los procesos derivado de la básica tecnología utilizada.

En cuanto al marco económico de la actividad minera, existe un déficit producido por la falta de optimización de las técnicas de procesamiento del mineral, haciendo uso frecuente del mercurio en la recuperación del oro, rescatando solo una parte de este, generando durante el proceso lodos residuales con un porcentaje del metal y de otros elementos asociados. El lucro que obtienen del oro depende de la calidad de éste, variando el precio de venta según la pureza del mismo, la cual se evalúa sin ningún tipo de principio científico, únicamente por la intensidad de su color.

En Perú se denomina relave a los lodos generados por la actividad minera. Éstos son el resultado de la extracción del oro del mineral a partir de procesos de amalgamación con mercurio. En San Cristóbal, estos relaves necesitan un proceso extra para extraer el oro residual y otros metales presentes. Se identificó el uso de cianuro para realizar estos procesos, sin ningún control sobre los residuos generados. Para estos lodos residuales, se hace un tratamiento de lixiviación con cianuro, y filtración con carbón activado. La rentabilidad viene condicionada por que, además de la necesidad de comprar todos los reactivos para el proceso, la venta final no es del metal en sí, más bien se vende el carbón activado, previo análisis de cantidad de oro que contiene. El vendedor no dispone de un laboratorio imparcial donde determinar la riqueza en oro. Finalmente, los costes de este proceso se ven afectados por el hecho de que la venta del carbón activado no se lleva a cabo dentro del mismo poblado; los mineros deben viajar a Lima, la capital, con todas las desventajas que esto significa, para vender a una empresa metalúrgica el carbón activado cargado del metal.

No existe ningún tipo de proceso para recuperar minerales asociados, que según análisis posteriores, contienen importantes leyes de cobre y plata.

Algunas labores mineras tienen problemas de uso excesivo de mercurio, por la presencia de arsenopirita, que es un sulfoarseniuro de hierro y sulfosales de bismuto.

En el tema medioambiental, el uso masivo de mercurio, y el poco control sobre los procesos de cianuración, hacen de la actividad un foco grave de emanaciones contaminantes.

3. OBJETIVOS

Los objetivos a conseguir con este trabajo están estrechamente ligados con la nueva filosofía de desarrollo sostenible que se está impulsando en el mundo actual.

Se intenta estudiar una explotación de minería artesanal, localizando sus puntos bajos en cuanto al rendimiento, y establecer criterios con tal de proponer mejoras, siempre y cuando sean medioambientalmente correctas, y que además signifique un aumento en el desarrollo económico de los mineros artesanales.

Como objetivos primarios se cuentan:

- Mediante una metodología adecuada, realizar un muestreo que sea representativo de los procesos a estudiar.
- Describir los procesos, con tal de intentar localizar los puntos bajos en el rendimiento de este.
- Identificar en los métodos actuales, técnicas medioambientales agresivas.
- Proponer las mejoras idóneas para los procesos, siempre adaptándose a la realidad de minería artesanal.
- De las propuestas formuladas, probar las nuevas técnicas, mediante una etapa de ejecución de ensayo en laboratorio, para comprobar su aplicación al enclave estudiado.
- Estudiar posibles impactos que pueda generar estas nuevas técnicas propuestas.
- Hacer un estudio de viabilidad económica, con tal de asegurar que las reformas hechas no mermen el lucro de la minería artesanal.

En principio, la optimización de la extracción de oro, traería consecuencias como la eliminación del uso del mercurio, en primer lugar, y controlar correctamente los nuevos procesos propuestos.

El objetivo final es conseguir de manera simultánea y equilibrada el desarrollo tecnológico, económico y cultural, siendo respetuosos con el medio, y que esta filosofía quede impregnada en la gente de los poblados del sur, donde se está trabajando actualmente.

Además se persigue contribuir a cambiar la imagen de la minería que tiene la sociedad actual, damnificada por las condiciones a las cuales se trabaja, y por el impacto ambiental que siempre ha generado.

4. ALCANCE

Si bien este trabajo está basado en los procesos y técnicas utilizadas en San Cristóbal, es aplicable a gran parte de la minería artesanal en el Perú y en otros lugares.

La mayoría de los procesos que se describen en el trabajo, se repiten en una inmensa cantidad de poblados de la zona, que se dedican a la minería artesanal del oro, y que viven en condiciones semejantes a las de San Cristóbal.

Entre otras de las semejanzas con el poblado en estudio, destacan las del uso indiscriminado de sustancias contaminantes en sus procesos, además de no tener ningún tipo de control sobre los residuos que genera la actividad.

Es posible que las diferencias en los materiales que presenta cada yacimiento difieran en los métodos a proponer, pero en líneas generales, casi todos los depósitos de la zona tienen características similares, ya sean por las mineralizaciones que contienen, o por las leyes que estas presentan.

La legislación de los países del sur hasta ahora ha sido poco rigurosa en cuanto a temas medioambientales, y se agrava por el carácter de informalidad de las labores visitadas. Este trabajo es aplicable en este tipo de minería, ya que intenta evaluar y proponer medidas que se ajusten a la normativa medioambiental existente.

5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

5.1. TRABAJO DE CAMPO

5.1.1. ITINERARIOS TOPOGRÁFICOS

Los itinerarios topográficos se han llevado a cabo en las labores mineras de san Cristóbal para establecer en detalle las características topográficas de estas, lo que facilitaría después la modelización del terreno y la inserción de las labores en este.

Los itinerarios fueron realizados con cinta métrica de 30 metros, y brújula. Para posicionarse, se utilizó un GPS de la casa Garmin, modelo e-Trex Summit HC, con una precisión máxima de 3 metros.

Para efectos de uso y transformaciones, se utilizó el software de la casa Garmin, denominado MapSource.

La modelización del terreno se realizó con la aplicación MDT, del programa AUTOCAD 2008.

5.1.1.1. Metodología para itinerarios

Se realizaron itinerarios en todas las labores visitadas. Se utilizó el GPS para el posicionamiento inicial, y luego se continuó con brújula y cinta métrica. Se apuntaron todos los datos que sean significativos e importantes para la correcta interpretación de cara a cartografiar las labores, desde el aspecto topográfico, como para su estudio geológico.

La metodología utilizada es la siguiente:

- Se establece un punto de partida, donde se coloca el GPS el máximo de tiempo posible, con tal de lograr la precisión que la casa comercial indica.
- Se establecen los rumbos por medio de la brújula, y se miden con cinta métrica, hasta que la labor cambia de dirección.
- En caso que el largo de la labor con un mismo rumbo superase los 30 metros máximos de la cinta, se apunta como nueva medida, con el mismo rumbo, pero comenzando de 0 metros.
- Se toma nota de los lugares donde se cogen muestras de campo, con tal de dejarlo registrado en los itinerarios.
- Se registran la fecha del itinerario, para comprobar luego la declinación magnética que toca.

- Si bien se trata de depósitos de metales, que tal vez puede afectar el magnetismo de la zona, no se toman en cuenta a la hora de calcular las orientaciones.

Los datos de campo, y las orientaciones calculadas están en el Anexo 4.

5.1.2. MUESTREO

La etapa de muestreo se divide en dos tipos, dependiendo de la etapa dentro de los procesos que se realizan en San Cristóbal.

5.1.2.1. Muestreo para estudio geológico

Durante la etapa de estudio de las labores, paralelamente a la cartografía de las mismas, se hizo un muestreo de los materiales, tanto de las vetas como de la roca encajante.

El criterio aplicado es el de obtener muestras representativas de los diferentes materiales existentes, lugares de posibles leyes altas, lugares de poca ley, de formaciones significativas, con tal de entender, estudiar la formación de estos, y luego localizar los posibles lugares con mayores leyes.

5.1.2.2. Muestreo para estudio del procesamiento del mineral

Se estudiaron diferentes procesos que se realizan en San Cristóbal para la separación del oro. Se tomaron muestras de cada etapa de este, desde la de trituración, después de amalgamación, y finalmente después de la cianuración (Anexo 1).

El criterio aplicado es para obtener información acuciosa de las diferentes etapas del proceso, con tal de evaluar los rendimientos y leyes, no solo del oro, sino que también de posibles minerales asociados que puedan contener.

También a partir de las muestras obtenidas, se evaluaron los elementos contaminantes emitidos durante los procesos.

5.2. ETAPA DE LABORATORIO

5.2.1. ANÁLISIS QUÍMICO

El análisis químico fue realizado en los laboratorios ACTLABS, en Canadá, con la finalidad de obtener datos fieles de las leyes y elementos que contienen una serie de muestras representativas de cada etapa del proceso.

Las técnicas utilizadas en el análisis se denominan FA-GRA (Fire Assay with Gravimetric finish), el cual es utilizado para pequeñas concentraciones de elementos, del orden de unos pocos ppm, hasta 10000 ppm, niveles a los cuales el método ya no detecta. Por esta razón solo se utilizó esta técnica para valorar la cantidad oro y plata.

Además de la técnica FA-GRA, se utilizó el método denominado AR-ICP, un tipo de ensayo que determina cuantitativamente elementos en materiales geológicos no procesados. Este tipo de ensayo se utiliza normalmente cuando se sospecha el contenido de altos niveles de ciertos elementos. Solo 0,5 g del material se digiere en agua regia, y diluido volumétricamente a 250 ml con agua de 18 mega ohm. Materiales de referencia se van digiriendo, mientras se verifica las cantidades estándar a la muestra. Es importante decir que para altas concentraciones de elementos, el ensayo no detecta estos niveles.

5.2.2. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICOS

Los análisis granulométricos de las muestras antes de ser ensayadas se han realizado en el laboratorio granulométrico del Departament d'Estratigrafia, Paleontologia i Geociències Marines de la Universitat de Barcelona. El equipo utilizado es un analizador de partículas Coulter Electronics LS230 que mide partículas de tamaño entre 0.04 y 2000 μm .

5.2.3. MICROSCOPÍA ÓPTICA

Se han obtenido probetas pulidas de muestras de mineralización de diferentes minas de San Cristóbal donde se está explotando el oro. Estas probetas se han observado al microscopio petrográfico con luz reflejada, lo que permite identificar los diferentes minerales presentes y observar las texturas que presentan.

5.2.4. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA

Se ha llevado un análisis de microscopía óptica, con el equipo Hitachi Tabletop Microscope TM-1000 (Microscopio de Fuerza Atómica), del Departament d'Enginyeria Minera i Recursos Naturals de la EPSEM (Fig. 1).

Este equipo tiene características nanotecnológicas que lo hacen idóneo para esta labor, por su gran poder de resolución, su capacidad de capturar imágenes con una gran nitidez y la facilidad de uso.

Fue posible capturar imágenes de unas cuantas micras, a una resolución de máxima de 10000 x, con la ventaja de tener fotos escaladas, dando una gran ayuda a la hora de interpretar datos.

Con las imágenes generadas, se pudo determinar parámetros, como tamaño de grano de partículas antes de la trituración, después de esta, de materiales que fueron objeto de los ensayos de laboratorio, así también para identificar los ataques del ácido durante los ensayos de cloración.



Fig.1. Microscopia óptica, laboratorio de geología, EPSEM.

Si bien la falta de herramientas para identificar elementos dentro de las muestras analizadas por este microscopio, estas falencias son compensadas con el uso de la microscopía de rastreo.

Para observar las muestras de roca que contienen la mineralización en probetas, así como el material triturado antes y después de los ensayos de laboratorio se utilizó la microscopía electrónica de barrido, en los Serveis Científico-Tècnics de la Universitat de Barcelona. El microscopio usado fue un Scanning Microscope JSM-840, el cual es capaz de tomar imágenes a una resolución de 800 píxeles, y de realizar espectrogramas, lo cual es una ventaja de cara a reconocer los diferentes materiales en todas las fases de la investigación. Se utilizó una corriente de 20 kV e imágenes de electrones secundarios (SE) y retrodispersados (BSE). Para hacerlas conductoras a los electrones, las muestras fueron cubiertas con carbono previamente a la observación al microscopio.

6. DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA ZONA DE ESTUDIO

Los objetivos de este proyecto se pretenden conseguir a través del estudio del depósito en el área del procesamiento. Para eso, se comienza con una fase descriptiva general de la zona de estudio, para reconocer las características de esta.

6.1. SITUACIÓN SOCIO-ECONÓMICA

San Cristóbal (Fig. 2), de 400 habitantes, así como la mayoría de los centros mineros artesanales en Perú, realizan la actividad de manera informal, con condiciones básicas mínimas, como es la poca disponibilidad de agua potable, electricidad pocas horas al día, y la falta de una red sanitaria básica. Se pueden diferenciar dos estructuras organizativas: (1) Una asociación de mineros artesanales, que junta los grupos familiares, de 2 o 3 dueños por cada labor, realizando solo el trabajo de perforación y extracción, y solo unos cuantos tienen infraestructura para procesamiento de mineral, (2) una organización de la comunidad, que vela por el desarrollo del poblado en general.

No cuentan con centros médicos, escuelas ni policía, siendo el poblado más cercano con estas prestaciones, la ciudad de Chuquibamba, a 8 horas en autobús por carreteras afirmadas. A pesar de ello, la población está bien organizada, intentando avanzar en aspectos de calidad de vida, mermada también por la poca accesibilidad a la zona, desprovista de carreteras o caminos, incluso con vehículos todoterreno no se puede llegar hasta el poblado. A pesar de todo, los pobladores han tratado de mejorar en temas de gestión de residuos, y de instalaciones sanitarias.

Se espera una mejora en la calidad de vidas de las personas de este centro minero gracias a los planes de construir una carretera que conecte el camino principal con el poblado, inversión compartida por los mismos mineros y una parte importante por el gobierno peruano.



Fig. 2. Aspecto general del poblado.

6.2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

Al sur del Perú (Tabla 1), en la región de Arequipa (Fig. 3-A), dentro de la provincia de Condesuyos (Fig. 3-B), en plena cordillera de los Andes, se desarrolla este poblado minero, que debe su existencia gracias a la presencia de una compañía minera en la zona llamada MINARSA que, (1) dejó de explorar algunos sectores con indicios de vetas mineralizadas, y que incluso ya habían sido explotada en la época de la colonia, por su baja ley en términos de una explotación a gran escala, (2) por la accidentada geografía, que dificultaba aun más la extracción del mineral por parte de la empresa. Los mineros aprovecharon los trabajos hechos por la empresa, y comenzaron a explotar por cuenta propia el yacimiento.

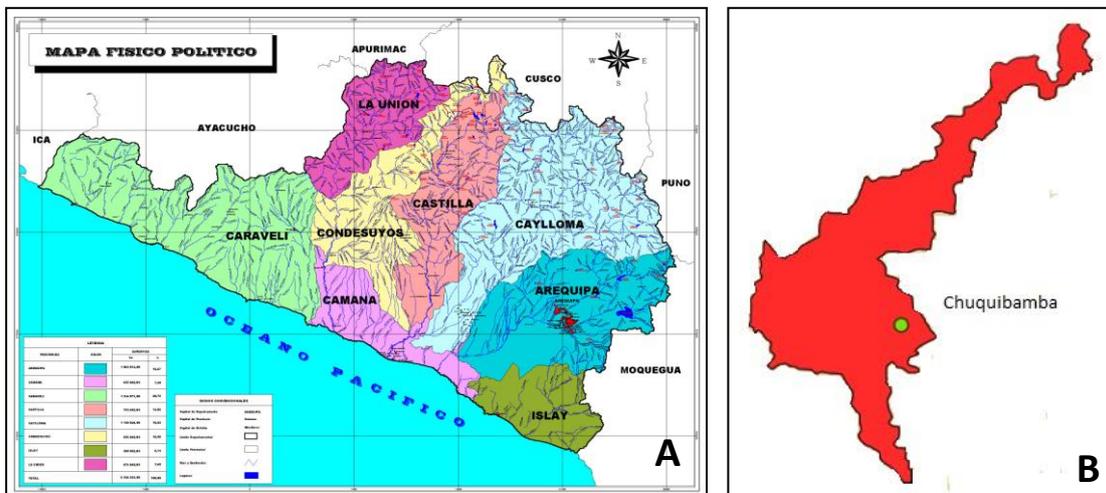


Fig. 3. (A) Plano físico-político de la región de Arequipa. (B) Plano físico-político de la provincia de Condesuyos.

Tabla 1: Ficha geográfica de San Cristóbal

Poblado	San Cristóbal
Anexo	Arirahua
Distrito	Yanaquihua
Provincia	Condesuyos
Región	Arequipa

Así, el centro minero San Cristóbal se enmarca dentro de lo que podemos llamar el círculo minero de Yanaquihua, provincia donde se encuentra una gran cantidad de poblados alimentados tanto por minería artesanal, como minería a gran escala, incluso algunas de peso

a nivel nacional. Además de este poblado, dentro del distrito de Yanaquihua, se encuentran los poblados de Cerro Rico y Base Rey, además en San Juan de Churunga se encuentra la empresa minera CENTURY MINING PERÚ, también dedicada a la explotación de vetas auríferas.

El accidente geográfico más significativo es la quebrada San Cristóbal (Fig. 4-A), al cual el poblado debe su nombre, profunda depresión que nace a partir del cerro Torrempampa, y es escoltada de este a oeste hasta su desembocadura en el río Ocoña por el cerro Percoy y el cerro Chaqueloma, cuyas cotas sobrepasan con facilidad los 4000 m, disminuyendo de forma drástica hasta los 2000 m al fondo de la quebrada, en pocos kilómetros lineales.

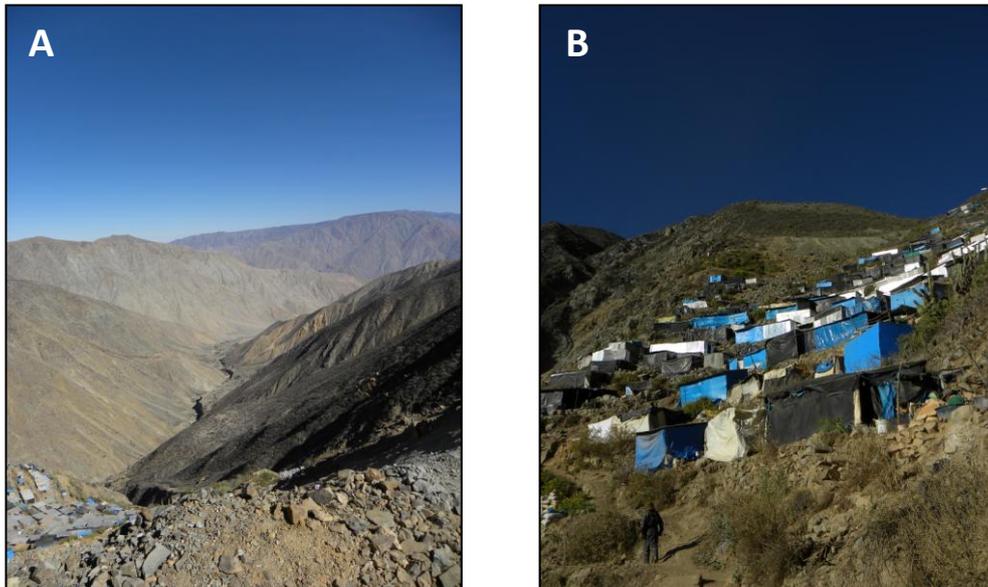


Fig. 4. (A) Vista quebrada San Cristóbal, (B) Vista general del poblado.

El poblado se encuentra en la ladera oeste del cerro Torrempampa, inserto en pendientes abruptas y poco estables, de hasta 40° de inclinación, en dirección Este-Oeste, a una cota aproximada a los 3145 m (Fig. 4-B).

Las labores explotadas rodean al poblado por el lado norte de este, por donde nace una pequeña depresión que desemboca en la Quebrada San Cristóbal (Fig. 5-A), y donde se encuentra la veta principal. Por el lado sur del San Cristóbal se encuentran las instalaciones de procesamiento del mineral, tanto de trituración, depósitos de relaves y plantas de cianuración. (Fig. 5-B)

Más al sur, ya en el comienzo de la quebrada San Cristóbal, también hay labores, y se diseminan lo largo de la quebrada, pasando por las cotas más altas, sobre los 3000 m, hasta el fondo de la quebrada, por debajo de los 2400 m.



Fig. 5. (A) Vista lateral de la quebrada, (B) Vista de las plantas de procesamiento del mineral.

6.3. GEOGRAFÍA FÍSICA

6.3.1. TOPOGRAFÍA

El objetivo de la base topográfica combina el estudio geológico, el muestreo realizado en la zona, y el estudio hidrológico correspondiente. Sabiendo las características topográficas del lugar, podemos concluir cuales son las condiciones de drenaje de la zona, parámetro importante de cara a controlar efluentes contaminantes de las actividades mineras.

Así, el área de estudio comprende una serie de valles en forma de V, con laderas empinadas y en general poco estables, cortadas por quebradas de fuertes pendientes. La parte más alta, por encima del poblado se puede encontrar llanuras más suaves y pendientes más moderadas. Sin embargo, el accidente más significativo es la quebrada San Cristóbal, profundo valle con una disminución de cota de forma abrupta, provocando un relieve muy empinado en ciertos sectores. La Fig. 6 muestra en tres dimensiones una vista de la quebrada, en la parte central, y las cotas altas a los costados de esta.

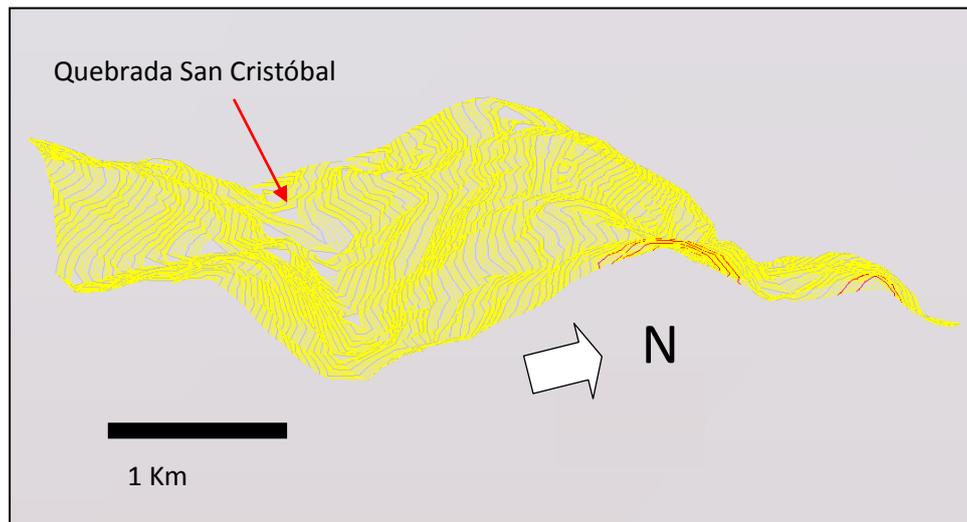


Fig. 6. Topografía de San Cristóbal.

6.3.2. GEOMORFOLOGÍA

Los rasgos geomorfológicos evaluados nos muestran geo-formas moderadas, accidentadas y agrestes en las quebradas. El área de estudio forma parte de las estribaciones de la cordillera occidental de los Andes del sur del Perú, el relieve del suelo es accidentado e irregular en superficie, a manera de una depresión de forma sub-redondeada. La diferencia de cotas entre el área más elevada y el área de estudio es entre 3145 y 2645 m. Asimismo, se identificó la presencia de cañones profundos al sur y oeste del área de estudio, cuya morfología es característica de zonas altas.

6.3.3. HIDROLOGÍA

En el área de influencia hidrológica destaca el río Ocoña, al cual la quebrada San Cristóbal es afluente (Fig. 7).

El río Ocoña nace a casi 5500 m de altitud con el nombre de quebrada Compepalca y luego toma la denominación del río Cuspa. Tiene su origen en la confluencia de los ríos Huanca y Oyolo, los cuales colectan todo el drenaje de las quebradas de la parte alta de la Cuenca. Estos ríos originan en su confluencia el río Uchubamba, que toma después el nombre de Marán. En su confluencia por la margen izquierda con el río Cotahuasi toma el nombre de río Ocoña, que conserva hasta su desembocadura en el Océano Pacífico.

En el área de estudio, la accidentada topografía origina lugares apropiados para el drenaje de aguas superficiales, pero debido a la escasa precipitación, estos drenajes se encontrarán secos la mayoría de las veces.

Las aguas subterráneas juegan un papel fundamental en esta localidad, ya que son las que abastecen de agua al poblado para necesidades humanas y para efectuar actividades mineras. También significan un problema, ya que acidifican los depósitos, y como se verá más adelante, representan un problema para recuperar el oro con mercurio. El tipo de suelo es desértico, pero con una infinidad de fallas provocadas por la intensa tectónica de la zona, favorecen a la percolación de aguas, que provienen más que nada del derretimiento de nieves a cotas más altas cercanas, como lo es la del nevado Coruma, 3997m.

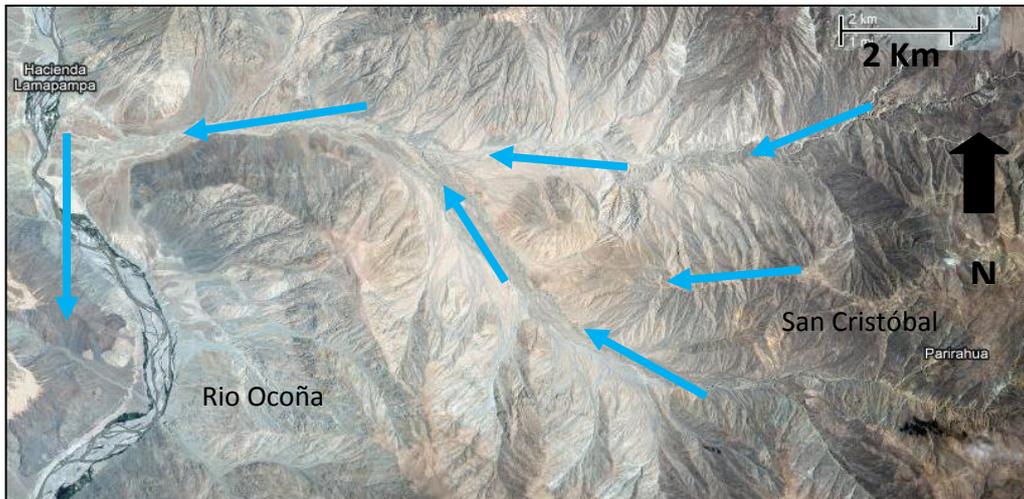


Fig. 7. Red hidrológica del área en estudio (Google earth).

6.3.4. SUELOS

Las características edáficas (INRENA, 1996) los suelos en el área de influencia son del tipo Leptosol Lítico-afloramiento Lítico y Leptosol Dístrico-andosol Vítrico.

Los Leptosoles son suelos poco desarrollados y se considera un tipo de suelo que aparece en escarpas y afloramientos rocosos, su espesor es menor a 10 cm y sostiene una vegetación baja, Debido a su escaso espesor, tienen escasa capacidad de retención del agua y son los más propensos a la erosión

6.3.5. CLIMATOLOGÍA

Las condiciones climáticas son importantes para el desarrollo del presente proyecto, porque de estas depende el nivel de propagación de agentes contaminantes en el medio generadas por esta actividad. Los procesos necesitan de una importante fuente de agua, pero la abundancia de esta ayuda a la propagación de los residuos que generan, si no se controlan debidamente.

La estación del SENAMHI más cercana al pueblo de San Cristóbal (3145 m), se ubica en el pueblo de Yanaquihua, a 13 km de distancia al Sudeste (3130 m).

Por lo tanto, se asignarán los datos de esta estación a la climatología de este pueblo.

En general el clima de la zona es templado y relativamente húmedo, con escasa precipitación, de enero a marzo se presentan lluvias moderadas. En los demás meses del año se nota la presencia de actividad solar. La oscilación térmica entre las horas de sol y la noche es considerable, muy de acorde con climas de tipo desértico, llegando a tener diferencias de hasta 12 grados Celsius.

Precipitación: En el área se producen escasas lluvias, tal es el caso que en algunos años no se han registrado precipitaciones, por lo que es notoria la ausencia de las lluvias que puedan generar escorrentías. Después de varias ocurrencias de lluvias y cuando los suelos se han saturado, entonces la mayor parte de las precipitaciones se convierten en escorrentías, las mismas que discurren por las quebradas existentes.

Aunque en el área, la mayoría de las lluvias individuales son de corta duración y de poca cantidad, hay chubascos individuales de alta intensidad. Esta condición esporádica hace prever que generalmente, aún para precipitaciones muy extraordinarias, la humedad retenida en el suelo no sea excesiva. La media anual en la Estación Climatológica Ordinaria Yanaquihua para un periodo de 10 años (1998 - 2007), es de 158.4 mm. Mismo así, se tienen datos de precipitaciones máximas diarias de 68.5 mm (Enero 1987) y 55.0 mm (Marzo 1 972), que no sucedieron en los años extraordinarios del fenómeno del Niño en 1983 y en el verano entre 1997-1998.

Temperatura: De manera referencial se cuenta con datos de temperatura de la Estación Yanaquihua para un periodo de tres años (1998 – 2000). Según estos datos la temperatura máxima media mensual más alta es de 23.4 °C (marzo – 1998) y la temperatura mínima media mensual más baja es de 6.5 °C (julio – 2000).

Humedad: La humedad relativa promedio mensual en los meses de invierno puede llegar a 27.7% y en los meses de verano a 78.9%.

Vientos: La velocidad media del viento, varía entre 2.3 a 9.0 m/s. y la dirección predominante es SW.

6.4. GEOLOGÍA

El marco geológico global está influenciado por la formación más importante del continente americano, la Cordillera de los Andes, que debe su formación a la interacción continua de dos placas tectónicas, la de Nazca y la Sudamericana (Murphy y Nance, 2004) (Fig. 8).

Por lo tanto se trata de una zona de gran actividad volcánica, lo que genera un alto grado de sismicidad, y es algo que caracteriza al Perú y al resto del continente. Es por esta gran actividad que se dan las condiciones ideales para la formación de diferentes depósitos, variadas naturalezas y edades.

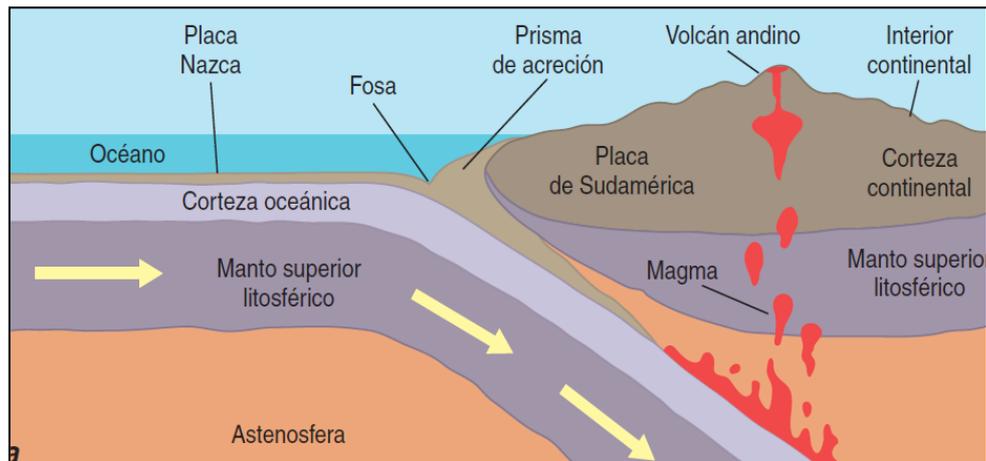


Fig. 8. Subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana (Murphy y Nance, 2004).

Uno de los fenómenos más importantes, y del cual se debe la existencia de una extensa franja de zonas con mineralizaciones, sobre todo del tipo metálico, es un alto rango de intrusión de rocas batolíticas desde el suelo subvolcánico. Esto provoca en primer lugar, una combinación de fluidos saturados del magma residual, transportando elementos que luego son depositados en las fallas provocadas por este alto grado de sismicidad, formando así una interesante red de mineralizaciones en vetas.

6.4.1. FORMACIONES EN TERRITORIO PERUANO

Las principales formaciones en territorio peruano (Fig. 9), está claramente dividido en tres grandes áreas: (1) Una zona tropical, al este del país, con mayoría de materiales del tipo sedimentario, (2) una zona central cordillerana, con presencia de rocas ígneas y de material piroclástico, y (3) un área costera, con dos subdivisiones, una pre-costera, con gran predominio de rocas metamórficas, y un sector costero, con materiales poco consolidados.

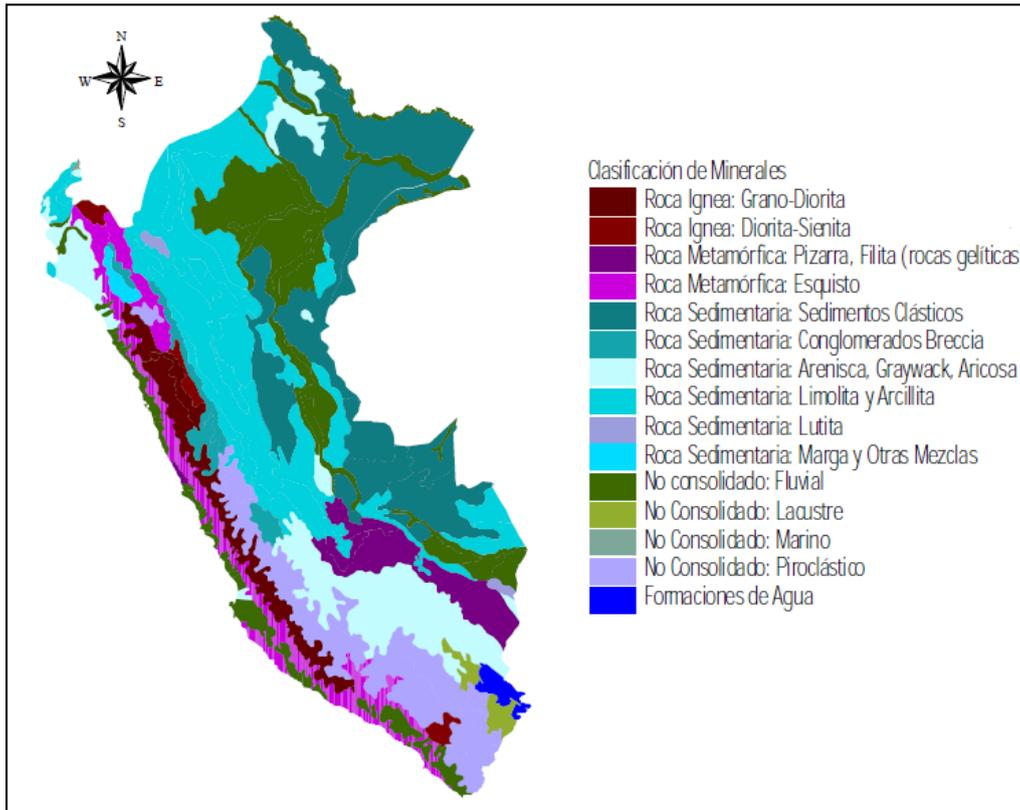


Fig. 9. Formaciones y composición del substrato peruano (Escobal, 2000).

6.4.2. GEOLOGÍA LOCAL

San Cristóbal se encuentra ubicado en la franja metalo-genética de Cu-Mo, en el área central. Predominan las rocas ígneas del Cretácico Superior, y un material piroclástico poco consolidado, probablemente más reciente, del cuaternario (Acosta, 2005).

Según datos del INGEMET (2004) (Fig. 10), los materiales dominantes en el cuadrante al cual pertenece la Quebrada San Cristóbal son las siguientes:

- Materiales precámbricos del Complejo Basal, formada por Gneises bandeados y anfibolitas
- Materiales del Cretácico Superior, correspondientes a la Formación Súper Unidad Tiabaya, con granodioritas, dioritas, dacitas y andesitas porfídicas
- Clastos y gravas en matriz limo arenosa del Holoceno (Cuaternario).

La zona de estudio está conformada por rocas ígneas intrusivas y rocas sedimentarias, cuyas edades corresponden al Precámbrico, seguido de materiales del cretáceo Superior y Cuaternario. Haremos una breve descripción de estos materiales



Fig. 10. Situación geológica local (INGEMET, 2004). Super Unidad Tiabaya: Ks-ti/gd: granodiorita y diorite; Ks-an: dacitas y andesitas porfíricas; Complejo Basal: PE-gn: gneises bandeados y anfibolitas; Cuaternario: Qh-al.

Los materiales más antiguos corresponden al **Complejo Basal** y son gneises bandeados y anfibolitas. Después se encuentran los de la **Súper Unidad Tiabaya** (Cobbing y Mallick, 1983), que es una formación del Cretácico Superior, de naturaleza granodiorítica (Fig. 11-A).

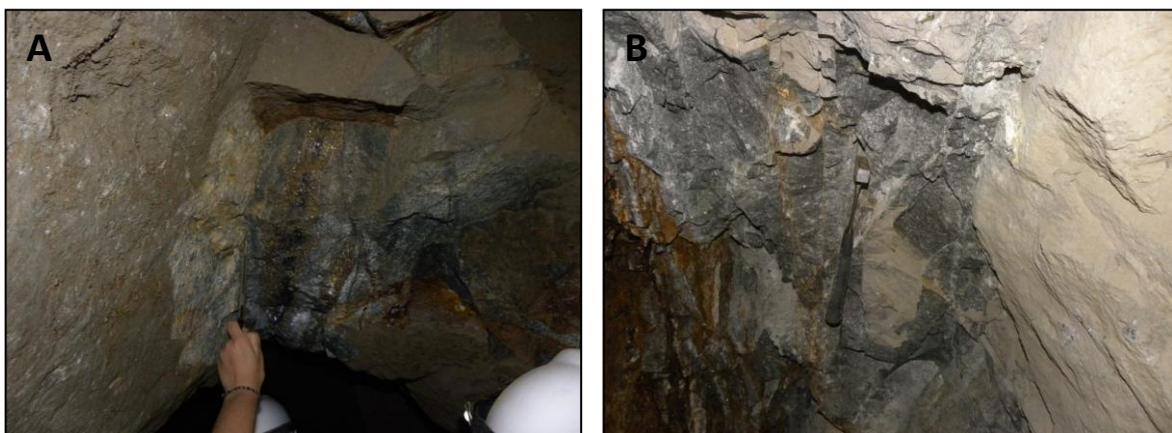


Fig. 11. Imágenes obtenidas dentro de las labores visitadas en la etapa de trabajo de campo; (A) Veta encajando en granodiorita, (B) Pórfido andesítico.

Además se pueden encontrar rocas más básicas, como las dioritas. Esta unidad litológica constituye la roca huésped de las estructuras mineralizadas. Además a menudo aparece un pórfido andesítico (Fig. 11-B). La mayoría de los cuerpos de rocas porfídicas tienen rasgos texturales que indican que han cristalizado en condiciones subvolcánicas (González, 2001).

Suprayaciendo a la roca intrusiva, así como el fondo de la quebrada, se encuentran **depósitos aluviales**, conformados principalmente por clastos y gravas en una matriz de limo arenosas. Perteneciente a la serie holoceno, del cuaternario (Fig. 12).



Fig. 12. Depósitos aluviales.

6.4.3. TECTÓNICA

La zona de estudio se caracteriza por estar profundamente tectonizada, traduciéndose principalmente en fallas. Las familias principales de fallas se encuentran en direcciones E-W y NW-SE. La mayoría de las fallas observadas presentan un buzamiento muy elevado, de alrededor de 80° N. Los fluidos mineralizantes aprovechan estas fallas para circular, de tal manera que la mayoría de las vetas se encuentran emplazadas siguiendo las fallas. Además estas fallas a menudo desplazan las vetas mineralizadas, por lo que su localización es muy importante. Estas fallas delatan su movimiento por las estrías dejadas, indicando el roce entre las caras de esta (Fig. 13).



Fig. 13. Estrías que delatan el movimiento de la falla.

6.4.4. MINERALIZACIÓN

La mineralización se encuentra fundamentalmente en vetas; las vetas forman un sistema hidrotermal, presentando rumbos E-W, coincidiendo con las fallas encontradas, presentando tendencial al paralelismo. La composición principal de las vetas es de cuarzo. Las menas consisten en sulfuros, principalmente pirita, calcopirita, esfalerita, galena, arsenopirita y oro nativo (Fig. 14, 15). Se pueden observar también muchas alteraciones de cobre, como malaquita, azurita y calcantita.



Fig. 14. Veta mineralizada de cuarzo.

En este caso el oro se encuentra encapsulado entre la pirita y arsenopirita. A diferencia de otros depósitos de oro cercanos a San Cristóbal, como en el caso de Misky (Palacios et al., 2009) donde el oro además se presenta rellenando fracturas formando una aleación con plata llamada electrum.

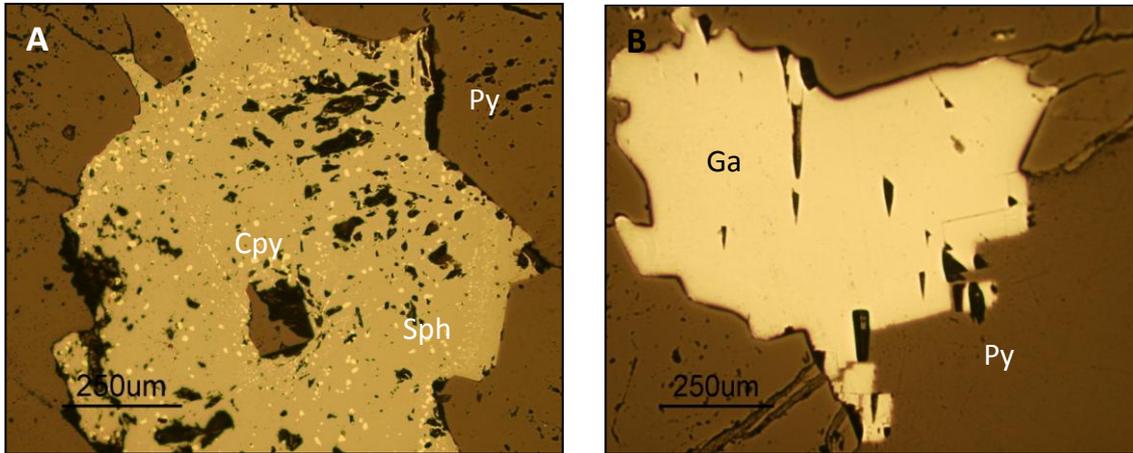


Fig. 15. Imágenes del microscopio óptico de luz reflejada (A) Esfalerita atacada por calcopirita, (B) Forma característica de la galena, con interposiciones triangulares, producidas por fractura debido a su fragilidad.

En este yacimiento se presenta el oro nativo y no el de tipo electrum (Fig.16). Además de comprobar la existencia de oro, se han encontrado diferentes elementos asociados, como el bismuto y plata, que conforman las mineralizaciones del enclave de estudio. Se pueden identificar las partículas de oro en una matriz de pirita, y las sulfosales de bismuto en la misma disposición dentro de esta matriz (Fig. 17).

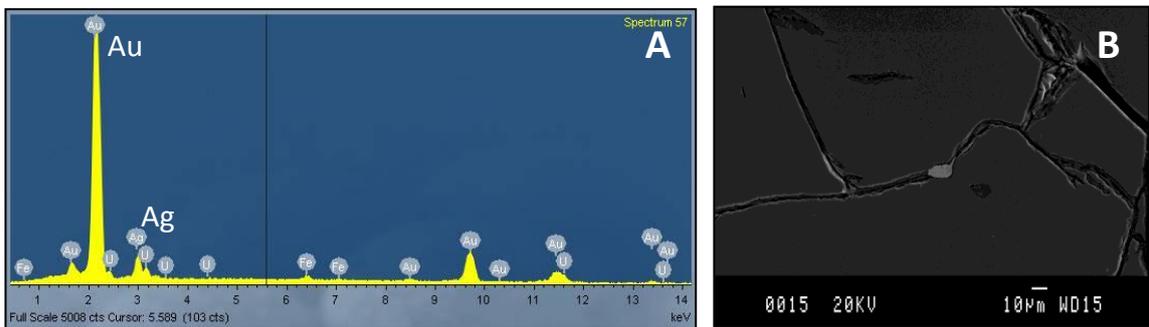


Fig. 16. (A) Espectrogramas de la muestra SC-68, (B) Imagen correspondiente de la muestra.

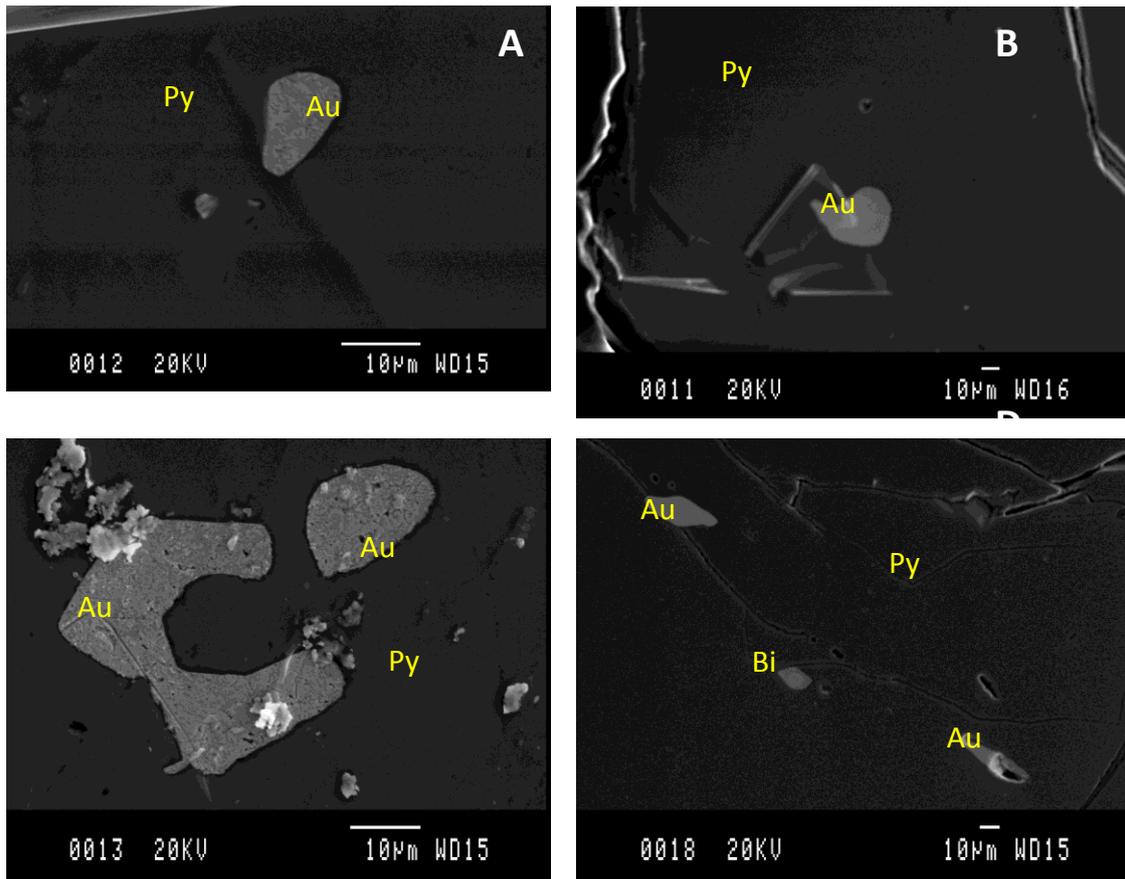


Fig. 17. (A, B y C) Oro en la matriz de pirita, (D) Sulfosales de bismuto.