



El futuro
es de todos

Minenergía



GUÍA METODOLÓGICA
PARA EL MEJORAMIENTO
PRODUCTIVO DEL BENEFICIO
DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO

MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA
Y CARAMANTA



El futuro
es de todos

Minenergía

GUÍA METODOLÓGICA
PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO
DEL BENEFICIO
DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO.

**MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA
Y CARAMANTA**



© Servicio Geológico Colombiano

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO
DEL MERCURIO. MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA Y CARAMANTA

Bogotá, Colombia

Este documento se ha elaborado en el marco del Convenio Interadministrativo GGC n.º 311 de 2017, celebrado entre el Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano, cuyo propósito fue la elaboración de una guía metodológica mediante la caracterización mineralógica, química, metalúrgica y ambiental de la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia), aplicada al mejoramiento productivo de la extracción del oro sin el uso de mercurio en el proceso de beneficio en la pequeña minería de Colombia.

Este documento debe citarse así: Servicio Geológico Colombiano, Ministerio de Minas y Energía, Guía metodológica para el mejoramiento productivo del beneficio de oro sin el uso de mercurio: Marmato, Riosucio, Quinchía y Caramanta. Bogotá, Colombia, 2018.

Ministerio de Minas y Energía
Viceministerio de Minas
Dirección de Formalización Minera

Servicio Geológico Colombiano
Dirección de Laboratorios, Grupo de Trabajo Cali.

La imagen muestra el trabajo de una mesa de concentración en una planta de beneficio, mientras se recolectan algunas muestras de las colas. Fotografía tomada por Harold Concha (Servicio Geológico Colombiano).

ISBN: 978-958-52286-3-4



9 789585 228634

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

MARÍA FERNANDA SUÁREZ LONDOÑO
Ministra

PABLO CÁRDENAS REY
Secretario general

CAROLINA ROJAS HAYES
Viceministra de minas

JHON LEONARDO OLIVARES RIVERA
Director de Formalización Minera (E)

GILSON LEÓN GONZÁLEZ
Supervisor del convenio

CAMILO ENRIQUE ÁLVAREZ
Equipo jurídico-contractual

🏠 Punto de atención presencial: Calle 43 n.º 57-31, CAN, Bogotá D.C., Colombia
☎ PBX: (57) +1 2200300 / Línea gratuita nacional: 01 8000 910 180
✉ Código postal 111321

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

OSCAR PAREDES ZAPATA
Director general

EDGAR URIEL RODRÍGUEZ ROMERO
Secretario general

HÉCTOR MANUEL ENCISO PRIETO
Director técnico de Laboratorios

JORGE IVÁN LONDOÑO ESCOBAR
Supervisor del convenio

LUIS CARLOS QUINTERO MARTÍNEZ
Apoyo a la supervisión del convenio

CAROLINA DEL PILAR PINEDA MURCIA
Grupo de trabajo de contratos y convenios

OLGA PATRICIA ROCHA SÁNCHEZ
Grupo de trabajo de planeación

🏠 Punto de atención presencial: diagonal 53 n.º 34-53, Bogotá D.C., Colombia
☎ PBX: (57) +1 2200200 / 220 0100 / 222 1811 / 222 07 97. Línea gratuita nacional: (571) 01 8000 110842
✉ Código postal: 110842.

PRESENTACIÓN

La presente *GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DEL ORO SIN EL USO DEL MERCURIO MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA Y CARAMANTA* se traduce en un aporte significativo del Servicio Geológico Colombiano a la minería en Colombia, atendiendo un claro compromiso del Ministerio de Minas y Energía por la preservación de la salud humana y la mitigación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas que no cumplen plenamente con las normas y mandatos, nacionales e internacionales, orientadas hacia la eliminación del uso del mercurio en la actividad industrial minera.

Ésta guía metodológica y la generación de conocimiento geocientífico, en general, que realiza el Servicio Geológico Colombiano es consonante con lo preceptuado en las bases para la consolidación de una política de Estado en ciencia, tecnología e innovación (*artículo 3º. Ley 1286 de 2009 por la cual se modifica la Ley 29 de 1990, se transforma a COLCIENCIAS en Departamento Administrativo, se fortalece el Sistema Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación en Colombia y se dictan otras disposiciones.*), entre las que se destacan: *Incorporar la investigación científica, el desarrollo tecnológico y la innovación a los procesos productivos, para incrementar la productividad y la competitividad que requiere el aparato productivo nacional; integrar esfuerzos de los diversos sectores y actores para impulsar áreas de conocimiento estratégicas para el desarrollo del país; promover el desarrollo de estrategias regionales para el impulso de la Ciencia, la Tecnología y la Innovación, aprovechando las potencialidades en materia de recursos naturales.*

El Ministerio de Minas y Energía, mediante la adopción de la “Política Minera Nacional”, estableció claramente que “... *El objetivo fundamental es que la actividad minera en todas sus escalas, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva y responsable*”, ante lo cual el Servicio Geológico Colombiano, dentro de los ámbitos de su competencia como Entidad perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación, genera nuevo conocimiento geocientífico, aportando en la solución de la necesidad que tiene el país de fomentar alternativas tecnológicas de producción más limpia para los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso del mercurio.

A lo largo de ésta guía metodológica, el lector podrá encontrar una descripción integral de los resultados del estudio, para lo cual, se incluyen capítulos como el Marco de Referencia, donde se indica la situación actual de la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia), los objetivos y el alcance de la guía; Metodología de Trabajo; Aspectos Geológicos, Metalúrgicos, Químico y Ambientales; Ruta Metalúrgica Propuesta; Estudio Económico y Financiero.

Vale la pena resaltar, que la guía metodológica no se centró solamente en definir elementos puramente tecnológicos, sino que se consideró relevante y necesario realizar un análisis económico y financiero riguroso y real, con fin de establecer la conveniencia de emprender exitosamente un proyecto minero y efectuar una asignación eficiente de recursos. En este capítulo se incluyen los fundamentos metodológicos, mínimamente necesarios, para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación futura de su planta de beneficio, utilizando la ruta metalúrgica propuesta en esta guía.

Oscar Paredes Zapata
Director General
Servicio Geológico Colombiano

AGRADECIMIENTOS

El Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano agradecen a todas las personas que realizaron aportes al desarrollo de la presente Guía metodológica, quienes se mencionan en los listados de participantes, así como a los integrantes del equipo de trabajo y a la Universidad Nacional de Colombia.

Se agradece al personal docente de la Universidad de Caldas, Departamento de Ciencias Geológicas, por facilitar el contacto con los mineros de la región; asimismo, se agradece a los mineros de la zona de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia) por abrir sus puertas y recibir a las instituciones para permitir la investigación, el reconocimiento y muestreo en las diferentes minas y plantas de beneficio.

GUÍA METODOLÓGICA PARA EL MEJORAMIENTO PRODUCTIVO DEL BENEFICIO DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO. MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA Y CARAMANTA

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA
SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

AUTORES SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO

Director Técnico de Laboratorios SGC:

Héctor Manuel Enciso Prieto. Químico, Magister en Administración

Coordinador del Grupo de Trabajo Cali SGC y supervisor del Convenio Interadministrativo GGC 311 de 2017:

Jorge Iván Londoño Escobar. Ingeniero químico, MSc en Ciencias Químicas

Apoyo a la coordinación y supervisión del Convenio GGC 311 de 2017 - Sede SGC Bogotá:

Luis Carlos Quintero. Geólogo, Administrador Público

GRUPO DE GEOLOGÍA

Jaime Mojica. Geólogo, experto en petrografía (Responsable del grupo)

Sonia Rojas Barbosa. Geóloga, MSc en Ciencias Geología

Óscar David Cardona Sánchez. Geólogo

Paulo Duarte Hernández. Geólogo

Eliana Molina Ramírez. Pasante de Geología

GRUPO DE METALURGÍA

Harold Concha. Ingeniero químico, especialista en Metalurgia (Responsable del grupo)

Wilmar David Montenegro. Ingeniero Químico (Responsable de mantenimiento y calibración de equipos)

Benedicto Galindo Aguirre. Ingeniero Metalúrgico

Fabián Ramírez Pita. Ingeniero Metalúrgico

Silvia Fuentes Torres. Ingeniera Metalúrgica

Jhon Alejandro Espinal. Pasante de Ingeniería Química

GRUPO DE QUÍMICA

Verónica Ruiz Solano. Química, MSc en Ingeniería Sanitaria y Ambiental (Responsable del grupo)

Viviana Pérez. Química, (Responsable de gestión de calidad)

Yolanda Cañón Romero. Química, especialista en Ing. Sanitaria y Ambiental

Annie Alexandra Arango. Tecnóloga Química

Daniel Castañeda Pinzón. Tecnólogo Químico

Giovanni Andrés Alarcón. Técnico Operativo

Liseth Irene Franco. Pasante de Ingeniería Sanitaria y Ambiental

ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA

Yury Marentes Laverde. Economista

DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

Juan Sebastián Garzón. Diseñador Industrial

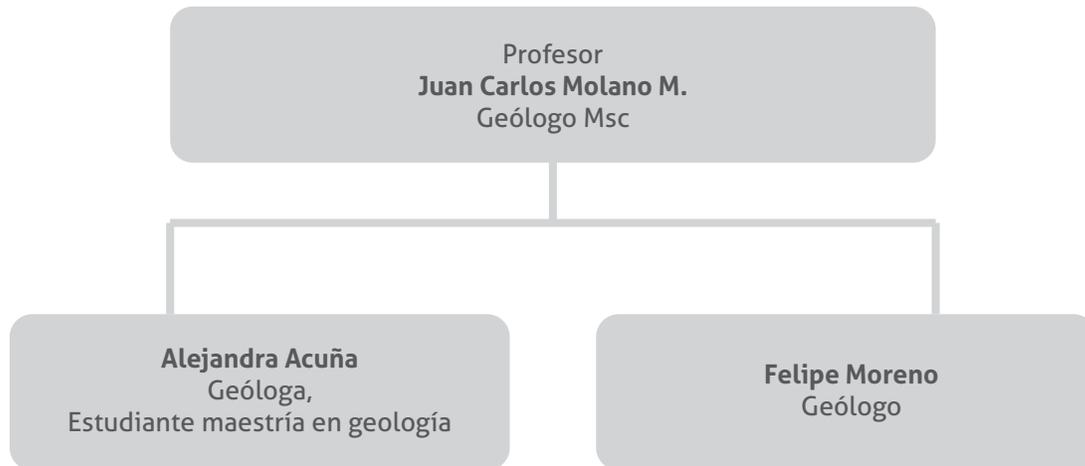
IMPRESIÓN

Imprenta Nacional de Colombia

Primera edición

Bogotá, Colombia. 2018

**GRUPO TÉCNICO UNIVERSIDAD NACIONAL
DE COLOMBIA - DEPARTAMENTO DE GEOCIENCIAS**



**GRUPO TÉCNICO DE LA FACULTAD DE GEOLOGÍA
DE LA UNIVERSIDAD DE CALDAS, DIRIGIDO POR
LOS PROFESORES SERGIO CASTRO Y MAURICIO ALBARÁN**

**GRUPOS DE MINEROS DE LOS CABILDOS INDÍGENAS DE RIOSUCIO
Y DE LA COOPERATIVA DE MINEROS DE QUINCHÍA.**

CONTENIDO

PRESENTACIÓN	
AGRADECIMIENTOS	
EQUIPO DE TRABAJO	8
INTRODUCCIÓN	13
CAPÍTULO 1. MARCO DE REFERENCIA	15
1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL	17
1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD	20
1.3. OBJETIVOS	23
1.3.1. Objetivo General	23
1.3.2. Objetivos Específicos	23
1.4. ALCANCE	24
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO	25
2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	28
2.2. MUESTREO	28
2.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN	28
2.4. PRUEBAS	28
CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO	29
3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	31
3.1.1. Municipio de Marmato (Caldas)	32
3.1.2. Municipio de Riosucio (Caldas)	33
3.1.3. Municipio de Quinchía (Risaralda)	34
3.1.4. Municipio de Caramanta (Antioquia)	35
3.2. LOCALIZACIÓN DE MINAS Y PLANTA DE BENEFICIO - MARMATO	36
3.3. VÍAS DE ACCESO	36
CAPÍTULO 4. ASPECTOS GEOLÓGICOS	38
4.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS : GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES	40
4.1.1. Generalidades de los yacimientos auríferos	40
4.1.2. Identificación de minerales en el frente de mina	44
4.1.3. Sulfuros metálicos asociados a la mena	45
4.1.4. Tipos de ocurrencia de oro	46
4.2. GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA DE LA ZONA MINERA DE MARMATO, RIOSUCIO (CALDAS), QUINCHÍA (RISARALDA) Y CARAMANTA (ANTIOQUIA)	47
4.2.1. Geología regional	47
4.2.2. Geología local y mineralogía de la mena	48
4.2.2.1. Sector Marmato	48
4.2.2.2. Sector Riosucio	48
4.2.2.3. Sector Quinchía	49
4.2.3. Geología estructural	49
4.2.4. Alteración hidrotermal	51
4.2.4.1. Sector Marmato	52
4.2.4.2. Sector Riosucio	52
4.2.4.3. Municipio Quinchía	52
4.2.5. Metalogénesis y mineralización aurífera	52
4.2.5.1. Municipios Marmato - Caramanta	52
4.2.5.2. Municipio Riosucio	55
4.2.5.3. Municipio Quinchía	56
4.2.6. Ocurrencia de oro en veta	58
4.2.6.1. Municipio Marmato – Caramanta	58
4.2.6.2. Municipio Riosucio	59
4.2.6.3. Municipio Quinchía	59
4.2.7. Unidades geometalúrgicas (UGM)	61
4.2.8. Liberación de sulfuros	61
4.2.8.1. Municipio de Marmato	61

CONTENIDO

4.2.8.2.	Municipio de Riosucio	64
4.2.8.3.	Municipio de Quinchía	65
4.3.	CONSIDERACIONES EN GEOLOGÍA Y EN MINERALOGÍA	67
CAPÍTULO 5.	ASPECTOS METALÚRGICOS	68
5.1.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS : PROCESO DE BENEFICIO METALÚRGICO	70
5.1.1.	Beneficio de minerales en planta	70
5.1.2.	Proceso de conminución (trituración y molienda)	71
5.1.2.1.	Trituración primaria (gruesos)	72
5.1.2.2.	Trituración secundaria (finos)	73
5.1.2.3.	Molienda	74
5.1.3.	Clasificación granulométrica	76
5.1.4.	Clasificación hidráulica	77
5.1.5.	Concentración de minerales auríferos por gravimetría	79
5.1.6.	Concentración de minerales auríferos por flotación	81
5.1.7.	Cianuración	82
5.1.7.1.	Precipitación por el proceso de Merrill Crowe	84
5.1.8.	Fundición	85
CAPÍTULO 6.	ASPECTOS QUÍMICO - AMBIENTALES	86
6.1	CONTRIBUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA, CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS Y QUÍMICO AMBIENTALES	88
6.2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MÉTODOS Y APLICACIONES QUÍMICO - AMBIENTALES	89
6.2.1.	Contaminación por mercurio en minería	89
6.2.1.1	Ciclo del mercurio	89
6.2.2.	Uso del mercurio y su normatividad en Colombia	90
6.2.3.	Caracterización química y ambiental	90
6.2.3.	Análisis químicos aplicados para la caracterización y control de procesos metalúrgicos y ambientales	91
6.2.3.1.	Espectrofotometría de absorción atómica	92
6.2.3.2.	Espectrofotometría de ultravioleta visible	92
6.2.3.3.	Potenciometría del ion cianuro	93
6.2.4.	Tratamientos para la descomposición de cianuro: formas libre y complejo	93
6.2.4.1.	Cianuro y sus formas	93
6.2.4.2.	Tratamientos de descomposición: uso del peróxido de hidrógeno, sulfato ferroso y prueba de control ambiental	94
6.3.	CARACTERÍSTICAS QUÍMICO AMBIENTALES DE LA ZONA MINERA	97
6.3.1.	Relaves	97
6.3.2.	Fuentes hídricas	98
6.3.3.	Composición mineralógica de los sectores estudiados	99
6.3.4.	Metalurgia	101
6.3.5.	Caracterización de soluciones ricas y pobres del proceso metalurgico por espectrofotometría de absorción atómica	101
6.3.6.	Cianuro libre y total en muestras de proceso metalúrgico	102
6.3.7.	Prueba TCLP	102
6.4.	CONSIDERACIONES AMBIENTALES	103
CAPÍTULO 7.	RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA	104
7.1	PROCESO DE BENEFICIO DESARROLLADO ACTUALMENTE	106
7.1.1.	Proceso de beneficio actual en Riosucio	106
7.1.2.	Proceso de beneficio actual en Quinchía - sector Mina Rica	107
7.1.3.	Proceso de beneficio actual en Quinchía - sector Miraflores	108
7.2	PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO SEGÚN LA MINERALOGÍA	109
7.2.1.	Ensayos en laboratorio para mejoras en el proceso de beneficio actual - Riosucio	109
7.2.2.	Ensayos en laboratorio para mejoras en el proceso de beneficio actual Quinchía - sector Mina Rica	110

CONTENIDO

7.3.	PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO PARA QUINCHÍA - SECTOR MIRAFLORES	111
7.3.1.	DIAGRAMA DE FLUJO DE OPERACIONES, PROCESOS Y MASA PARA EL BENEFICIO SUGERIDO	112
7.4.	MONTAJE DE PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA	113
7.5.	DIAGRAMA DE FLUJO PARA LA PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA	114
7.6.	CONCLUSIONES METALÚRGICAS ACERCA DE LA RUTA METALÚRGICA PROPUESTA	116
CAPÍTULO 8. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO		117
8.1.	FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO	119
8.1.1.	Generalidades sobre los proyectos de inversión	119
8.1.1.1.	Definición	119
8.1.1.2.	Clasificación	119
8.1.1.3.	El ciclo de los proyectos	119
8.1.2.	Estudio y evaluación financiera de proyectos de inversión	120
8.1.2.1.	Propósito del estudio financiero	120
8.1.2.2.	Etapas del estudio financiero	121
8.1.2.3.	Propósito de la evaluación financiera	121
8.1.2.4.	Etapas de la evaluación financiera	121
8.2.	METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA	123
8.2.1.	Estudio financiero	123
8.2.1.1.	Identificación y valoración de la inversión inicial	123
8.2.1.2.	Identificación y valoración de costos de operación	124
8.2.1.3.	Identificación y valoración de ingresos de operación	129
8.2.2.	Evaluación financiera	129
8.2.2.1.	Construcción del flujo de caja del proyecto	130
8.2.2.2.	Aplicación de métodos para evaluar proyectos	131
8.3.	ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO – ZONA MINERA DE QUINCHÍA	132
8.3.1.	Resultados e interpretación de indicadores de evaluación financiera	134
8.4.	ESTUDIO FINANCIERO OPERACIÓN ACTUAL Vs OPERACIÓN FUTURA – ZONA MINERA DE QUINCHÍA	134
8.4.1.	Resultados de la operación actual	135
8.4.2.	Resumen de indicadores de operación actual vs. operación futura	136
8.4.3.	Análisis de resultados de indicadores de operación actual vs operación futura	136
8.5.	CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PLANTA DE BENEFICIO MODELO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA	137
8.6.	CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN FUTURA DE LA PLANTA DE BENEFICIO MODELO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA	138
GLOSARIO		
REFERENCIAS		

INTRODUCCIÓN

Mediante la Resolución n.º 4 0391 del 20 de abril de 2016, el Ministerio de Minas y Energía adoptó la “Política Minera Nacional”, donde se establece que “... *El objetivo fundamental es que la actividad minera en todas sus escalas, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva y responsable...*”. Esta Política destaca entre otros, los siguientes aspectos:

- Los problemas que enfrenta el país en torno a la minería de pequeña y mediana escala son numerosos y disímiles;
- Se requiere generar herramientas y estrategias de apoyo a los mineros para que con ayuda del Estado formalicen su actividad y mejoren sus condiciones de vida;
- Altos niveles de ilegalidad y/o informalidad en la actividad minera;
- La necesidad de articulación entre los diferentes estamentos del Estado para la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera.

Para abordar la situación descrita, la “Política Minera Nacional” establece para la pequeña minería, entre otras, las siguientes líneas estratégicas:

- Apoyo para la regularización de la actividad minera.
- Asistencia técnica.
- Mejores prácticas para el fomento de la pequeña minería.
- Diálogo y coordinación con gobiernos territoriales.
- Mecanismos de participación y diálogo para lograr condiciones de mutua confianza entre los actores involucrados en la cadena de valor de la minería.
- Apoyo para la mejora de las condiciones de vida.

Dentro de este contexto, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), perteneciente al Sistema Nacional de Competitividad, Ciencia, Tecnología e Innovación (SNCCTI), adscrito al Ministerio de Minas y Energía, tiene por objeto entre otras actividades, según artículo 3 del Decreto 4131 de 2011, realizar la investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos del subsuelo. Adicionalmente, estableció una serie de funciones enfocadas en el desarrollo de actividades entre las que se encuentra: “*generar e integrar conocimientos y levantar, compilar, validar, almacenar y suministrar, en forma automatizada y estandarizada, información sobre geología y recursos del subsuelo*”, “*integrar y analizar la información Geocientífica del subsuelo*”.

El Servicio Geológico Colombiano debe propender al cumplimiento de sus objetivos y al desarrollo de las actividades contempladas en la Ley 1286 de 2009, entre los cuales cabe destacar, la generación y uso del conocimiento, a través del desarrollo científico, tecnológico y la innovación, como actividades esenciales para darle valor agregado a nuestros recursos, crear nuevas empresas basadas en investigación, desarrollo tecnológico e innovación, alcanzar mayores y sostenidas tasas de crecimiento económico, acumulación y distribución de riqueza, con el objeto de mejorar los niveles de calidad de vida de los ciudadanos.

En éste mismo sentido, le corresponde a la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano, en el marco del Decreto 2703 de 2013 “*Por medio del cual se establece la estructura interna del SGC y se determinan las funciones de sus dependencias*”, realizar, entre otras, las siguientes funciones:

“(...)1. Proponer a la Dirección General, políticas, planes, programas y proyectos en materia de investigación y caracterización de materiales geológicos. 2. Dirigir y realizar la caracterización de materiales geológicos en los componentes químicos, físicos, geotécnicos, petrográficos y metalúrgicos. 3. Dirigir, diseñar, desarrollar e implementar nuevos ensayos de laboratorio y de campo que cumplan con los requerimientos de los planes, programas y proyectos del Servicio Geológico Colombiano (SGC). 6. Dirigir y realizar investigaciones asociadas con la caracterización, procesamiento y utilización de materiales geológicos. 7. Dirigir y realizar acciones encaminadas al aseguramiento de la calidad de los resultados de los ensayos generados en los laboratorios, de acuerdo con los lineamientos del Subsistema Nacional de la Calidad (...)”.

Dentro de las funciones de la Dirección de Laboratorios en el Grupo de Trabajo Caracterización y Procesamiento de Minerales y Carbones según Resolución 128 del 08 de marzo del 2017 se encuentran:

- Desarrollar proyectos para la caracterización, procesamiento y aprovechamiento de materiales geológicos (carbones y minerales) con énfasis en la promoción minero ambiental.
- Realizar asesoría técnica en la caracterización, procesamiento y aprovechamiento de carbones y minerales en la pequeña y mediana minería.
-

En el Plan Estratégico del Conocimiento Geológico del Territorio Colombiano 2014-2023 definido por el Servicio Geológico Colombiano, se establece para la Dirección de Laboratorios, en el capítulo 7, numeral 7.2, realizar investigaciones especiales tales como la de beneficio de minerales y transformación de carbones, por lo que el Laboratorio está enfocado a la generación de estudios y desarrollo de esquemas técnico - científicos, ambientalmente sostenibles, para el beneficio de minerales como parte de la cadena de valor de la minería. Los temas en los cuales se orienta son:

- Generación de información destinada a la clasificación mineralógica y metalúrgica de zonas auríferas del país.
- Aporte tecnológico a las comunidades mineras mediante diseños productivos, técnicas productivas, métodos determinativos y controles ambientales.
- Entrenamiento a técnicos en procesos de beneficio y análisis químicos.

El ministerio de Minas y Energía adoptó la "Política Minera Nacional", en la cual se establece como objetivo fundamental que la actividad minera en todas sus escalas, se desarrolle de forma ordenada, incluyente, competitiva y responsable"

Del mismo modo, para el desarrollo de sus funciones, la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano, ha partido de las bases del Plan Nacional de Desarrollo 2014 - 2018 "*Todos por un Nuevo País*", en el cual se continúa consolidando al sector minero energético como uno de los motores de desarrollo a través de su aporte al crecimiento económico, al empleo rural, a la inversión privada y a la generación de recursos para la inversión social del Estado, y lo concibe como una importante fuente de recursos para la inversión pública, aportando al desarrollo social en armonía con el medio ambiente y con otras actividades productivas, desde una visión territorial y ambientalmente responsable, lo que plantea que para la toma de decisiones que verdaderamente desarrollen el potencial de recursos del subsuelo de Colombia, es necesario contar con un conocimiento geológico, geoquímico y geofísico adecuado del subsuelo que permita identificar zonas con potencial mineral.

El Servicio Geológico Colombiano - Grupo de Trabajo Cali, cuenta con una infraestructura tecnológica que incluye una planta piloto de beneficio de minerales, donada por la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA), la cual ha permitido la realización de estudios asociados al aprovechamiento sostenible de minerales auríferos, permitiendo la verificación y proyección a escala industrial de las alternativas tecnológicas limpias para el mejor aprovechamiento de los recursos minerales.

La óptica mediante la cual trabaja la Dirección de Laboratorios del Servicio Geológico Colombiano para la sustitución del mercurio, se define experimentalmente en la evaluación de las condiciones de las operaciones y procesos metalúrgicos que correspondan, según las características mineralógicas de los depósitos.

En el desarrollo del presente proyecto se ha contado con la participación de entidades y grupos de investigación en el campo de las geociencias. Por un lado, ha participado la Universidad de Caldas, a partir de la suscripción del Convenio Especial de Colaboración 28 de 2017, por medio del cual se vincularon docentes del Departamento de Ciencias Geológicas, quienes realizaron análisis petrográfico y metalográfico de muestras colectadas en la zona minera. Por otro lado, se contó con la valiosa colaboración de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá, mediante la suscripción del Convenio Especial de Colaboración 23 de 2017, y de manera específica, con la participación del Departamento de Geociencias y el grupo de investigación Caracterización Tecnológica de Minerales, reconocido por Colciencias y dirigido por el profesor Juan Carlos Molano, quienes realizaron la evaluación mineralógica, metalúrgica y ambiental de depósitos minerales en el país. Por otra parte, mediante el desarrollo de las actividades técnico-científicas previstas en el citado convenio, se han logrado obtener resultados básicos para la comprensión de la metalogénesis de los depósitos minerales del área de estudio con actividades fundamentales, como el muestreo en campo, la preparación de muestras, análisis instrumentales e interpretación de resultados. Cabe destacar los resultados obtenidos mediante la implementación de técnicas tales como la espectrometría de infrarrojo, espectrometría Raman, microsonda electrónica y microtermometría para el conocimiento de las inclusiones fluidas, que nos permiten dilucidar la paragénesis del depósito. Con muestras tomadas en las minas y plantas de procesamiento se evaluaron los procesos de beneficio acostumbrados en la zona, a fin de medir su eficiencia y hacer recomendaciones para el desarrollo tecnológico, de tal forma que se vea reflejado en mayores rendimientos productivos y controles del impacto ambiental en las plantas de beneficio.

La presente guía se realiza con el fin de establecer las características mineralógicas de la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia), con miras a deducir y comprobar los procesos y operaciones geometalúrgicos para aprovechar de manera óptima el recurso aurífero sin usar mercurio, como un aporte fundamental a las buenas prácticas en minería que ayudarán a contar con un sector organizado, legítimo, incluyente y competitivo.

Panorámica de la Cordillera Occidental con un entable construido para la recepción del material de mina.
Fotografía tomada por: Harold Concha / Servicio Geológico Colombiano

1. MARCO DE REFERENCIA



1.1. DESCRIPCIÓN DE LA SITUACIÓN ACTUAL

De acuerdo con la información del censo minero realizado por el Ministerio de Minas y Energía, entre los años 2010 y 2011, en el departamento de Caldas se encontraba el 4.4% de las minas de Colombia (distribuidas principalmente en los municipios de Marmato, Manizales, Supía y Riosucio) y el 1.2% en el departamento de Risaralda, con una mayor concentración en el municipio de Quinchía.

En la región caldense, y especialmente en la zona de Marmato, las minas de oro han sido explotadas desde la época precolombina. En efecto, en el año 1537 llegaron a Marmato los primeros mineros europeos, quienes conformaron pequeñas explotaciones, y casi tres décadas después, con el establecimiento de la compañía inglesa Goldsmith Co., en el año 1825, se dio inicio a un proceso de explotación técnica en la zona. Durante más de un siglo esta zona aurífera fue explotada por distintas firmas extranjeras, hasta 1940, cuando pasó a ser administrada por la Nación. En 1954 se celebró un contrato de explotación de la denominada zona baja con la Minery Enterprise Corporation (Minenco), se reabrió el nivel 18 de la mina La Maruja y se instaló una planta de tratamiento de minerales. En 1980, el Ministerio de Minas y Energía otorgó a Ecominas, en administración delegada, la totalidad de los yacimientos de la zona alta de Marmato y cedió para la explotación y aprobó realizar contratos de operación en las zonas aledañas, con excepción de algunas pequeñas áreas donde con anterioridad se habían concedido permisos y concesiones a perpetuidad, como en la vereda Echandía (Suta, Bermúdez y Salazar, 2015).

En la zona de Quinchía, declarada área de reserva especial (ARE), por disposiciones del Decreto 535 del 21 de febrero de 2006, existen cinco núcleos de pequeños mineros que se agrupan comunitariamente en la Corporación de Mineros del Área de Reserva Especial; ellos son La Soledad, Mina Rica, La Peña, Sardinero y Cartagueño. Tres de estos núcleos (La Soledad, Mina Rica y La Peña) desarrollan actividades de minería bajo el amparo de un título minero excluido del ARE, otorgado a la sociedad exploradora La Esperanza.



Fotografía 1: Planta Los Perreras Riosucio (Caldas). Fuente: propia.

Respecto a la situación actual de la actividad minera en la zona estudiada, se presentan las siguientes consideraciones que se derivan del trabajo desarrollado en los sectores de las minas El Ajiaco y Chimanato (Caramanta); la mina La Maruja, en la vereda El Llano, las minas La Esperanza, San Antonio, y las minas La Pesebrera y Cien Pesos, en la vereda de Echandía (Marmato); las minas El Piñón y Rodas, en la vereda La Unión, y la mina La Millonaria, en la vereda Tumbarroto (Riosucio); y las minas Mina Rica, en la vereda de Juan Tapao (sector Quinchía norte) y las minas La Montaña, en la vereda Guerrero, la mina Guayacanes, en la vereda La Esmeralda, y la mina La Cruzada, en la vereda de Miraflores (sector Quinchía sur).

- En Riosucio, en los sectores de Gabia, San Bartolo y la Unión, se utilizan exclusivamente medios gravimétricos para la extracción de oro en las plantas de beneficio, debido a que la autoridad de los cabildos indígenas no permite el uso de otros medios químicos, tales como los que recurren al mercurio o al cianuro de sodio. De igual manera, con el fin de controlar en alguna medida el impacto de los sedimentos en las corrientes de agua, la cantidad de masa de material procesado en cada planta está restringida.
- La mayor parte de las plantas en Riosucio, están mecanizadas, y el acopio de material de mina se hace en tolvas.
- La reducción de tamaño se realiza por medio de trituradoras de mandíbulas que están conectadas directamente a pequeños molinos rotatorios, sin que medie entre ellos una trituración secundaria.
- La clasificación del tamaño del producto se realiza a través de una malla acoplada a la salida del molino (tromel), y el producto de la molienda es transportado por un circuito gravimétrico conformado por varias mesas (el número de mesas varía según la planta). En la planta de beneficio Las Perreras hay instaladas dos mesas.



Fotografía 2: Planta de la mina La Maruja. Fuente: propia.

- En la zona de Riosucio, la topografía es de alta pendiente, de tal modo que no se ven grandes depósitos de relaves. Las colas del proceso van a desarenadores de piso que vierten el sobrenadante a las corrientes de agua.
- En Marmato se detectó presencia de minería de oro a pequeña, mediana y grande escala. Las compañías que desarrollan gran minería se han instalado en el municipio de Marmato a lo largo de la historia; actualmente, la planta más grande instalada pertenece a una empresa privada que opera en la mina La Maruja, con una capacidad de procesamiento de mil toneladas por día.
- Mientras que en plantas de beneficio con gran capacidad de procesamiento se utilizan métodos de extracción de oro sofisticados (cianuración, concentración gravimétrica y concentración por flotación), en plantas de beneficio de mediana y pequeña capacidad es necesario incorporar avances tecnológicos que permitan aumentar el margen de recuperación de oro y posibiliten generar mayores beneficios económicos.
- En el área de reserva especial minera de Quinchía se ha introducido tecnología moderna para procesar el mineral. En Mina Rica, por ejemplo, hay una planta de beneficio con un diagrama de flujo de procesos actualizado con concentración gravimétrica (uso de JIG y mesas de concentración), concentración por flotación y cianuración. La mineralogía del depósito, caracterizada por la presencia de arcillas en gran proporción, impone dificultades tanto en la extracción minera como en la extracción metalúrgica del oro.



Fotografía 3: Planta de cianuración en Mina Rica (Quinchía). Fuente: propia.

1.2. DESCRIPCIÓN DE LA NECESIDAD



Fotografía 4: "Amalgama" de mercurio y oro. Fuente: propia.

El Estado colombiano, atendiendo a un claro compromiso con la preservación de la salud humana y la mitigación de los impactos ambientales generados por el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas que no cumplen plenamente con los estándares que rigen la industria, ha venido adoptando un marco regulatorio cuyo propósito es cumplir con los mandatos y normas nacionales e internacionales orientados a la reducción y eliminación del uso del mercurio en la actividad industrial minera.

En el contexto expuesto se expidió la Ley 1658 del 15 de julio de 2013, "por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones", norma que tiene, entre otros, el propósito de eliminar de forma total el mercurio del proceso de beneficio del oro, para lo cual ha establecido un plazo máximo de cinco años, es decir, hasta el año 2018. Esto se logrará mediante la implementación de tecnologías limpias para la recuperación del oro, que sean más eficientes que las actuales y que definitivamente no requieran la utilización de mercurio en el proceso de beneficio, en especial en procesos de recuperación de metales preciosos.

De forma complementaria, y bajo el liderazgo del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, en diciembre de 2014 se lanzó el Plan Único Nacional de Mercurio, que busca eliminar definitivamente, aunque de forma gradual, el uso de mercurio en el sector minero e industrial colombiano. Dicho plan fue adoptado y acordado entre los siguientes ministerios: de Ambiente y Desarrollo Sostenible; de Minas y Energía; de Salud y Protección Social; de Trabajo; de Comercio, Industria y Turismo; de Relaciones Exteriores; de Agricultura y Desarrollo Rural, y de Transporte, y por dos instituciones del sector de minas y energía: la Agencia Nacional Minera y la Unidad de Planeación Minero Energética.

El Plan Único Nacional de Mercurio se convierte en la ruta que debe seguir el Gobierno nacional para eliminar el uso del mercurio, e implica actividades de inspección, control, vigilancia y de gestión de información y del conocimiento en la industria minera, en todo el territorio nacional. Se trata de un esfuerzo conjunto entre los distintos niveles del gobierno, el sector minero, industrial, comercial y ambiental, el sector de la salud, del trabajo y la sociedad civil, en general, para cumplir con los compromisos nacionales e internacionales que han sido establecidos en este sentido. Este plan establece lineamientos claros para reducir y eliminar progresivamente el uso del mercurio en las actividades de minería en todo el territorio nacional con plazo a julio de 2018, y en todos los procesos industriales y productivos con plazo a julio de 2023.

El Ministerio de Minas y Energía y sus entidades adscritas y vinculadas, entre ellas el Servicio Geológico Colombiano (SGC), han trabajado de manera coordinada en el diseño y concertación del "Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio de la actividad minera", que se desarrolla con objetivos específicos que contribuyen claramente al cumplimiento de las metas establecidas en los cuatro grandes programas del Plan Único Nacional, a saber: programa de fortalecimiento institucional; programa de gestión ambiental, de salud pública, de seguridad y salud en el trabajo, sectorial-tecnológica y social; Programa de Educación y Comunicación y Programa de Gestión del Conocimiento (investigación aplicada).

De conformidad con el marco del eje "gestión del conocimiento e investigación aplicada" del "Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera", cabe resaltar los siguientes objetivos específicos: a) ampliar, masificar y promover el uso de tecnologías limpias en la pequeña minería; b) apoyar proyectos de investigación que generen nuevas técnicas para la recuperación de oro sin uso de mercurio, y c) docu-

mentar experiencias exitosas de transferencia de tecnología que permitan la eliminación del uso de mercurio de los procesos de beneficio de oro, pues estos se enfocan en la promoción de nuevas alternativas para la producción más limpia de oro. De igual forma, en el marco del eje “educación y comunicación” del “Plan estratégico sectorial para la eliminación del uso del mercurio en la actividad minera” se busca que exista una concertación con las comunidades para producir el cambio partiendo de procesos de comprensión profunda relacionadas con las temáticas técnicas, y para cumplir con ello se destaca el siguiente objetivo específico, expresado en el Plan Estratégico: generar guías técnicas para la comunidad minera de cada región, con el fin de implementar el uso de tecnologías eficientes en el proceso de beneficio de oro sin utilizar mercurio.

Dado lo anterior, los ejes del Plan Estratégico ya mencionados permiten formular y ejecutar proyectos que puedan aportar nueva información valiosa y necesaria para el entendimiento geometalúrgico y la optimización de los procesos de beneficio del oro, sin la utilización de mercurio; esto mediante la formulación e implementación de procesos verdes ecoeficientes orientados a la mitigación del impacto ambiental, y que conduzcan a la disminución de condiciones potencialmente riesgosas para la salud humana, en el desarrollo de actividades mineras, en especial aquellas asociadas con el beneficio del oro en las zonas mineras existentes en el territorio nacional.

Producto del diagnóstico levantado en campo en las unidades de beneficio aurífero de pequeña escala, que actualmente registra el Ministerio de Minas y Energía, se identificaron las principales falencias en materia de eliminación de uso de mercurio por los mineros, entre las cuales se encuentran las siguientes:

- Falta de conciencia sobre la problemática ambiental derivada del uso de mercurio, toda vez que realizan la actividad con limitada asistencia técnica y con poca planificación, lo que no permite mantener índices de productividad y de sos-

tenibilidad adecuados, y de paso causa, entre otras cosas, deterioro ambiental, impactos negativos sobre los recursos naturales; riesgo directo para los operarios de las unidades productivas, e indirectos para las comunidades y ecosistemas aledaños. Esta problemática pone en riesgo la salud de la población, pues todos los vertimientos cargados con sustancias contaminantes, como el mercurio, son vertidos a las corrientes hídricas que surten los acueductos regionales.

- Desconocimiento de alternativas de tecnologías más limpias para recuperar el metal sin usar mercurio.
- Desconocimiento científico, en particular sobre las condiciones geoquímicas de los depósitos auríferos; las características geológicas, mineralógicas y metalogenéticas propias de cada uno de las zonas y los distritos auríferos del país, incluyendo su asociación mineral, su paragénesis y la reactividad de los diferentes minerales asociados al proceso de beneficio. Por ello, la falta de información impide generar

En el marco del Plan Estratégico se busca una concertación con las comunidades para producir un cambio, partiendo de procesos de comprensión profunda en temáticas geocientíficas e ingenieriles. Es por ello que se propuso publicar guías técnicas dirigidas a la comunidad minera de cada región, con el fin de implementar el uso de tecnologías eficientes en el proceso de beneficio de oro sin utilizar mercurio, que partan del entendimiento geometalúrgico.



Fotografía 5: Serie de “cocos” para amalgamación. Fuente: propia.



Fotografía 6: Tanque de relaves en planta de beneficio. Fuente: propia.

una metodología de beneficio más eficiente y adecuada. La metodología actualmente practicada genera menores ingresos a los mineros y causa un mayor impacto ambiental.

En este contexto se suscribió entre el Servicio Geológico Colombiano y el Ministerio de Minas y Energía (MME) el Convenio Interadministrativo GGC n.º 311 de 2017, que tiene por objeto “aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para la caracterización mineralógica y metalúrgica en distritos mineros de Colombia, con el fin de realizar guías para procesamiento de minerales y su control ambiental que permitan mejorar la recuperación del oro sin el uso de mercurio”.

Dadas las razones expuestas, el Ministerio de Minas y Energía tiene el propósito de fomentar alternativas tecnológicas de producción más limpia enfocadas en los procesos de beneficio de oro que conduzcan a la eliminación del uso del mercurio en zonas mineras de producción activa. Por ello se requiere del conocimiento especializado de entidades y grupos de investigación reconocidos, por lo que el Servicio Geológico Colombiano y algunas universidades son las instituciones idóneas para dar cumplimiento a los objetivos del presente proyecto. Se propone, por tanto, la realización del presente proyecto para generar conocimiento científico y tecnológico aplicado al mejoramiento productivo del beneficio de oro, con tecnologías de producción más limpia que excluyan el uso de mercurio en la pequeña minería de Colombia.

Los resultados de este proyecto, quedarán consignados en un informe técnico, y harán parte de la guía metodológica correspondiente. Esta valiosa información será compartida y socializada directamente entre la comunidad minera para motivar su aplicación e implementación, lo que permitirá, además, que el conocimiento adquirido aporte al entendimiento particular de la metalogénesis, la optimización de los procesos de beneficio del oro y la mitigación del posible impacto ambiental asociado a las actividades mineras.

El Ministerio de Minas y Energía y el Servicio Geológico Colombiano suscribieron el Convenio Interadministrativo GGC n.º 311 de 2017, que tiene por objeto “aunar esfuerzos técnicos, administrativos y financieros para la caracterización mineralógica y metalúrgica en distritos mineros de Colombia, con el fin de realizar guías para procesamiento de minerales y su control ambiental, que permitan optimizar la recuperación del oro sin el uso de mercurio”.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Caracterizar química, mineralógica y metalúrgicamente la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia) con el fin de generar conocimiento geometalúrgico que permita la recuperación de oro sin el uso de mercurio, para garantizar el mejoramiento productivo del beneficio de oro en la pequeña minería de Colombia.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Realizar el reconocimiento geológico de la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia) haciendo énfasis en zonas y estructuras mineralizadas y de extracción activa. Este reconocimiento incluirá la obtención de información de dichas estructuras, medición de datos estructurales y toma de muestras de roca.
2. Realizar la caracterización química y mineralógica de la mena para identificar su composición, asociaciones minerales, texturas, tamaños de grano, metalogénesis y la ocurrencia de oro en la veta para establecer un adecuado beneficio del mineral aurífero.
3. Desarrollar pruebas metalúrgicas que permitan definir la efectividad de los procesos actuales de beneficio y, junto con toda la información de caracterización del depósito, proponer una ruta metalúrgica adecuada para el procesamiento y recuperación del oro.
4. Realizar ensayos ambientales que permitan identificar los riesgos asociados a la toxicidad de relaves y plantear metodologías que permitan el control y prevención de impactos negativos sobre el medio ambiente.
5. Elaborar una guía metodológica dirigida al mejoramiento productivo, económico y ambiental del beneficio del oro sin el uso de mercurio para la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia).
6. Definir la viabilidad financiera y económica de la implementación de la propuesta de uso de tecnologías limpias para la sustitución del mercurio en el proceso de beneficio de oro en la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia).

1.4. ALCANCE

La guía metodológica propone procesos de producción más limpia, sin uso de mercurio, por medio de alternativas tecnológicas que permiten un mejor aprovechamiento del mineral, una mayor eficiencia y productividad en las operaciones de beneficio. Esto se fundamenta en la profundización del conocimiento geológico, metalogenético, mineralógico, metalúrgico y físico-químico de los depósitos minerales, que son aprovechados por las unidades de beneficio de la zona minera de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia), y en la aplicación de este conocimiento en los procesos de beneficio del oro y la disminución del impacto sobre el medio ambiente. No obstante, se tendrán en cuenta los procesos metalúrgicos y las operaciones unitarias seguidos actualmente por los mineros de la región, para finalmente proponer una ruta metalúrgica que permita mejorar los procesos productivos y eliminar el uso del mercurio.

Durante los años 2008 y 2009 el Servicio Geológico Colombiano realizó estudios geometalúrgicos en la zona norte de Quinchía, donde se localiza Mina Rica; a comienzos del año 2017 se realizó un estudio particular en Riosucio. En esta ocasión para las pruebas hidrometalúrgicas y la propuesta de proceso de beneficio se hizo énfasis en el sector sur, donde se localiza la mina Guayacanes.

Tanto Mina Rica, como Guayacanes hacen parte de la unidad geometalúrgica que mayor inconveniente para el beneficio metalúrgico presenta dadas las características geológicas y mineralógicas descritas en este estudio.

La guía comprenderá ocho capítulos: 1) Marco de referencia, 2) Metodología de trabajo, 3) Características de la zona, 4) Aspectos geológicos, 5) Aspectos metalúrgicos, 6) Aspectos ambientales, 7) Ruta metalúrgica para la zona minera propuesta, y 8) Estudio económico y financiero.

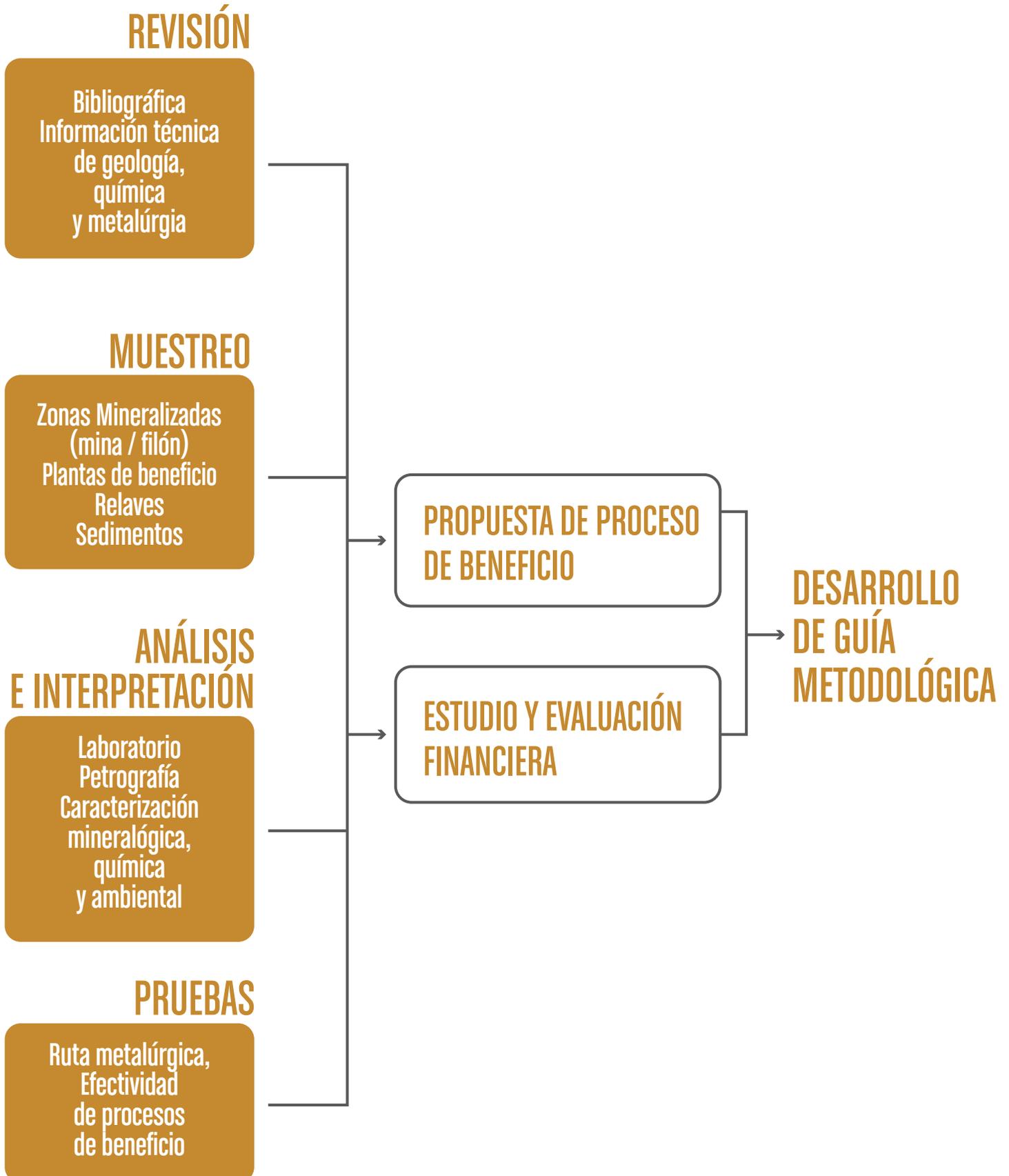
Elementos religiosos utilizados para la protección en la mina.
Fotografía tomada por: Harold Concha / Servicio Geológico Colombiano



2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

Figura 2.1: Diagrama metodología de trabajo
Fuente: Propia



2.1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El primer paso de la metodología de trabajo es seleccionar la zona minera que se va a estudiar; luego se realiza la revisión de la documentación minera existente, de acuerdo con los diferentes distritos mineros definidos en Colombia; posteriormente se revisa la información geológico-minera de la zona estudiada, con el fin de adquirir bases de conocimiento para realizar el trabajo de campo y el respectivo muestreo.

2.2. MUESTREO

Una vez se adelantaron las diligencias institucionales correspondientes se realizaron varias jornadas de campo para adelantar el trabajo de reconocimientos geológico de la zona, revisión de los procesos de beneficio de oro y la toma de muestras.

En terreno se realizó la toma de cuatro tipos de muestras:

- Muestras de zonas mineralizadas: muestras de roca en vetas y en zonas de respaldos
- Muestras en plantas de beneficios: material de cabeza y material de salidas de las diferentes operaciones unitarias practicadas en el beneficio
- Muestras de relaves: rechazos o colas provenientes de los diferentes procesos
- Muestras en sedimentos y quebradas, para identificar los posibles elementos que están pasando al medio ambiente luego de finalizar el proceso de beneficio

2.3. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

Con base en las observaciones hechas en campo se realizó una definición de los análisis, pruebas y ensayos que se van a practicar. Con este fin se procedió a preparar las muestras e iniciar los análisis de petrografía, caracterización mineralógica y composición química. Este proceso condujo a realizar un diagnóstico mineralógico y metalúrgico, que son el pilar para desarrollar la propuesta de ruta metalúrgica eficiente y ambientalmente sostenible que se aplicará en la zona.

Los procedimientos analíticos aplicados fueron los siguientes:

PETROGRAFÍA:

- Análisis de la roca: se seleccionó la muestra y se extrajo una fracción, a la que se le realizó el pulido, de 60 a 40 micrones (secciones delgadas pulidas) para realizar análisis con microscopio (petrográfico y de metalografía).
- Análisis mineralógico general: se seleccionó la muestra, se pulverizó a un d80 de 1.4 mm para realizar el pulido del material particulado.
- Análisis mineralógico específico para oro: la muestra del análisis mineralógico general se pulverizó a un d80 de 300 micrones y se concentró para sustraer el oro y hacerlo visible al análisis petrográfico. El material se concentró y se montó sobre vidrio para realizar desbaste a 40-50 micrones. Posteriormente este concentrado se pulió y se brilló para someterlo a un análisis petrográfico y metalúrgico.

ANÁLISIS QUÍMICOS ELEMENTALES

- Ensayo al fuego: análisis de oro y plata por fundición de 30 gramos de muestra
- Análisis de hierro, cobre, mercurio, plomo, y zinc por espectrofotometría de absorción atómica
- Análisis de azufre por el método gravimétrico
- Análisis cualitativo de carbonato de calcio
- Análisis de elementos por fluorescencia de rayos X

ANÁLISIS AMBIENTALES

- Análisis de arsénico, cadmio, cromo, plata, mercurio y plomo por el método de diagnóstico de toxicidad de depósitos
- Análisis de cianuro total por descomposición química de complejos y lectura con electrodo de ion selectivo para ion cianuro

2.4. PRUEBAS

La interpretación de estos análisis dio lugar a la realización de las pruebas metalúrgicas correspondientes, las comprobaciones y confirmaciones para crear la propuesta de ruta metalúrgica óptima que se aplicará.

PROPUESTA DE RUTA METALÚRGICA

Se definió una ruta metalúrgica adecuada para el proceso de beneficio de oro que optimiza todos los parámetros tecnológicos, que resultará beneficiosa en términos económicos para los mineros y que implicará la eliminación del mercurio del proceso productivo.

Sistema de "poleas y canastas" para facilitar el transporte del material de mina hasta la planta de beneficio.
Fotografía tomada por: Benedicto Galindo / Servicio Geológico Colombiano

3. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

El conocimiento de las generalidades de la zona estudiada nos permite tener una referencia sobre la localización geográfica y un acercamiento a los aspectos económicos y sociales que se desarrollan en los municipios estudiados.

3.1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

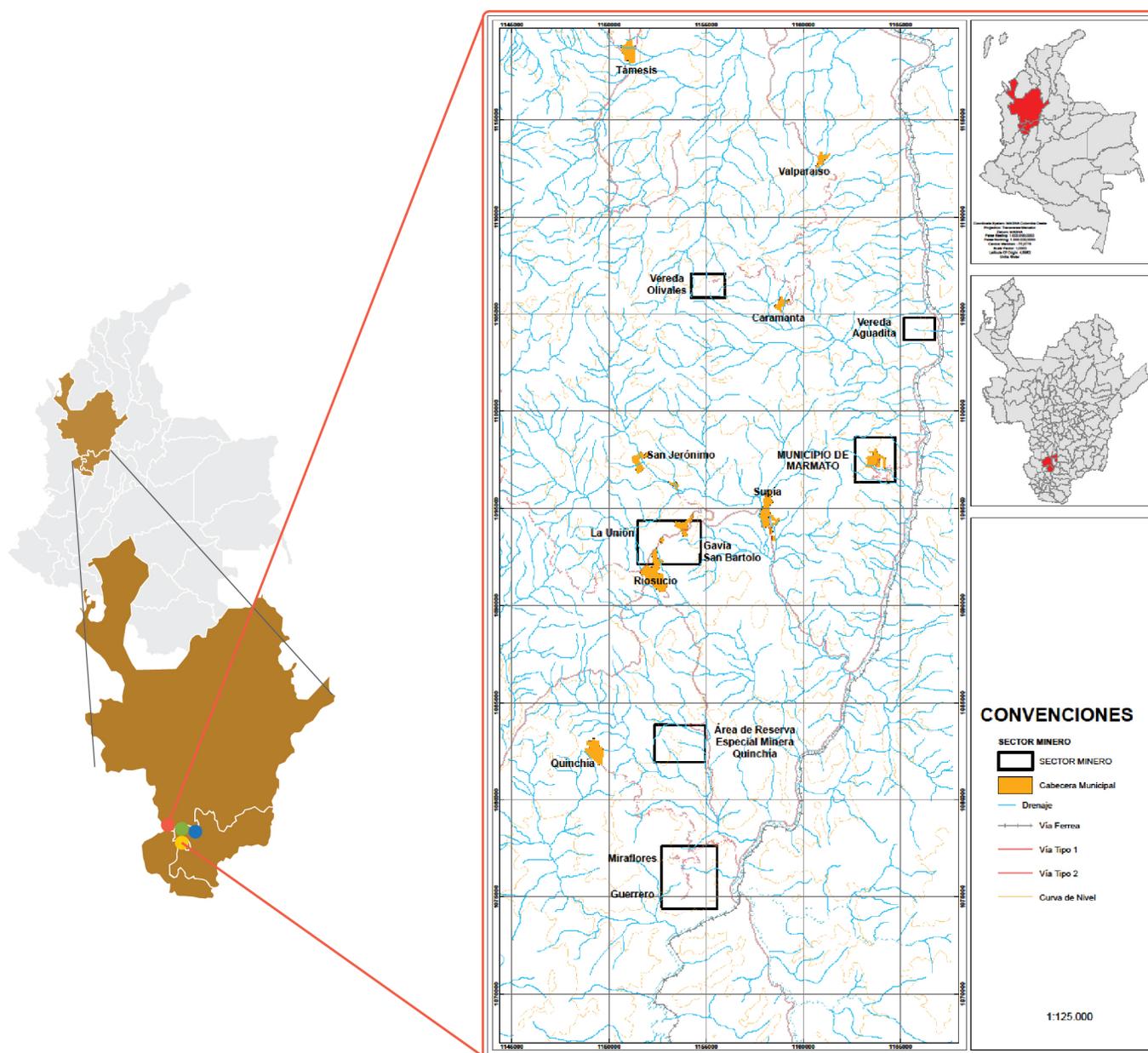
Los municipios de Caramanta (Antioquia), Marmato y Riosucio (Caldas) y Quinchía (Risaralda), se encuentran localizados sobre el Valle Medio del río Cauca, en el flanco occidental de la Cordillera Occidental.

El área de estudio limita al norte con los municipios de Jardín, Támesis y Valparaiso, al sur con Guática, Anserma y Neira, al oriente con Aguadas, Pácora, Supía, La Merced y Filadelfia, y al occidente con el municipio de Mistrató.

Estos municipios pertenecen a la cuenca occidental media del río Cauca, y la actividad minera se desarrolla en la cuenca alta de los ríos Conde, Arquía, Sucio, Supía, y Quinchía.

Figura 3.1: Ubicación Geográfica de los municipios de Marmato, Riosucio (Caldas), Quinchía (Risaralda) y Caramanta (Antioquia)

Fuente: Propia



3.1.1. MUNICIPIO DE MARMATO (CALDAS)

LOCALIZACIÓN	Latitud norte: 05° 28' 31" Longitud oeste: 75° 35' 57"
EXTENSIÓN TOTAL	44 km²
ALTITUD ZONA URBANA	1300 msnm
TEMPERATURA PROMEDIO	23 °C
LÍMITES	<p>Oriente: Con los municipios de Pácora y La Merced (Caldas).</p> <p>Norte: Con Caramanta (Antioquia).</p> <p>Occidente: Con el municipio de Supía (Caldas).</p> <p>Sur: Con el municipio de Supía (Caldas).</p>

Economía. La explotación de oro está ligada a la historia misma del municipio. Los españoles que llegaron hasta sus tierras en la época de la conquista, lo hicieron atraídos por el metal que había en las entrañas de la montaña; posteriormente llegaron mineros de distintas partes del país, pero también llegaron las compañías extranjeras, que explotaron las minas durante muchos años. Cuando se llega a Marmato, desde la carretera se empiezan a observar no solo las entradas a los túneles abiertos en la montaña, sino también las inmensas instalaciones de los sitios donde funcionan los molinos que procesan la roca para extraerle el oro. La economía de Marmato gira principalmente alrededor de la extracción y la comercialización del oro.

Ecología. El relieve es quebrado y escarpado. La altura máxima de Marmato se encuentra sobre los 2200 m. s. n. m., en el Alto Cruz de Helecho, y la mínima, de 670 m. s. n. m., en la margen izquierda del río Cauca.

Algunas zonas de elevadas pendientes, cercanas al río Cauca, que corresponden a las partes más bajas del municipio, contienen elementos de la flora característicos de los bosques secos tropicales, incluyendo poblaciones de *Attalea amygdalina* (palma real), una especie en peligro de extinción y endémica de esta región del río Cauca.

Hidrografía. La zona de Marmato tiene una gran riqueza hídrica. Se destacan varias subcuencas que alimentan los acueductos veredales, como las microcuencas Chaburquí, Los Indios y Cascabel, y la subcuenca del río Arquí, entre otras.

Demografía. Según el DANE, en 2015 el municipio contaba con 9096 habitantes, 1274 de los cuales estaban ubicados en la cabecera municipal, y 7822 en las demás zonas del municipio.



3.1.2. MUNICIPIO DE RIOSUCIO (CALDAS)

LOCALIZACIÓN	Latitud norte: 05° 25' 15" Longitud oeste: 75° 42' 10"
EXTENSIÓN TOTAL	429 km²
ALTITUD ZONA URBANA	1783 msnm
TEMPERATURA PROMEDIO	21 °C
LÍMITES	<p>Oriente: Con los municipios de Filadelfia (Caldas) y Supía (Caldas).</p> <p>Norte: Con los municipios de Jardín (Antioquia), y Támesis (Antioquia).</p> <p>Occidente: Con el municipio de Mistrató (Risaralda).</p> <p>Sur: Con los municipios de Guática (Risaralda), y Quinchía (Risaralda).</p>

Economía. Históricamente, la base fundamental de la economía riosuceña fue la explotación del oro, que se realizó en sectores como Quebralomo, La Montaña, Bonafont y San Lorenzo. En la actualidad el preciado metal aún se explota, aunque únicamente a escala artesanal en el lecho de los ríos.

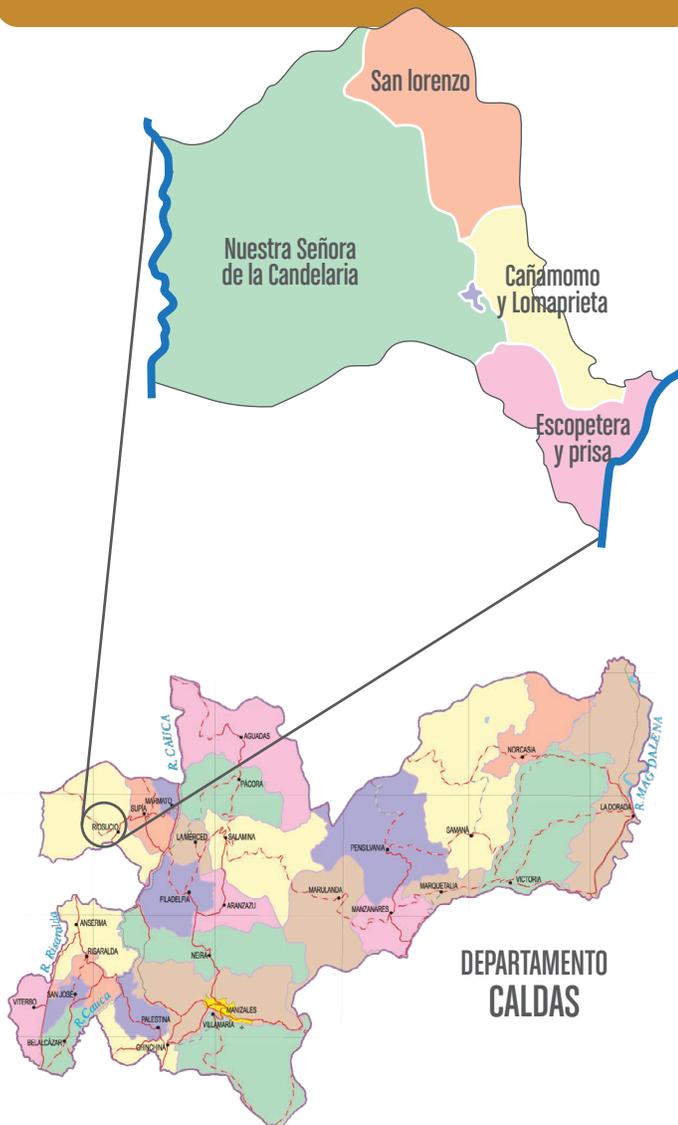
El municipio de Riosucio basa hoy su economía en la agricultura: el cultivo del café es su principal renglón, seguido por el cultivo de la caña panelera, con la cual se abastecen los mercados locales y regionales. Se cultivan también el frijol, el plátano, la yuca, cítricos y productos de pancoger como frutas, hortalizas y legumbres, que satisfacen la demanda local y la de algunos municipios cercanos.

Hay una significativa industria ganadera en las áreas de pastos naturales, con cerca de 23000 cabezas y producción de leche. Con menor volumen participa en la economía la cría de aves que, no obstante, abastece el mercado local. La piscicultura se viene fomentando en Riosucio desde la década de 1970; hay en la actualidad 140 explotaciones.

Ecología. Las comunidades naturales de flora que aún persisten se encuentran concentradas básicamente en la zona fría del municipio, donde predominan especies de árboles de porte medio y alto, como los llamados bogotano, sietecuecos, punta de lanza, palma chonta, cerezo, gallinazo, mano de tigre, roble y arrayán. También se encuentran plantaciones de pino patula, ciprés y eucalipto. En la zona templada hay, entre otros, cedro negro, guamo y nogal. En la zona cálida hay especies como el cedro colorado, y existen en cierta proporción bosques de guadua.

Hidrografía. Existen dos hoyas hidrográficas de la cuenca del río Cauca que integran el territorio de Riosucio: la del río Supía, alimentada por el Imurrá o Sucio; el Aurria o Estancias; Aguas Claras y Arcón, y la del río Auquía, denominado también Arroyondo y Risaralda, con sus afluentes el río Guática o el Oro y las quebradas Malpaso y Juntas.

Demografía. Según el DANE, en 2015 la población del municipio de Riosucio era de 61535 habitantes, 18990 de ellos ubicados en la cabecera municipal y los restantes 42545 en las demás zonas del municipio.



3.1.3. MUNICIPIO DE QUINCHÍA (RISARALDA)

LOCALIZACIÓN

Latitud norte: 05° 20' 22"
Longitud oeste: 75° 43' 46"

EXTENSIÓN TOTAL

14°1 km²

ALTITUD ZONA URBANA

2400 msnm

TEMPERATURA PROMEDIO

18 °C

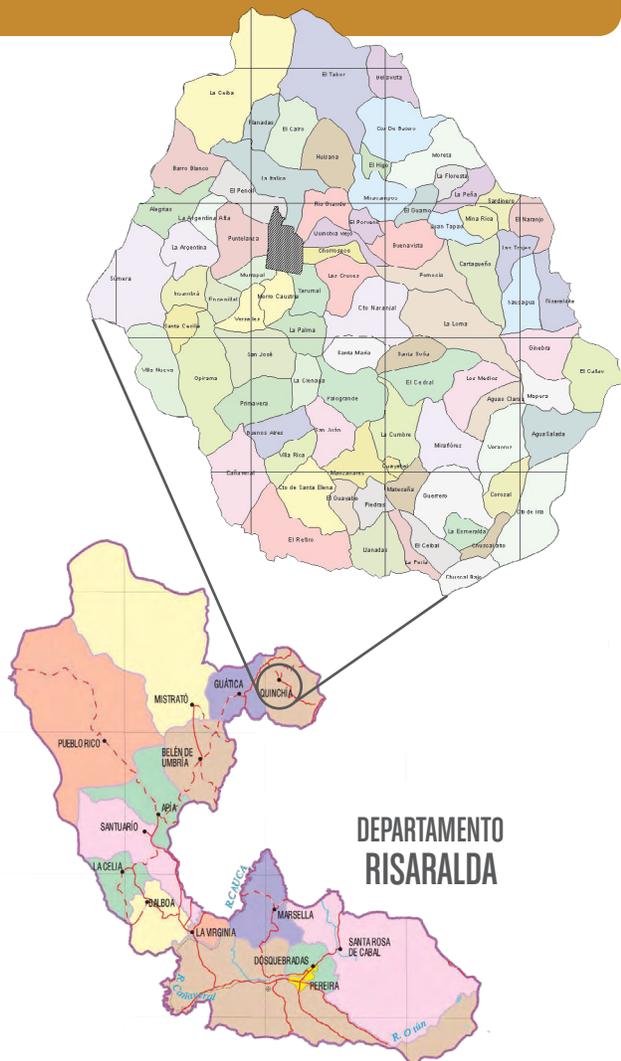
LÍMITES

Oriente: Con los municipios de Filadelfia y Neira (Caldas).

Norte: Con el municipio de Riosucio (Caldas).

Occidente: Con el municipio de Guática (Risaralda).

Sur: Con Anserma (Caldas).



Economía. Los rubros económicos que mayor valor agregado le generan al municipio de Quinchía son las actividades de servicios a las empresas, el cultivo de café con y la construcción de edificaciones, con 18700 millones de pesos corrientes.

El municipio, en su plan de desarrollo, cuenta con un programa para fortalecer el sector agropecuario y minero (orfebrería) mediante el impulso de tecnologías, mercadeo y comercialización de los productos agropecuarios y la formalización de las organizaciones de mineros. La minería del municipio explota el oro, que se extrae de las minas de Alacranes y Miraflores. La orfebrería se caracteriza por la elaboración de joyería de filigrana.

Ecología. Quinchía se localiza sobre la vertiente oriental de la cordillera Occidental, aproximadamente en la posición media de la zona de convergencia intertropical, hecho que determina las características más relevantes del clima regional, tales como lluvias abundantes con régimen temporal de distribución bimodal (dos máximas al año), alto contenido de humedad en el aire y régimen de temperaturas con bajas oscilaciones durante el año.

La variada topografía del municipio de Quinchía ha propiciado el desarrollo y la conformación de diferentes tipos de ecosistemas condicionados por la altura y la precipitación, que han posibilitado el establecimiento de sistemas productivos consonantes con su aptitud, pero notoriamente asociados con malas prácticas de uso y aprovechamiento de los recursos naturales. En este sentido, la reconversión de los sistemas productivos hacia la producción más limpia, el ordenamiento espacial de los sistemas productivos y la consolidación de los corredores ambientales y las áreas de reserva pueden garantizar el mejoramiento de las condiciones medioambientales y del uso racional de la base natural en el camino hacia la sostenibilidad.

Hidrografía. Existen tres quebradas que atraviesan el casco urbano de este a oeste; estas son El Morro, El Matadero y La Unión. El río Quinchía es la corriente de agua más importante que drena el área que circunda la cabecera municipal, y corre a una distancia de 1.5 km al noroccidente de la misma.

Los principales ríos y quebradas del municipio de Quinchía son los ríos Cauca, Quinchía, Opiramá y Tarcas, y las quebradas Batero, Tabasco, Los Chorros, Guargará, Maipurri, Piedras, Grande y La Cascada. La hidrografía del municipio está formada por numerosos riachuelos y quebradas que entregan sus aguas a la vertiente hidrográfica de los ríos Opiramá y Cauca.

Demografía. Según el DANE, en 2015 el municipio contaba con 33816 habitantes, de los cuales 25584 estaban ubicados en el área rural.

3.1.4. MUNICIPIO DE CARAMANTA (ANTIOQUIA)

LOCALIZACIÓN

Latitud norte: 05° 32' 48"
Longitud oeste: 75° 38' 39"

EXTENSIÓN TOTAL

82 km²

ALTITUD ZONA URBANA

2.050 msnm

TEMPERATURA PROMEDIO

17 °C

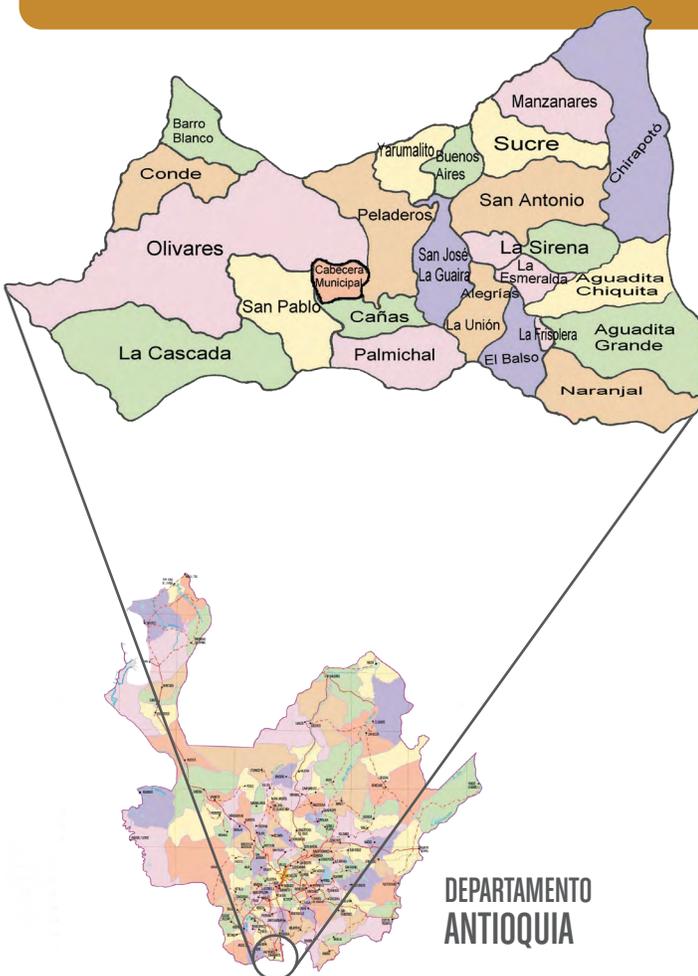
LÍMITES

Oriente: Con el departamento de Caldas.

Norte: Con el municipio de Valparaíso (Antioquia).

Occidente: Con el departamento de Caldas y con el municipio de Támesis (Antioquia).

Sur: Con el departamento de Caldas.



Economía. El principal rubro económico del municipio es la industria panelera. Pero también se destacan otras actividades económicas, como la agricultura, la ganadería y el comercio. En actividades agrícolas sobresale la producción de café, plátano, papa, maíz, frijoles, yuca, arracacha y cabuya.

Ecología. En el municipio existen setecientas hectáreas de bosque. Seiscientos treinta hectáreas son de bosque intervenido, y setenta de bosque plantado. Las especies de flora más importantes son el comino crespo, el cedro, los robles y los chaquiros, entre otras; y entre las especies faunísticas se encuentran el turpial, el armadillo, la guagua y la iguana.

La mayoría de las zonas boscosas protegen las fuentes de agua que surten los acueductos veredales y al municipio. Todas han sido intervenidas por los campesinos que viven y desarrollan actividades agrícolas, y por agentes externos de la zona urbana. Ambos agentes ven el bosque como un recurso para extraer material combustible, para practicar la cacería deportiva y de subsistencia. Muchos reconocen la importancia de su existencia en el ciclo hidrobiológico, y lo conciben también como un espacio relacionado con los mitos y leyendas. Por lo general, desconocen su importancia para la etnomedicina, la educación, la cultura, la recreación y el paisaje.

Las estrategias de conservación de las zonas boscosas se han basado en la vigilancia forestal y en programas de reforestación y aislamiento en todas las microcuencas de las que captan aguas para los acueductos; estas actividades son coordinadas por la Umata, y en su ejecución por lo general participan las juntas de acción comunal y los grupos ecológicos de los establecimientos educativos.

Hidrografía. Caramanta pertenece al cañón del río Cauca, que se caracteriza una topografía muy abrupta y valles en forma de V, cuyos afluentes principales son las quebradas Vequedo, Chirapotó y el río Arquía, y de modo secundario, las quebradas La Caubilla, La Tiburcia y Angostura; las cañadas San Pedro, La Diana, La Gironda, Piñuela y San Roque, y el río Conde. El área urbana es atravesada por las quebradas Rosario y San Ignacio, que, después de unirse, desembocan en la quebrada El Molino (afluente del río Arquía), y por una pequeña cañada situada al norte del cementerio, que nace en la carrera Antonia Santos.

Demografía. Según el DANE, en 2015 la población del municipio de Caramanta ascendía a 5362 habitantes, 2967 de ellos ubicados en la cabecera municipal, y 2395, en el sector rural.

3.2. LOCALIZACION DE MINAS Y PLANTA DE BENEFICIO - MARMATO

Las minas visitadas se localizan en cinco municipios distribuidos en Antioquia, Caldas y Risaralda. Descritas de norte a sur son: en el municipio de Caramanta, las minas de El Ajiaco, en la vereda Carretonal, y la mina Chinamato, en la vereda Naranjal.

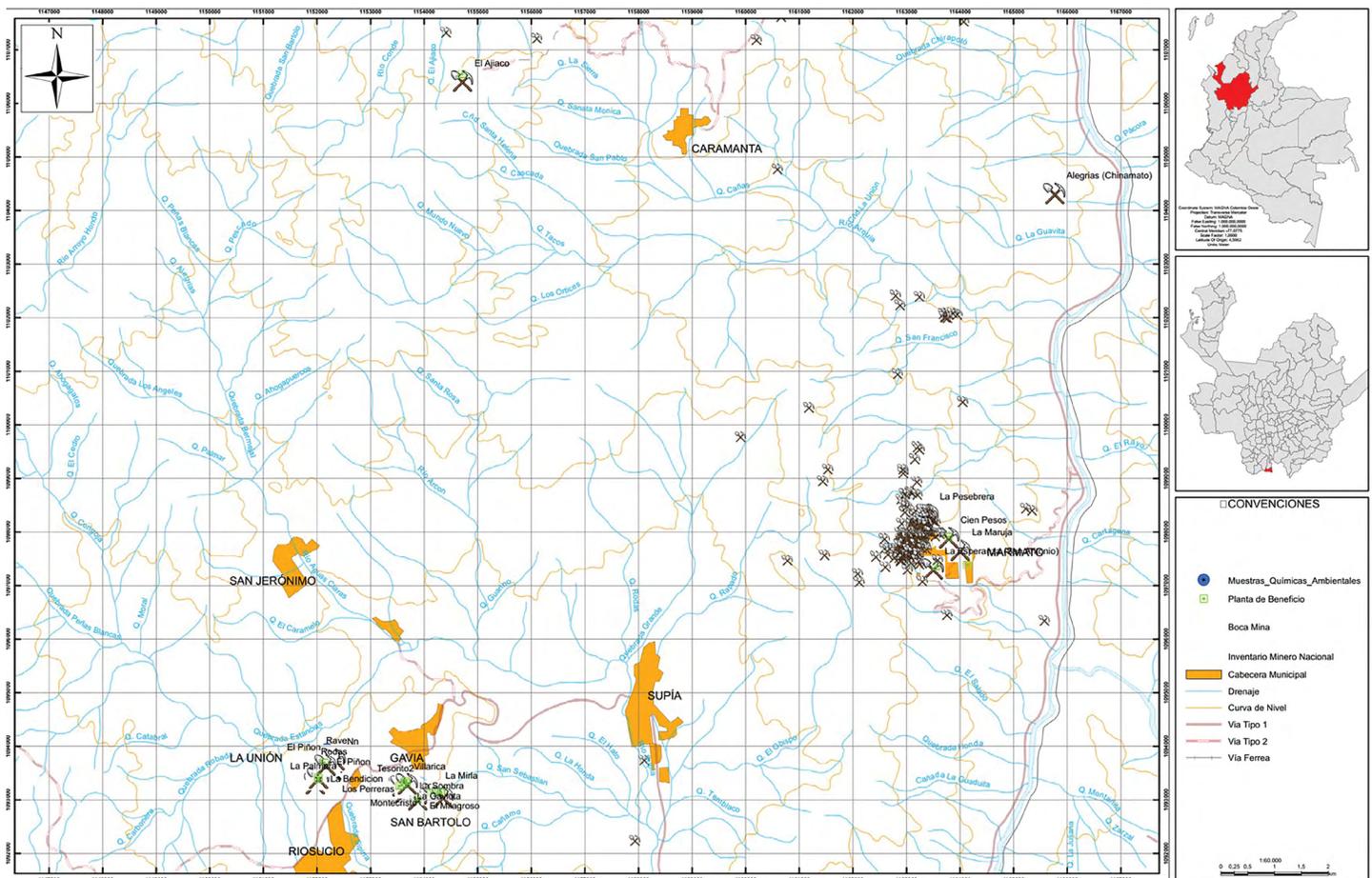
En el Municipio de Marmato, la mina La Maruja, en la vereda El Llano; las minas La Esperanza y San Antonio, en Marmato, y las minas La Pesebrera y Cien Pesos, en la vereda Echandía.

En el Municipio de Riosucio, las minas El Piñón, Rodas, San Antonio y La Bendición, en la vereda La Unión; las minas Gaviota, El Milagro, La Mirla y La millonaria, en el sector de San Bartolo, y las minas Tesorito, Montecristo y La Sombra, en el sector de Gavia.

En Quinchía, la mina Rica, en la vereda de Juan Tapao; la mina La Cruzada, en la vereda de Miraflores; la mina Guayacanes, en la vereda La Esmeralda, y La Montaña, en la vereda Guerrero.

Figura 3.2: Localización de minas y plantas de beneficio - Marmato.

Fuente: Propia



3.3. VÍAS DE ACCESO

La vía de acceso principal es la carretera Panamericana, en el tramo Pereira-Medellín; como vía alterna está la vía troncal de Occidente, que une los municipios de Anserma, Guática, Riosucio y Supía.

Para acceder al municipio de Quinchía se toma la carretera Panamericana y, en el cruce del corregimiento de Irra, de toma

Vista en microscopio ocurrencia de oro.
oro libre en cuarzo (Qz)

oro (Au)

cuarzo (Qz)

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

La composición mineralógica de los depósitos determina el comportamiento de las menas en los procesos de beneficio. Por este motivo es de gran importancia conocer desde su origen los procesos geológicos involucrados en la formación de éstos, así como de las condiciones finales del depósito mineral.

Teniendo en cuenta el origen y los procesos mineralizantes se puede establecer el tipo de depósito, particularmente aquellos de origen hidrotermal, característico de la zona de estudio. El capítulo pretende describir características mineralógicas, obtenidas a partir de análisis petrográficos, de metalografía, análisis por microsonda electrónica (EPMA), espectroscopía infraroja, espectrometría Raman y microtermometría de inclusiones fluidas que brindan información importante acerca de los procesos que condujeron a la formación de los minerales encontrados y que a su vez faciliten la selección apropiada de procesos geometalúrgicos.

4. ASPECTOS GEOLÓGICOS

4.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS: GEOLOGÍA Y YACIMIENTOS MINERALES

La geología es la ciencia que estudia el origen, la estructura y la composición del planeta Tierra, así como la evolución y los procesos que la han modificado desde su origen hasta el tiempo actual. El interior de la Tierra se ha diferenciado en tres capas concéntricas principales, según características establecidas especialmente por métodos geofísicos. Ellas son:

Corteza. Es la capa más externa de la Tierra, y en ella se encuentran concentrados los yacimientos minerales. Tiene una profundidad que oscila entre los 20 y 70 km bajo los continentes (corteza continental), y de 10 km bajo los océanos (corteza oceánica). La corteza oceánica es más densa que la corteza continental, y está compuesta principalmente por rocas básicas y ultrabásicas. La corteza en general está formada esencialmente por rocas y minerales silicatados y elementos litófilos (con afinidad por el oxígeno).

Manto. Es la capa intermedia. Está comprendida entre los 70 y 2900 km de profundidad. En esta capa, que generalmente se subdivide en corteza inferior y corteza superior, por la dinámica de las corrientes de convección, se origina el movimiento de las placas tectónicas que se da en los límites del manto superior (astenosfera) y la litósfera.

Núcleo. Es la parte interna de la Tierra. Tiene una profundidad de 2900 a 6000 km. En la parte interna se cree que está formado por minerales metálicos siderófilos, como el níquel y el hierro.

La corteza se compone de placas o fragmentos móviles individuales, más o menos rígidos, que se desplazan e interactúan entre ellos, y que se conocen como placas tectónicas.

En la dinámica terrestre se crea y se destruye corteza continuamente. La creación o formación de corteza se produce en los límites divergentes de las placas tectónicas (dorsales oceánicas y rifts continentales). En los límites convergentes de las placas tectónicas, donde estas se mueven hacia un punto común, a veces una placa se hunde (subduce) debajo de otra; estas zonas, que se conocen como zonas de subducción, son responsables de la formación de grandes cadenas montañosas, como los Andes, de la generación de eventos sísmicos y del emplazamiento y acumulación de yacimientos minerales (pórfidos y yacimientos epitermales de metales preciosos, entre otros). El origen de los depósitos minerales metálicos está estrechamente relacionado con ambientes asociados a la interacción de placas tectónicas.

4.1.1. GENERALIDADES DE YACIMIENTOS AURÍFEROS.

Un yacimiento mineral es la acumulación en superficie, o cerca de ella, de compuestos metálicos o no metálicos que, debido a su extensión, disposición o enriquecimiento, pueden recuperarse con beneficio económico. El oro es un metal precioso de color amarillo, brillo metálico, denso (19.3 g/cc) y blando (2.5-3 Mohs), muy apreciado por su belleza, utilidad y escasez; no se oxida ni pierde su lustre. Entre los metales conocidos, se lo considera el más dúctil y maleable.

Desde el punto de vista de la geoquímica, se considera que el oro es un elemento con escasa o nula movilidad química, que se transporta inicialmente, desde el interior hacia la corteza terrestre, mediante procesos magmáticos. Los fluidos involucrados en este proceso reaccionan con las rocas circundantes y permiten la movilización del oro a través de fracturas y poros.

Los cambios de presión, temperatura y reactividad geoquímica dan lugar a su precipitación. En los yacimientos minerales, el oro se asocia principalmente con elementos como la plata (Ag), el arsénico (As), antimonio (Sb), mercurio (Hg), selenio (Se) y telurio (Te). En algunos depósitos se presenta asociado con hierro (Fe), zinc (Zn), plomo (Pb) y cobre (Cu). El tamaño y tipo del depósito aurífero depende de los factores ya mencionados, así como de la magnitud del evento y el tiempo de ocurrencia.

A continuación se mencionan y describen las generalidades de los principales yacimientos auríferos que han sido descritos a nivel mundial, y que han sido reconocidos en el territorio colombiano, o que tienen potencial en el país, dada la diversidad de ambientes de formación de yacimientos que se presentan:

- **Depósitos Epitermales.** En este tipo de depósitos, la mineralización de metales preciosos y de sulfuros asociados se produce a partir de fluidos hidrotermales calientes, cargados de metales que precipitan en las fracturas y fallas de las rocas encajantes (vetiformes) o en forma de diseminaciones formadas dentro de la roca caja, cuando se presentan las condiciones adecuadas de porosidad y permeabilidad. Los depósitos epitermales se forman a profundidades que oscilan entre uno y dos kilómetros desde la superficie, y genéticamente se encuentran relacionados con ambientes de vulcanismo activo.

La mineralización de yacimientos epitermales de metales preciosos puede formarse a partir de dos tipos de fluidos químicamente distintos: los denominados depósitos epitermales de baja sulfuración, que tienen un pH cercano a neutro, y los fluidos de alta sulfuración, que son más oxidados y ácidos. Los términos alta y baja sulfuración fueron introducidos por Hedenquist (1987) y se refieren al estado de oxidación del azufre. En los de baja sulfuración se presenta como S^{-2} en forma de H_2S (reducido), mientras que en los de alta sulfuración el azufre se presenta como S^{+4} en forma de SO_2 (oxidado). Como depósitos epitermales de alta sulfuración, a escala mundial se pueden destacar Yanacocha (Perú) y El Indio (Chile); como depósitos de baja sulfuración se destaca Guanajuato (México). En Colombia, el depósito de Angostura, en la provincia minera de Vetas-California, se estima que es un depósito epitermal de alta sulfuración y, en general, los depósitos epitermales relacionados con cuerpos intrusivos e hipoabisales del Cenozoico, en la cordillera Occidental, sector de Riosucio-Quinchía, son considerados, probablemente, como de intermedia a alta sulfuración.

- **Depósitos tipo pórfido (pórfidos auríferos y cobre-oro).** Estos depósitos se originan por el emplazamiento de cuerpos intrusivos subvolcánicos. Son yacimientos de baja ley (0.5-2 gramos por tonelada) y alto tonelaje, en los que ocurren eventos mineralizantes asociados a alteración hidrotermal (alteración potásica, alteración fílica y alteración argílica). Con respecto a la mineralogía, en este tipo de depósitos se encuentra oro libre con partículas de algunos micrones, o como inclusiones en calcopirita, en bornita, o en granos de pirita, que se presentan en estructuras de stockwork (estovercas o enrejados), en venillas, o en diseminaciones. A escala mundial pueden citarse como ejemplos el depósito de Bajo la Alumbraera (Argentina); La Coipa, cerro Casale y Marte/Lobo (norte de Chile) y Panguna (Papúa Nueva Guinea). De Colombia se pueden citar el depósito de La Colosa, en Cajamarca (Tolima, cordillera Central), Murindó (Antioquia) y Acandí (Chocó).
- **Depósitos de sulfuros masivos volcanogénicos-polimetálicos.** Este tipo de depósitos puede estar relacionado con el vulcanismo submarino que ocurre en las dorsales mesoocéánicas, en el que, por procesos hidrotermales, las sucesiones estratiformes o lenticulares vulcanosedimentarias que se acumulan se pueden enriquecer en metales como cobre, plomo y zinc, además del oro como subproducto.

En Colombia, al occidente de la falla de Romeral, en la cordillera Occidental, se presentan ambientes de formación adecuados para la acumulación de este tipo de depósitos. Actualmente se reconoce la mina del Roble (Chocó) como un depósito de sulfuros masivos, pero igualmente se destacan los prospectos del Dovio (Valle del Cauca) y Anzá (Antioquia).

- **Depósitos de placer (paleoplaceres y placeres auríferos recientes).** Se definen como depósitos minerales formados en superficie y que se acumulan por concentración mecánica, bien sea por corrientes aluviales o por corrientes marinas, en zonas lacustres o por procesos coluviales, de partículas minerales pesadas (densas), que son inertes a procesos oxidantes minerales, y que proceden de fragmentos líticos meteorizados.

Los placeres auríferos recientes son muy importantes en la producción de oro en Colombia. Se destacan los distritos mineros del Bagre (Antioquia), bajo Cauca-Nechí; las cuencas de los ríos San Juan y Atrato (Chocó); río Naya (Valle del Cauca) y Ataco (Tolima), entre otros. Los paleoplaceres son depósitos de placer auríferos antiguos que fueron depositados en ambientes sedimentarios fluviales a deltaicos bajo condiciones reductoras (atmósfera pobre en oxígeno).

En Colombia, las áreas más favorables para la ocurrencia de paleoplaceres corresponden a depósitos de metaconglomerados con oro en la serranía de Naquén y Caranacoa (Guainía) y Taraira (Vaupés).

- **Otros tipos de depósito.** Teniendo en cuenta la importancia o el potencial para Colombia, se puede destacar potencialidad en depósitos tipo skarn auríferos en los que se presenta emplazamiento de plutones o de cuerpos intrusivos en rocas sedimentarias carbonatadas, que producen metamorfismo de contacto, metasomatismo y acumulación de depósitos de metales (sulfuros de cobre, plomo, zinc; magnetita, molibdenita y oro como subproductos). En Colombia se destacan como áreas con potencial Mina Vieja y El Sapo (Tolima), asociadas con las calizas de la formación Payandé.

Figura 4.1: Depósitos auríferos y su relación con la tectónica de placas.

Fuente: Modificado de Lydon, 2007

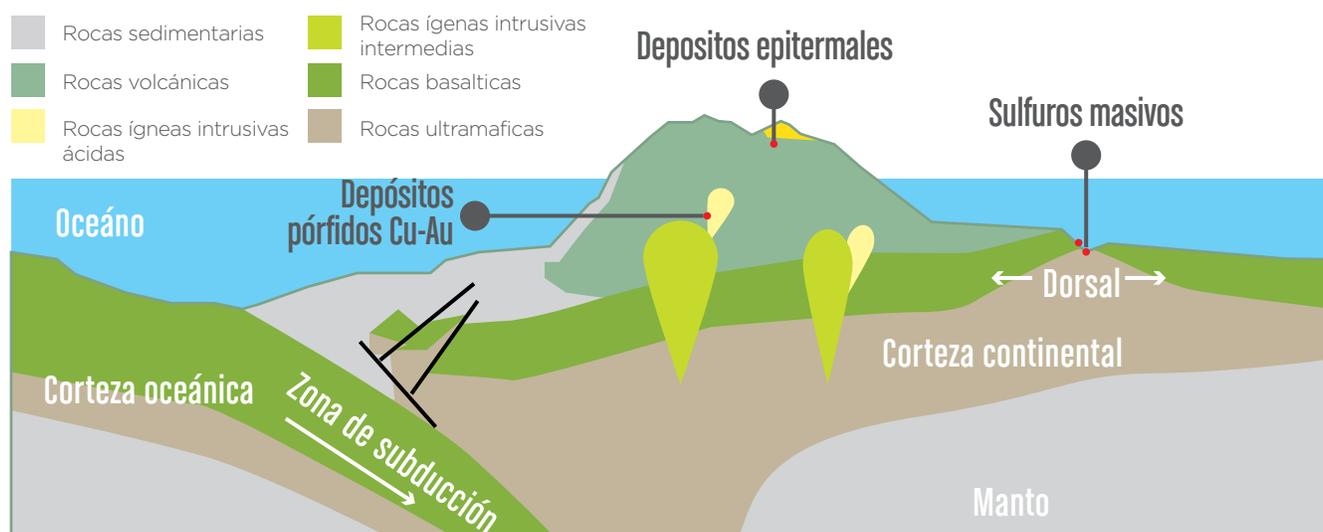
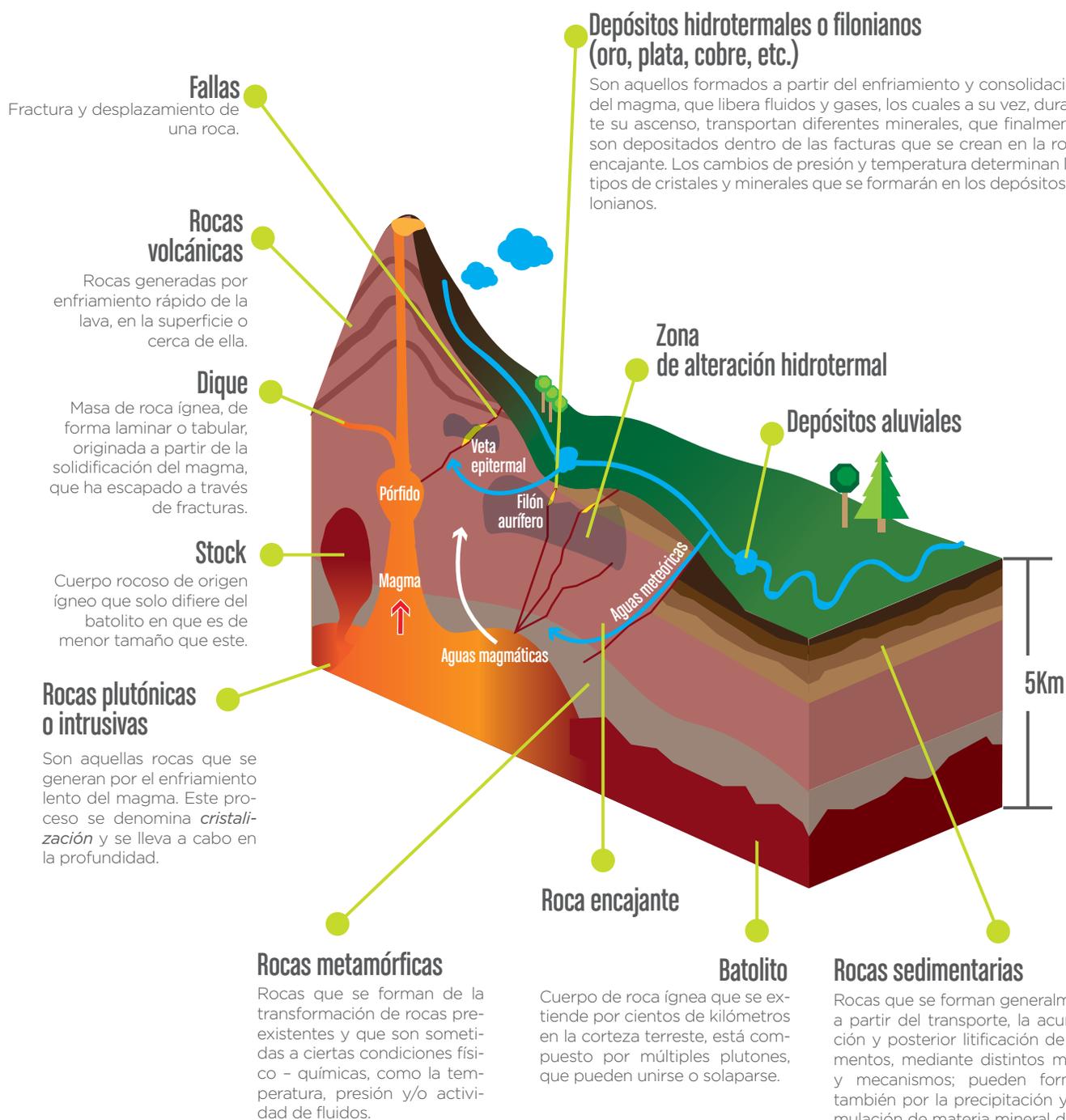


Figura 4.2: Perfil generalizado de la corteza terrestre indicando los principales elementos que intervienen en la formación de depósitos hidrotermales filonianos.

Fuente: Propia



Los sistemas hidrotermales dan lugar a variados depósitos auríferos, que han sido clasificados según la profundidad, las condiciones de presión y temperatura como hipotermales (los más profundos), mesotermales (los intermedios) y epitermales (los más someros) (Lindgren, 1933).

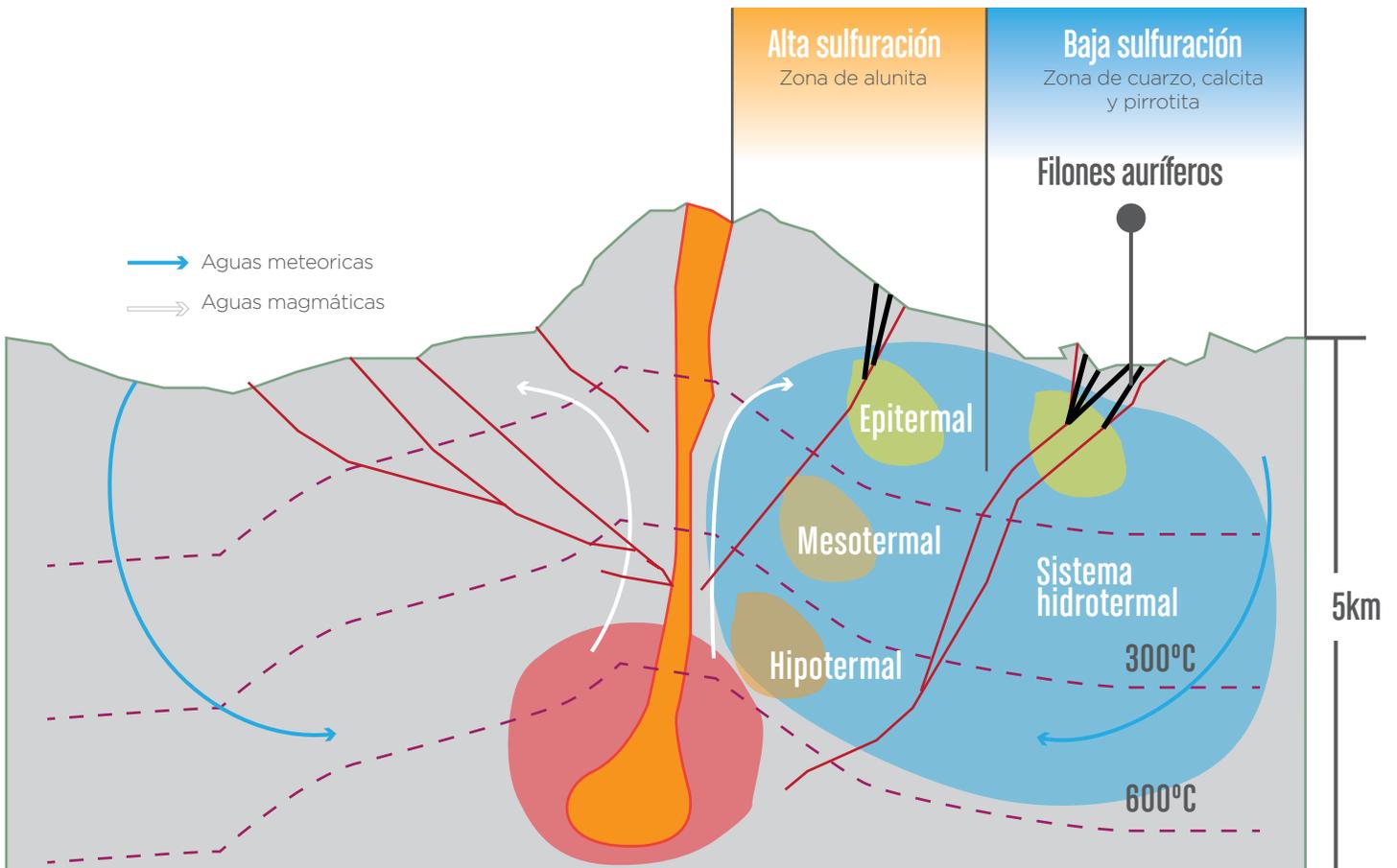
A partir de la afinidad geoquímica, los depósitos epitermales se han diferenciado de los fluidos que intervienen en la mineralización. Se reconocen dos tipos principales: aquellos en los que el azufre se encuentra relativamente más oxidado (SO_2), conocidos como de alta sulfuración, y aquellos en los que el azufre se encuentra más reducido (HS , H_2S) conocidos como de baja sulfuración (Hedenquist, 1987). Cada uno de ellos se encuentra en una posición relativa con respecto a la fuente termal, y tiene composición mineral y características estructurales propias.

BAJA SULFIDACIÓN pH - neutro, meteórico	ALTA SULFIDACIÓN pH - ácido, magmático
Vetas espacio - abierto principalmente.	Mineral diseminado dominante.
Stockwork son comunes.	Mena de reemplazamiento común.
Menor diseminación de minerales.	Vetas subordinadas, localmente dominantes.
Menor reemplazamiento de minerales.	Stockwork menor.

Fuente: White and Hedenquist, (1995).

Figura 4.3: Perfil general de los depósitos auríferos de tipo hidrotermal (aproximación al ambiente de depósito aurífero).

Fuente: Propia

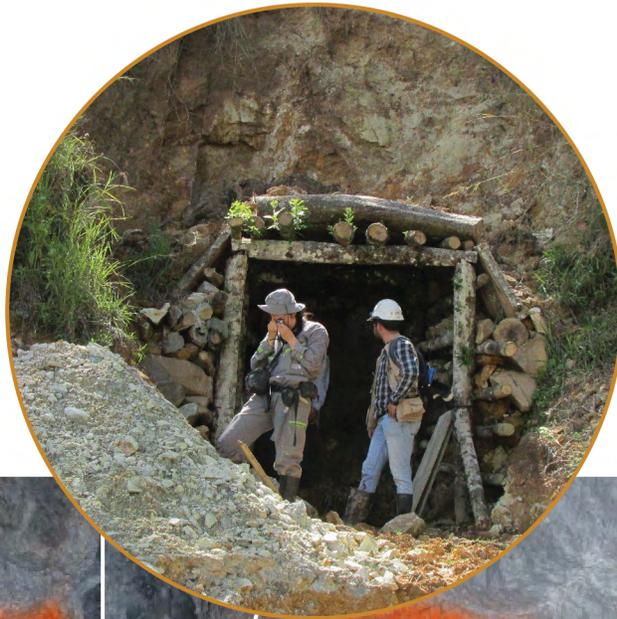


4.1.2. IDENTIFICACIÓN DE MINERALES EN EL FRENTE DE MINA

Figura 4.4: Diagrama frente de mina.
Fuente: Propia

BOCAMINA

La entrada a una mina, generalmente un túnel horizontal.



FRENTE DE MINA

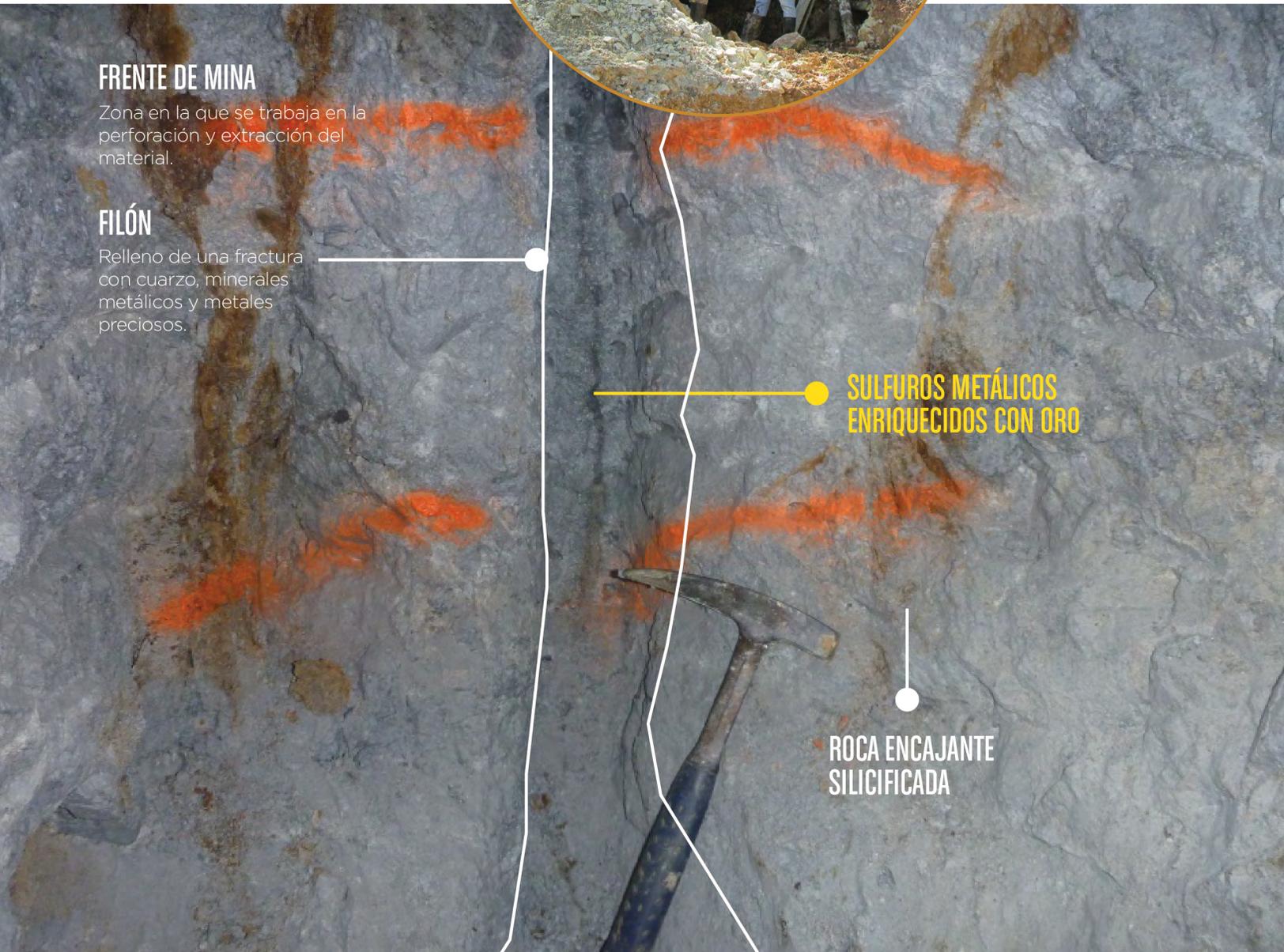
Zona en la que se trabaja en la perforación y extracción del material.

FILÓN

Relleno de una fractura con cuarzo, minerales metálicos y metales preciosos.

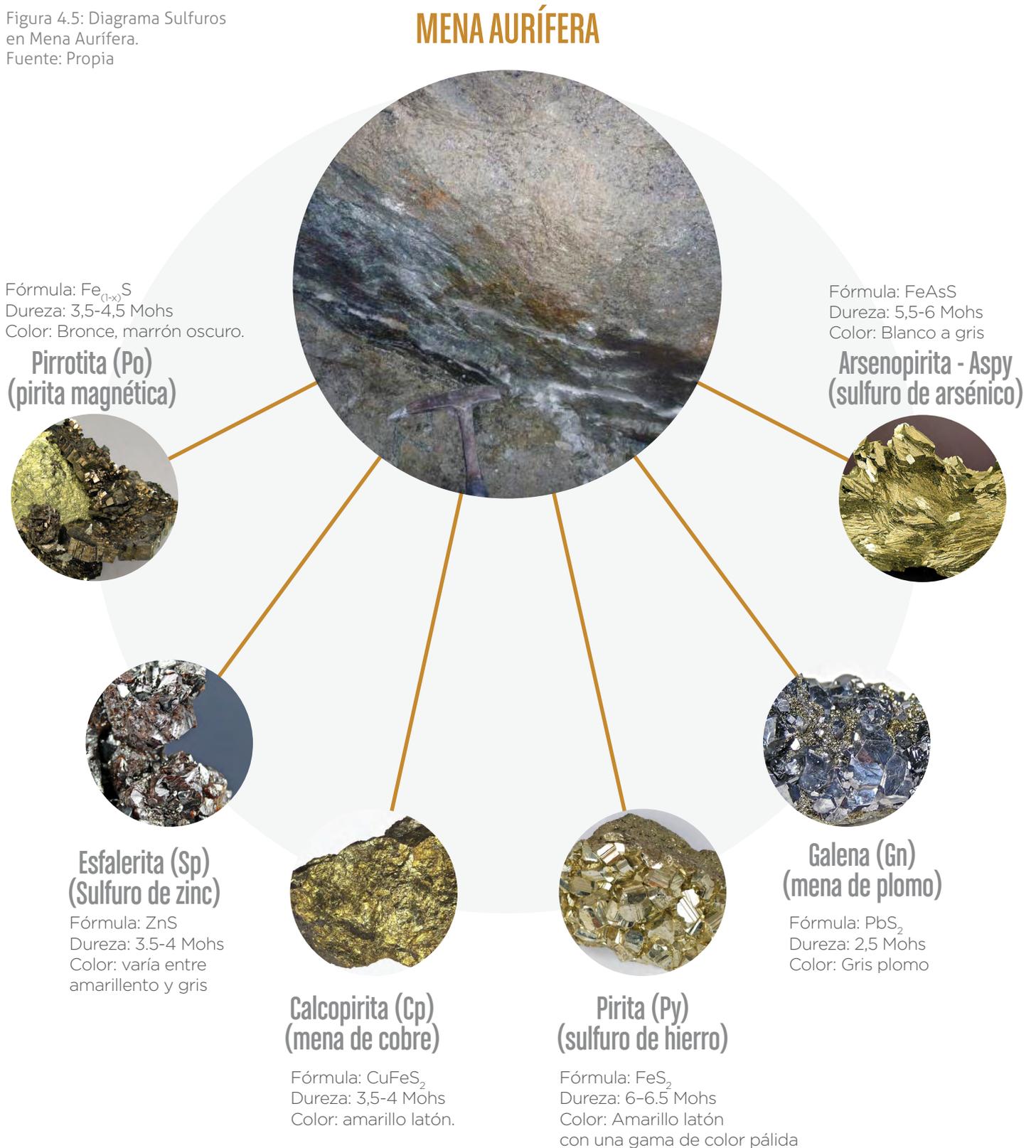
SULFUROS METÁLICOS ENRIQUECIDOS CON ORO

ROCA ENCAJANTE SILICIFICADA



4.1.3. SULFUROS METÁLICOS ASOCIADOS A LA MENA

Figura 4.5: Diagrama Sulfuros en Mena Aurífera.
Fuente: Propia

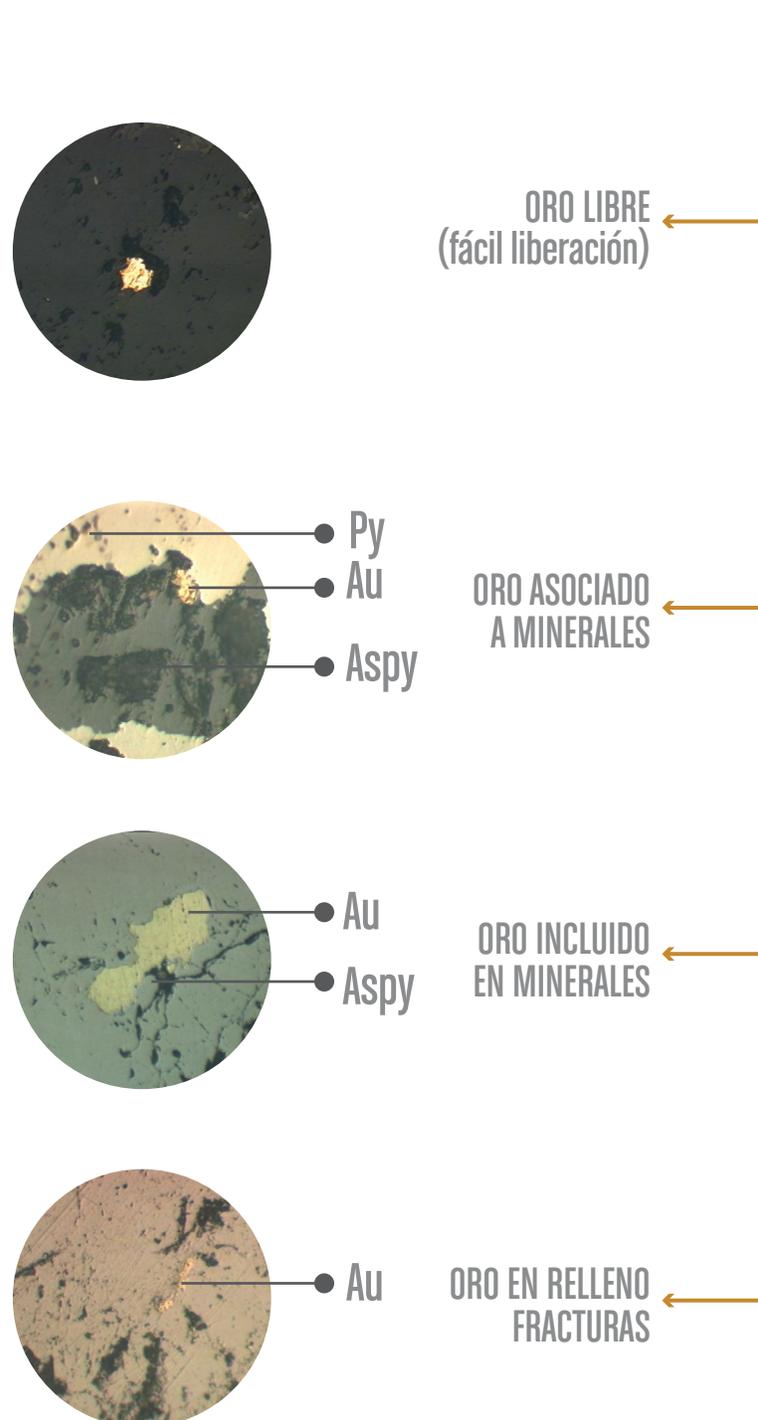


4.1.4. TIPOS OCURRENCIA DE ORO

Figura 4.6: Tipos de Ocurrencia de oro.
Fuente: Propia

OCURRENCIA DE ORO EN LA MENA

Indica la forma, tamaño y estructura como se presenta el oro en la mineralización



4.2. GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA DE LA ZONA MINERA DE MARMATO, RIOSUCIO (CALDAS), QUINCHÍA (RISARALDA) Y CARAMANTA (ANTIOQUIA)

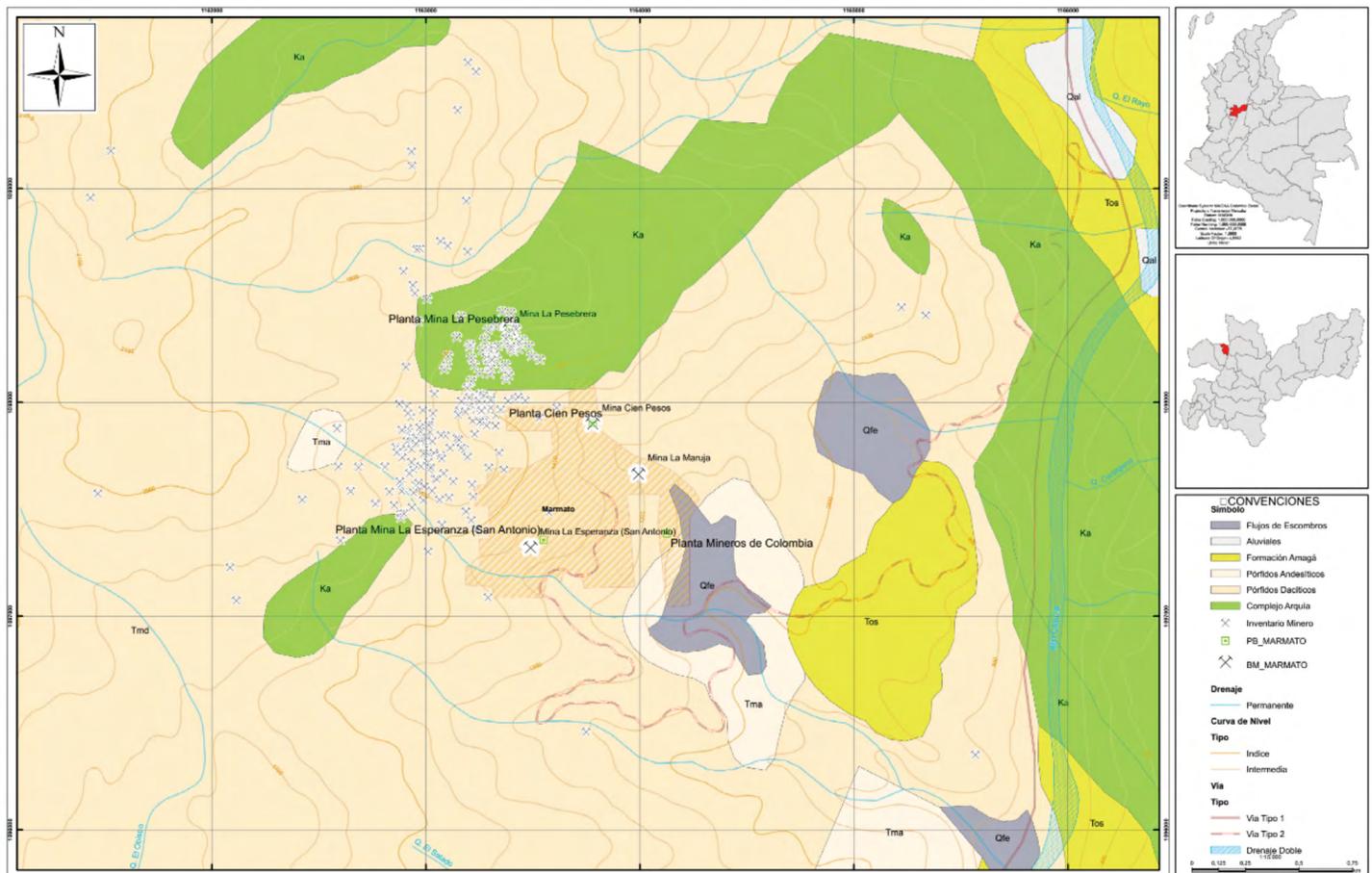
La zona estudiada se encuentra geológicamente asociada a una margen tectónica activa como parte de la subprovincia metalogénica Cauca-Romeral, que se extiende a lo largo del valle interandino del río Cauca, y cuyos límites son el sistema de fallas de Romeral, por el oriente, y el sistema de fallas Cauca-Patía por el oeste, cuya continuidad al norte es la falla de Mistrató. La mineralización aurífera está tectónicamente relacionada con la evolución de un magmatismo y vulcanismo neógeno, de naturaleza calco-alcalina, resultante de la fusión de roca sobre una zona de subducción derivada de la interacción de corteza oceánica y continental, y que dio lugar a la cordillera andina. Los cuerpos magmáticos calco-alcalinos mineralizados ascienden a la superficie a través de profundas fisuras en dirección noroeste-sureste y este-oeste.

4.2.1. GEOLOGÍA REGIONAL

En este sector de la cordillera Occidental, el basamento es de composición basáltica (formación Barroso), sobre el cual se desarrolla una cuenca sedimentaria denominada cuenca de Amagá, delimitada al occidente por la falla de Mistrató y al este con el sistema de fallas de Romeral. Dos unidades geológicas, las formaciones Amagá y el stock de Irra, se encuentran intruidas por cuerpos andesíticos y dacíticos, de edad neógena, y están parcialmente cubiertas por secuencias volcano-sedimentarias de la formación Combia. El conjunto de rocas está limitado hacia el oriente por una secuencia metamórfica y sedimentaria de origen continental (grupo Arquía), a lo largo del sistema de fallas Cauca-Almaguer (falla Romeral).

Figura 4.7: Mapa geológico generalizado del área.

Fuente: Propia



4.2.2. GEOLOGÍA LOCAL Y MINERALOGÍA DE LA MENA

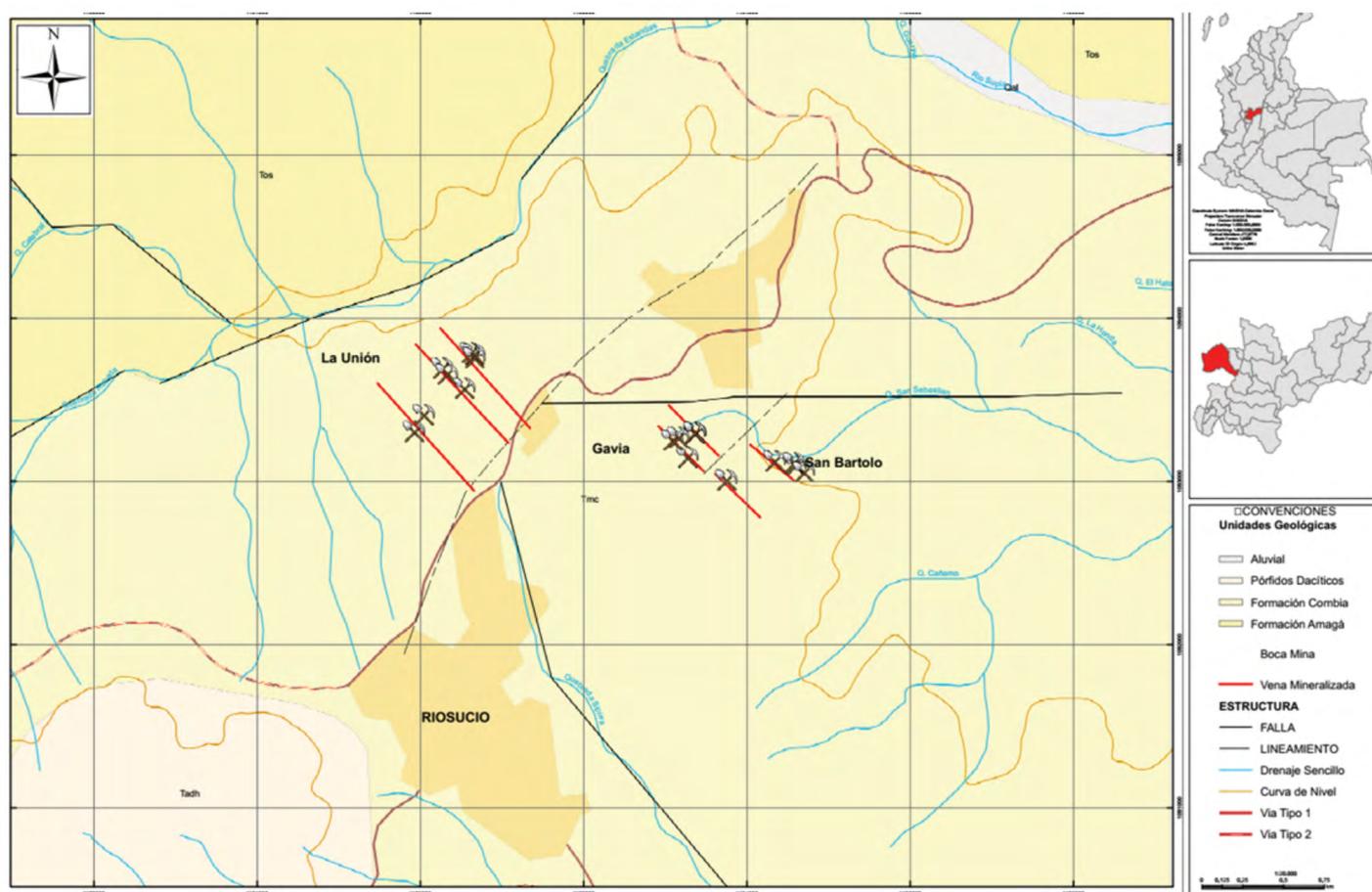
4.2.2.1. SECTOR DE MARMATO

El distrito minero de Marmato se halla en el denominado terreno geológico Cauca-Romeral (Etayo et al., 1983), que se caracteriza por el predominio de rocas de afinidad oceánica (rocas básicas) y metamorfitas, con la presencia de algunos plutones calcoalcalinos e intrusivos subvolcánicos.

El basamento está esencialmente constituido por rocas metamórficas del complejo Arquía (Kar), que se encuentran intruidas por rocas ígneas basálticas, andesíticas, y también cubiertas por rocas vulcano-sedimentarias de la formación Combia (Tmc); estos a su vez están intruidos por cuerpos subvolcánicos de composición calcoalcalina como andesitas y dacitas (Tma), que en la zona corresponden con el denominado stock de Marmato.

Figura 4.8: Mapa geológico de Marmato.

Fuente: Propia

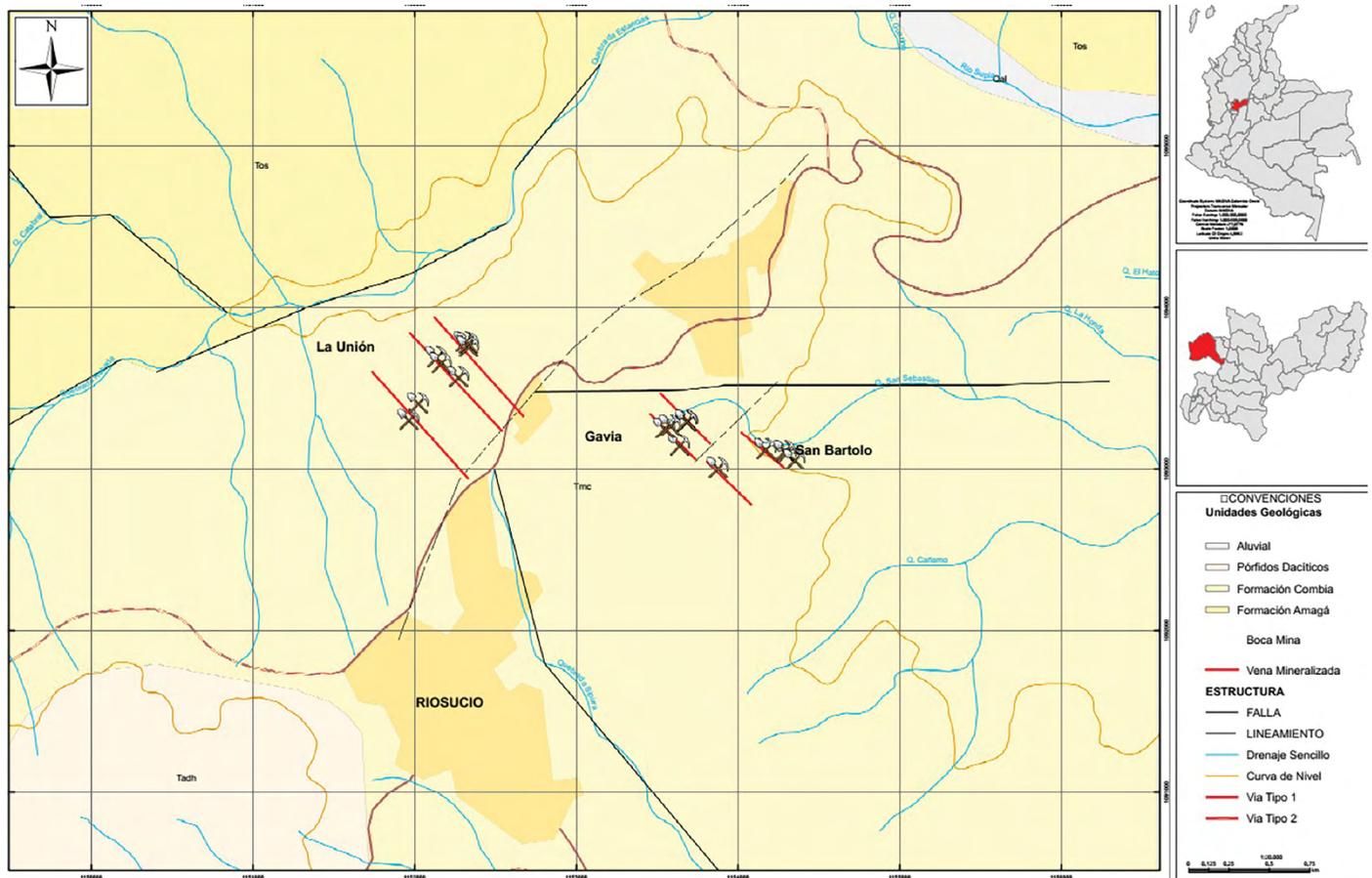


4.2.2.2. SECTOR DE RIOSUCIO

En la zona minera afloran lavas volcánicas andesíticas y secuencias volcanoclásticas de tobas y aglomerados volcánicos poco cementadas denominada como formación Combia (Tmc). Esta unidad se encuentra profundamente afectada por alteración hidrotermal argílica concentrada en una amplia zona de falla de aproximadamente 800 metros cizalla en dirección N 80° W, donde tiene lugar el emplazamiento de diques y apófisis porfíricos de composición dacítica, resultante de eventos magmáticos tardíos que dieron lugar a estrechas y alargadas brechas hidrotermales con intensa alteración argílica dominada por la presencia de minerales de arcilla como caolinita, esmectita e illita. La zona de alteración presenta diseminación de pirita, principalmente, y esfalerita, calcopirita y galena subordinadas. La mineralización aurífera está confinada a la zona de intensa alteración argílica.

Figura 4.9: Mapa geológico de Riosucio.

Fuente: Propia



4.2.2.3. SECTOR DE QUINCHÍA

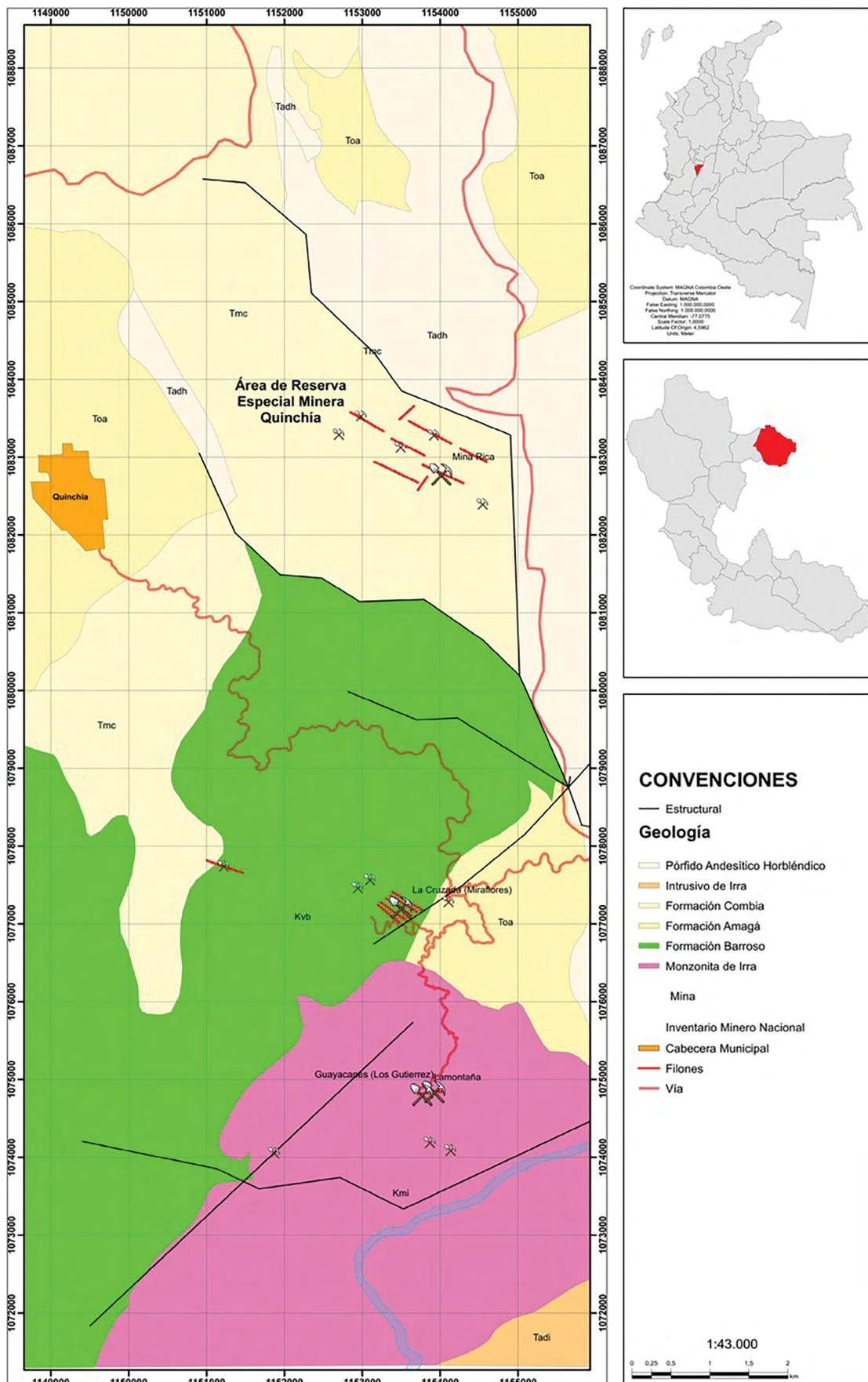
El basamento en este sector de la cordillera Occidental es de composición basáltica, y sobre él se desarrolla la cuenca sedimentaria de Amagá. Posteriormente se presenta un intenso vulcanismo en el área que culmina con la acumulación de una potente secuencia vulcanosedimentaria denominada formación Combia, formada por la intensa actividad volcánica durante el Neógeno y compuesta por piroclastos de composición andesítica y basáltica, brechas volcánicas e hidrotermales y flujos de lava basálticos, andesíticos y depósitos vulcanoclásticos.

4.2.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área estudiada se encuentra enmarcada por dos sistemas de fallas bien definidos: por el oriente, el sistema de fallas de Romeral, que separa la corteza oceánica al occidente de la corteza continental al oriente, tiene componente dextral y fue ocasionado por la acreción de la placa oceánica durante el Paleógeno (McCourt et al., 1984). Por el occidente, el límite es el sistema de fallas del Cauca, que pertenece a una sutura de edad Cretácica, y presenta direcciones preferentes N-S, NNE-SSW. La interacción entre estos sistemas de fallas da como resultado fallas secundarias transpresivas a través de las cuales migraron magmas que permitieron el emplazamiento de los cuerpos porfíricos que afloran en el área estudiada.

La disposición estructural de las rocas está dominada por un sistema de fallas de rumbo en dirección noreste. Este sistema de fallas se ve entrecortado por otro sistema de fallas en dirección este-oeste y noroeste-sureste, que desplazan los bloques tectónicos en sentido sinextral, y cuya disposición permite el emplazamiento de cuerpos subvolcánicos de composición calcoalcalina enriquecidos con oro (véase la figura 4.8 y 4.9).

Figura 4.10: Mapa geológico del área de Quinchía.
Fuente: Propia

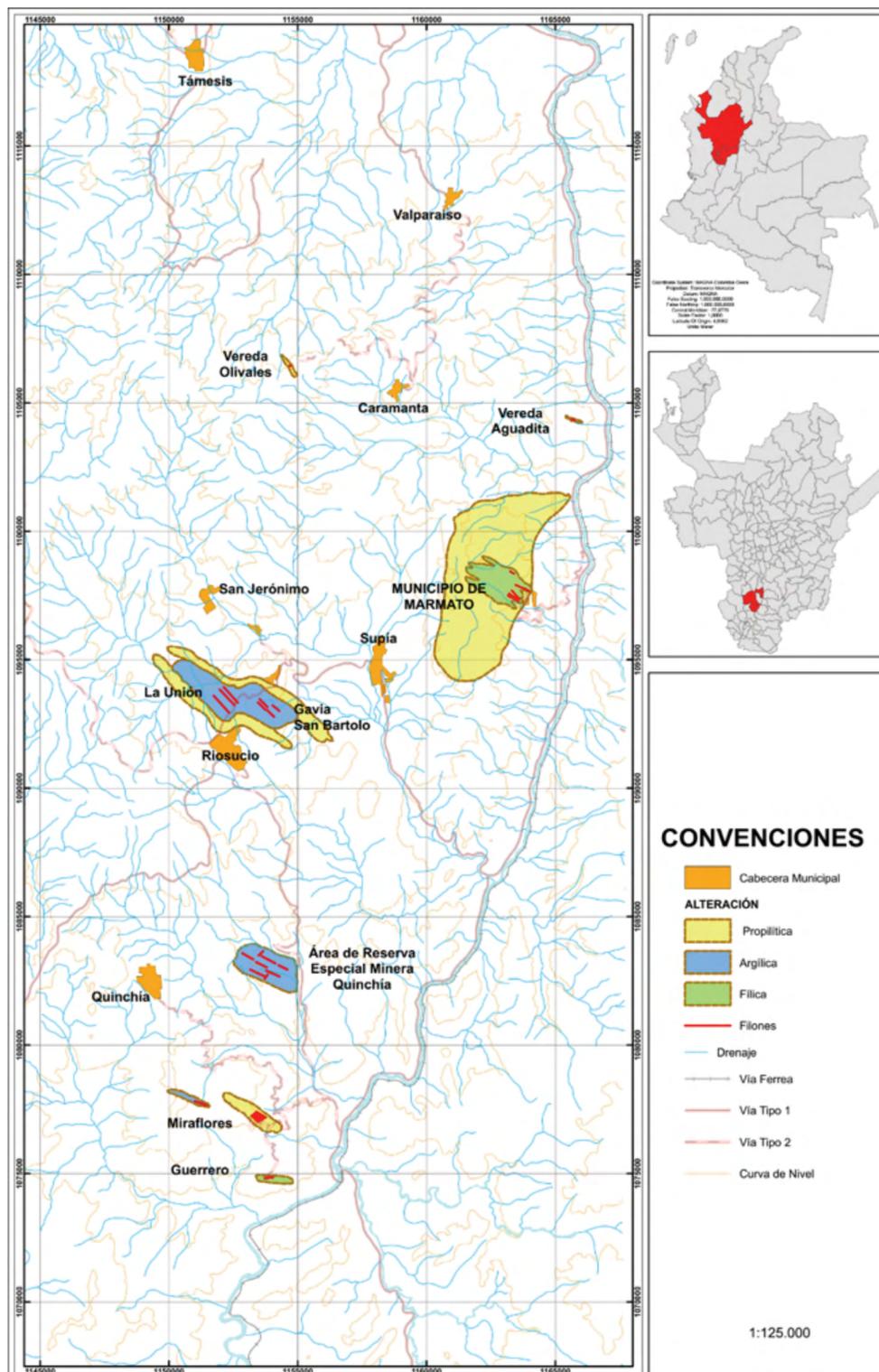


4.2.4. ALTERACIÓN HIDROTHERMAL

En el distrito minero se presentan dos estilos de alteración hidrotermal: el primero ocurre con alteración propilítica en la roca huésped y alteración filica en bordes de filones, y el segundo con extensa alteración argílica y alteración filica en bordes de filones mineralizados. El primero se halla concentrado en la zona de Marmato y Caramanta, y el segundo, en los sectores de Riosucio y Quinchía.

Figura 4.11: Mapa alteraciones hidrotermales características de los depósitos

.Fuente: Propia



4.2.4.1. SECTOR DE MARMATO

La alteración hidrotermal presente en el área de Marmato se presenta básicamente en dos eventos, uno temprano desarrollando un tipo de alteración propilítica, evidenciada por reemplazamientos de epidota en plagioclasa y en minerales máficos; a su vez acompañados por mineralización de pirita y pirrotina diseminadas; ésta alteración se encuentra relacionada a los sectores marginales de los cuerpos subvolcánicos porfíricos. El evento tardío corresponde al tipo de alteración filica, identificada por la asociación de cuarzo, sericita y pirita, concentrada alrededor de los filones y en los contactos con la roca encajante.

4.2.4.2. SECTOR DE RIOSUCIO

La circulación de fluidos hidrotermales a través de una amplia zona de cizalla en dirección E-W y NWW-SEEE involucra la formación de brechas volcánicas hacia los bordes de la roca precursora, las cuales cortan la secuencia volcanogénica de la Formación Combia. El desarrollo de las brechas hidrotermales responde a mecanismos de fragmentación y fracturamiento hidráulico, involucrando eventos explosivos constituidos por fragmentos angulares de roca y fluidos hidrotermales mineralizantes, su morfología generalmente es cónica o irregular en dirección hacia la superficie y se caracterizan por desarrollar alteración argílica intermedia pervasiva con el reemplazamiento de aluminosilicatos por minerales del grupo de las arcillas como caolinita, y esmectita e illita en menor proporción.

4.2.4.3. SECTOR DE QUINCHÍA

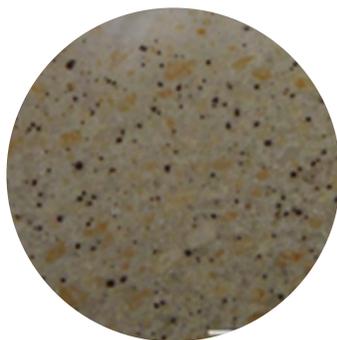
La alteración hidrotermal en el Área de la Reserva especial Minera de Quinchía consiste esencialmente de la caolinización y agilización de cenizas volcánicas de la Formación Combia, situación similar a la que se presenta en las rocas tobáceas y brechosas del municipio de Riosucio. En la zona de Miraflores la alteración propilítica predomina sobre las brechas tectónicas y magmáticas, identificada básicamente por las reacciones de cloritización y carbonatación de los minerales que componen la roca ígnea. Adicionalmente en las minas localizadas en la zona de Guayacanes también se presenta alteración propilítica relacionada a los cuerpos de pórfidos dacíticos de Irra; y es observable el desarrollo de alteración filica concentrada en inmediaciones de los filones mineralizados.

Figura 4.12: Fotografías de alteración propilítica y argílica.

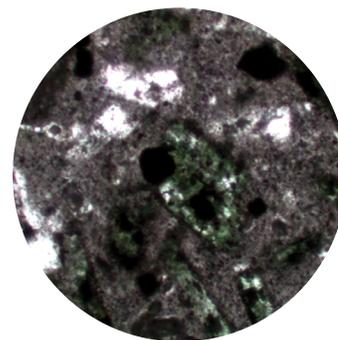
Fuente: Propia



Alteración de feldespato a carbonato, epidota, clorita (alteración propilítica)



Piritización y alteración argílica de cenizas volcánicas (Fm Combia)



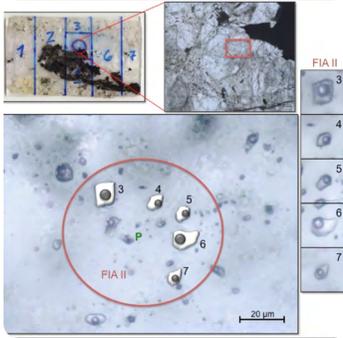
Alteración propilítica (cloritización de anfíboles)

4.2.5. METALOGÉNESIS Y MINERALIZACIÓN AURÍFERA

La mineralización aurífera en Marmato y Caramanta es diferente de la de los sectores de Riosucio y Quinchía. En Marmato ocurren filones de cuarzo ricos en sulfuros polimetálicos, mientras que en Riosucio y Quinchía la mineralización ocurre con pirita diseminada en rocas volcanoclásticas y brechas tectónicas e hidrotermales.

4.2.5.1. MUNICIPIOS DE MARMATO y CARAMANTA.

La mineralización en la zona aurífera de Marmato está caracterizada por la presencia de numerosos filones formados por relleno de espacios abiertos (fracturas) que presentan control estructural, con dirección preferencial NW-SE (dirección promedio N60W), abundancia de stockworks y texturas de relleno (bandeamiento). Se encuentran encajados en rocas andesíticas y dacíticas definidas como stock de Marmato; presentan zonas de alteración variable, menos pronunciada cuando la roca caja corresponde a esquistos sericíticos, como en el caso de Echandía (Ingeominas, 1997).



Inclusiones bifásicas típica del depósito de Marmato

La metalogénesis es similar en los sectores de Marmato, Echandía y Caramanta. La composición de los principales minerales de mena son pirita, esfalerita rica en hierro, arsenopirita, galena, +/- calcopirita, con variaciones en el contenido de pirrotina y, en menor porcentaje, de tenantita tetrahedrita.

La descripción petrográfica de Marmato se realiza sobre ocho secciones delgadas correspondientes a las minas La Maruja y San Antonio, localizadas en la parte media del depósito, y donde la roca encajante de la mineralización corresponde a una dacita porfírica con venas de cuarzo. Comparativamente con Caramanta, se encuentran altos contenidos de esfalerita y un incremento significativo en los contenidos de arsenopirita, con valores de hasta 9%, y la presencia de pirrotina +/- galena.

Esta mineralización indica un estado de baja a intermedia sulfuración. La transición entre la parte media y baja del depósito ha sido descrita por Santacruz (2011), donde se describe una zonación vertical marcada por la presencia de pirrotina y altos contenidos

de esfalerita (Santacruz R, 2011).

Para conocer las condiciones del fluido hidrotermal y metalogénicas del depósito se realizaron análisis de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo presentes en filones.

El resultado de análisis de inclusiones fluidas encontradas en Marmato permitió establecer que la temperatura mínima de precipitación de oro varía entre 315 °C y 320 °C, y una salinidad que oscila entre 10 y 16 (Eq wt% NaCl), lo cual significa una probable fuente magmática de fluidos y permite confirmar junto con la asociación mineralógica, un origen epitermal de baja a intermedia sulfuración.

Figura 4.13: Histograma de frecuencia de salinidad.

Fuente: Propia

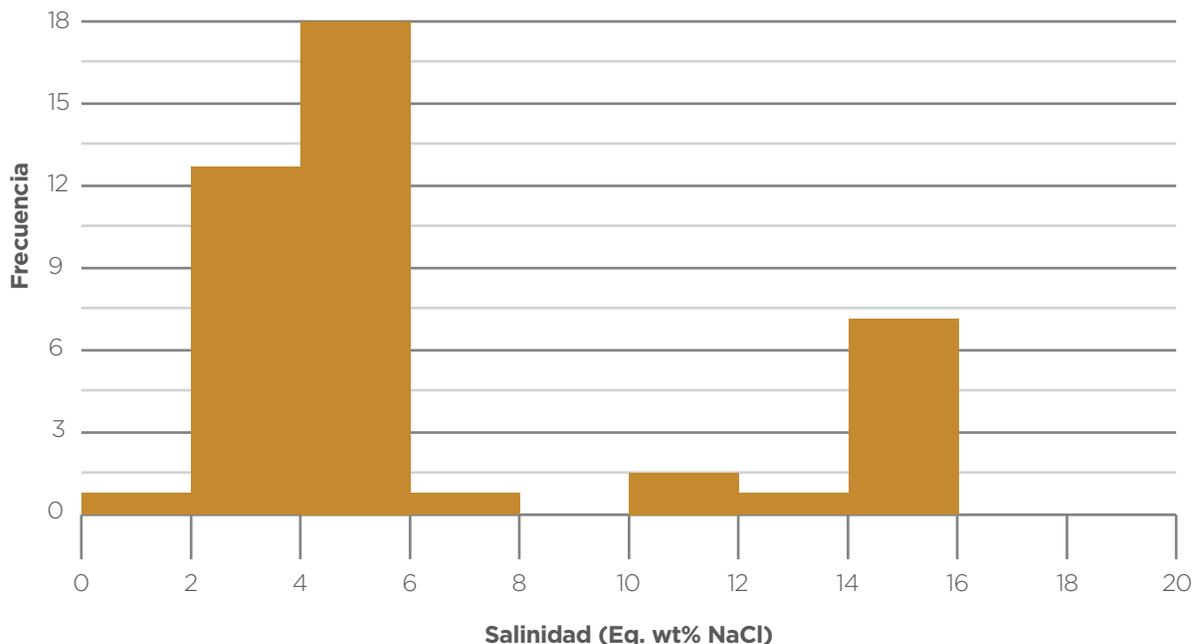
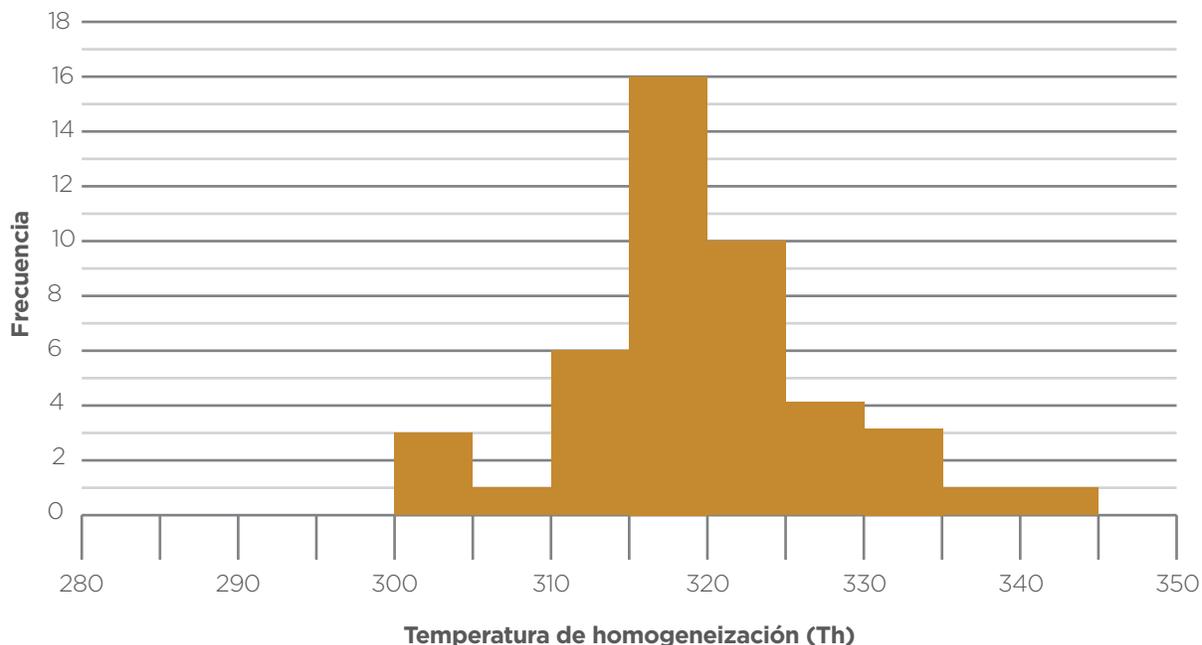


Figura 4.14: Histograma de frecuencia de temperatura de homogenización.

Fuente: Propia



SECUENCIA PARAGENÉTICA

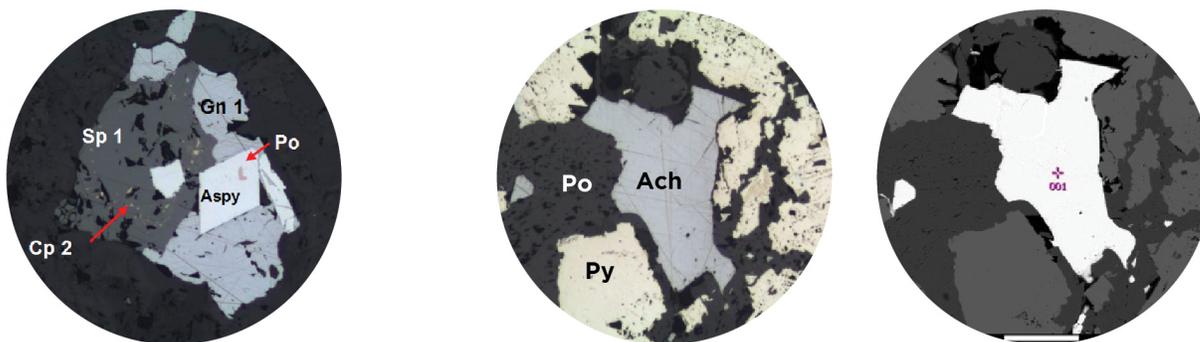
La secuencia paragenética de la zona minera de Marmato y Caramanta inicia con la cristalización de pirita (fase temprana) euهدral a subهدral de grano fino a grueso; pirrotina como inclusión en cristales de arsenopirita euهدral rómbica, además de cristalización de calcopirita y esfalerita exueltas, indicando que son una fase temporalmente simultánea, acompañada de ocasional aparición de galena, y tetraedrita-tenantita intercrecida con calcopirita como mineral accesorio.

El oro se observa en dos eventos, un evento temprano donde se encuentra incluido en pirita y un segundo evento, tardío, donde se encuentra asociado a calcopirita con precipitación simultánea de arsenopirita subهدral de tamaño muy fino éste segundo evento se encuentra rellenando fracturas de pirita. En este evento tardío y asociados a oro se observan minerales como galena y minerales con composición de plomo y bismuto ricos en plata (aschamalmita?, bismutinita?), los cuales no fueron identificables por evaluación visual, sino por análisis de microsonda electrónica.

En la zona de Caramanta las minas El Ajiaco y Chinamato presentan una mineralogía similar a la de Marmato, la diferencia radica en que el contenido de pirrotina y arsenopirita se reduce significativamente, llegando a una abundancia menor al

Figura 4.15: Paragénesis Marmato.

Fuente: Propia



Paragénesis del evento 1 donde se observa pirrotina (Po) incluida en arsenopirita (Aspy), que a su vez es incluida en esfalerita 1 (Sp 1) y galena 1 (Gn 1), se encuentran en una matriz de carbonato y arcillas. Hay calcopirita (Cp 1) con textura “disease” en la esfalerita (Sp 1).

Microfotografías en microscopio óptico y composicional de mineral de plomo rico en Bismuto (aschamalmita) Mina San Antonio.

se genera la depositación de sulfuros de hierro y metales preciosos diseminados en la roca y en delgadas venas y venillas. En las minas de la parte baja y en las rocas de la periferia, las rocas andesíticas presentan alteración propilitica con fuerte alteración argílica sobrepuesta.

La secuencia paragenética inicia con un evento primario de cristalización euhedral de pirita cubica y arsenopirita romboédrica. El segundo evento corresponde a la precipitación de calcopirita, esfalerita y galena; acompañados de una fase de pirita anhedral tardía con desarrollo de framboides.

El oro y la plata se encuentran cristalizados dentro roca como granos aislados libres de forma irregular, y también asociados e incluidos en pirita primaria; eventualmente también están asociados a calcopirita

MODELO METALOGÉNICO DE RIOSUCIO

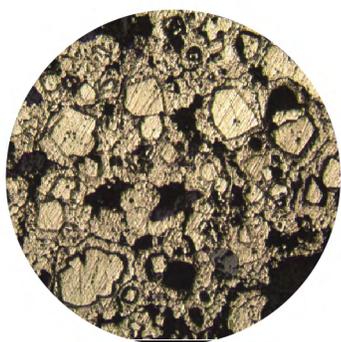
En términos generales, el modelo genético de Riosucio consiste en el desarrollo de un sistema hidrotermal sobre una amplia zona de cizalla con predominio de brechas hidrotermales desarrolladas en el interior de la formación Combia, compuesta por cenizas volcánicas, aglomerados y pórfidos dacíticos y andesíticos. El sistema hidrotermal con aguas de vapor calentadas promovió el desarrollo de la alteración argílica intensa a lo largo de la zona de fractura con precipitación de pirita y otros sulfuros con oro dispuestos en forma diseminada y en rellenos de pequeñas fracturas.

4.2.5.3. SECTOR DE QUINCHÍA

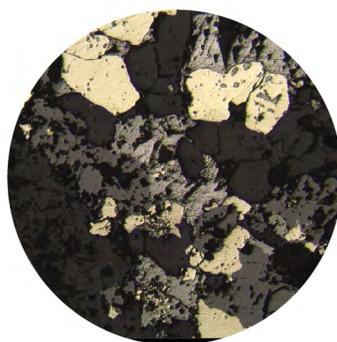
Las zonas mineralizadas están focalizadas en zonas de fractura con dirección general N 40-70W y N40-60E e inclinación de alto ángulo. Los espesores de veta son variables entre 0.2m y 2m. En estas zonas se incrementa la proporción de sulfuros diseminados y se intensifica la alteración hidrotermal argílica. La roca en la que se encuentra la mineralización, corresponde a una Brecha polimíctica tipo pipe con clastos angulosos a subredondeados correspondientes a las rocas que afloran en la zona; en su mayoría, corresponden a líticos basálticos y en menor proporción fragmentos de pórfidos andesíticos y dacíticos, dioritas y gabros.

Figura 4.18: Secuencia paragenética Riosucio.

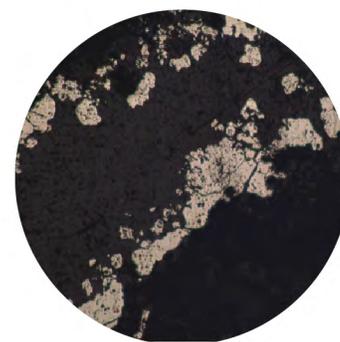
Fuente: Propia



Pirita primaria y pirita tardía recristalizada con esfalerita.



Asociación esfalerita - galena en borde de pirita primaria.



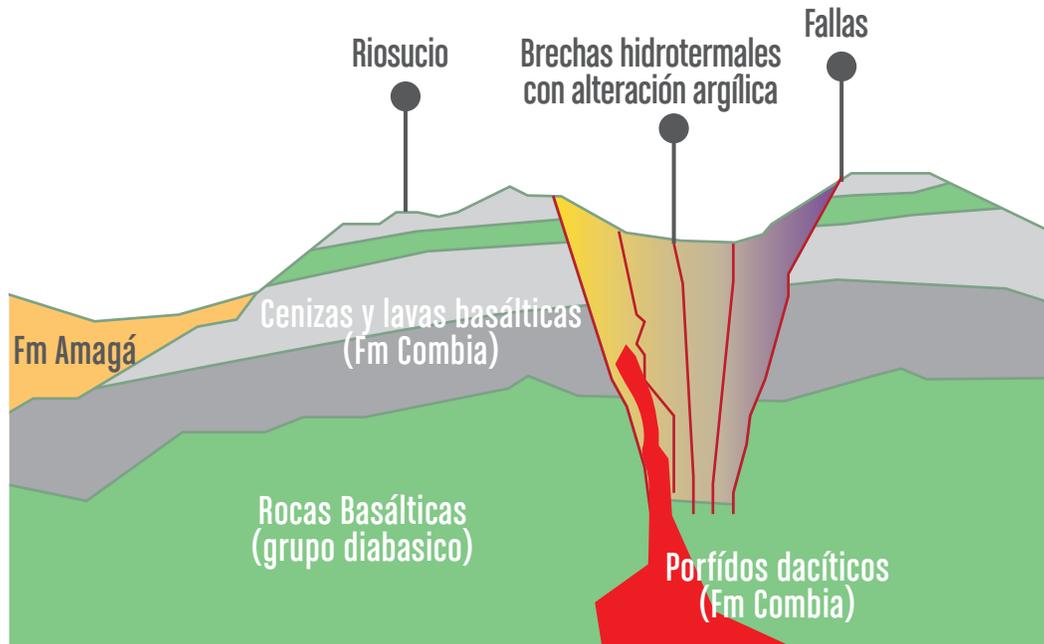
Venillas de pirita euhedral en relleno de fracturas.



La pirita es el sulfuro dominante. Generalmente se presenta en cristales euhedrales romboédricos (piritohedros), y en algunos sectores, sobre todo en aquellos de mayor enriquecimiento en oro, se presenta en cristales cúbicos subhedrales en agregados policristalinos. La acompañan cantidades menores de esfalerita, calcopirita, galena, arsenopirita y freibergita.

Figura 4.19: Perfil de modelo metalogénico Riosucio.

Fuente: Propia



Las rocas presentan intensa alteración hidrotermal argílica con un predominio de minerales del grupo de las arcillas como caolinita, illita e interestratificados de illita-esmectita, también hay presencia de cristalización de pirita en cristales euhedrales diseminados en la roca.

Los análisis petrográficos realizados en las minas La Montaña y Guayacanes reportan que los contenidos de arsénico disminuyen notablemente, producto de la interacción de los fluidos mineralizantes con rocas ígneas intrusivas de composición intermedia a acida.

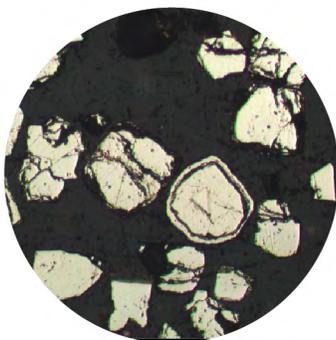
La metalogénesis inicia con la cristalización de pirita (temprana) Euهدral a subhedral de grano fino a grueso, la cual se encuentra diseminada en la roca, y calcopirita que a su vez se encuentra incluida en esfalerita; un segundo evento corresponde a la cristalización de pirita anhedral como relleno de fracturas y en venas.

Puntualmente en la zona de Miraflores se presenta mineralización aurífera en ambientes subvolcánicos dominados por el desarrollo de brechas magmático- hidrotermales, combinadas con brechas tectónicas.

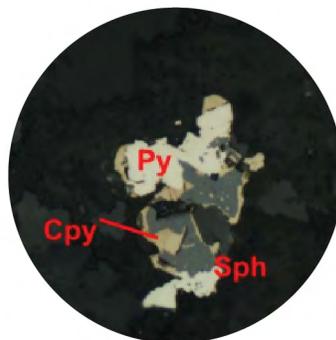
En los análisis petrográficos se logran diferenciar dos eventos mineralizantes; el primero está asociado al desarrollo de una matriz cuarzosa que engloba los fragmentos clásticos y posee una mineralización representada por cristales de pirita euهدral de grano fino diseminados, asociados a cristales de esfalerita euهدral. El segundo evento mineralizante corresponde a relleno de fracturas o mineralización localizada en el borde de los fragmentos clásticos; y permite el desarrollo de una segunda generación de esfalerita con exsolución simultánea de calcopirita, y asociación a calcopirita, pirita arseniosa y galena.

Figura 4.20: Paragénesis Quinchía.

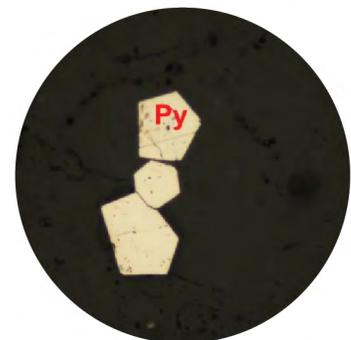
Fuente: Propia



Pirita con textura Piritohedrica.



Textura de intercrecimiento entre pirita (Py), calcopirita (Cpy), y esfalerita (Sph).

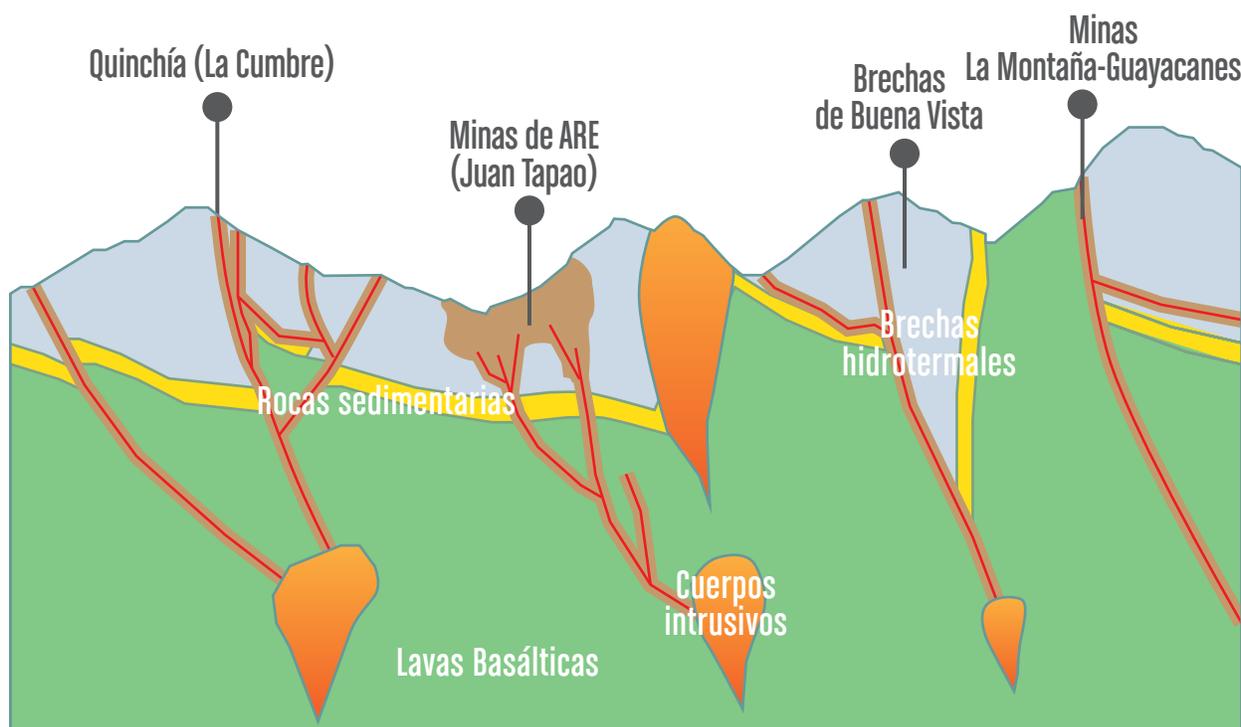


Pirita Euهدral.

Figura 4.21: Secuencia paragenética Quinchía (Miraflores).
Fuente: Propia



Figura 4.22: Perfil de modelo metalogénico Quinchía.
Fuente: Propia



4.2.6. OCURRENCIA DE ORO EN VETA

4.2.6.1. MUNICIPIO DE MARMATO Y CARAMANTA

La ocurrencia de oro en las explotaciones mineras de Marmato, de acuerdo con el registro histórico de análisis petrográficos, indica que el oro se encuentra principalmente incluido en pirita (59%), y asociado pirita-cuarzo-carbonato (29%), y en menor proporción (2%) considerado libre, en cuarzo.

También se identificaron otras asociaciones, como oro con pirrotina, asociado a tetraedrita y a pirita y arsenopirita, entre otros minerales.

En este sector el oro ocurre principalmente en tamaños menores de 100 µm (D2eq), y se identificaron algunas partículas que pueden llegar a alcanzar hasta 350 µm. Teniendo en cuenta el peso del oro, se observa que los tamaños de las par-

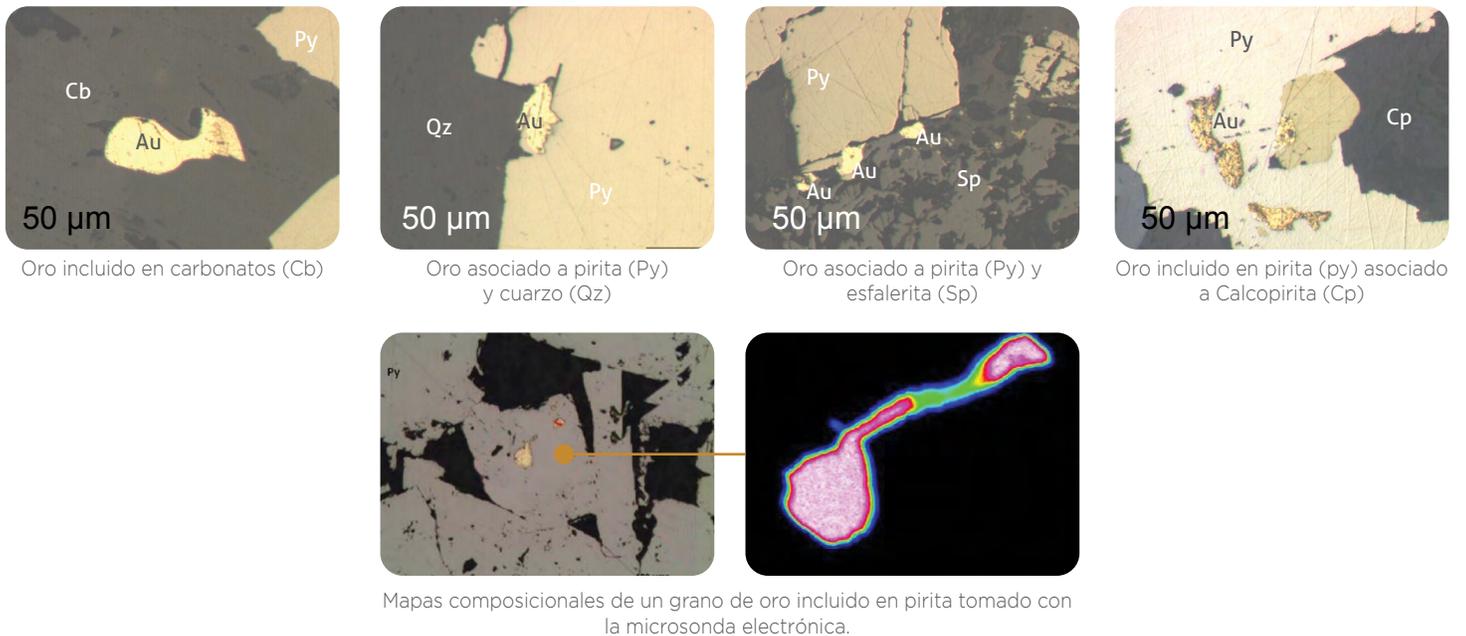
tículas se distribuyen en tres grupos: un alto porcentaje (67%) en peso está representado por partículas por debajo de 110 μm , un porcentaje menor (21%) entre partículas de 160 μm y 240 μm , y un 12% en peso se encuentra en partículas mayores de 280 μm .

Las partículas de tamaño mayor de 110 micrones tienen relevancia, ya que corresponden con el oro que se libera durante la trituración, y que puede recuperarse por gravimetría convencional.

Los mapas de elementos realizados con microsonda electrónica (SGC-UNAL, 2017) indican que hay variación composicional en los granos de oro analizados. La parte color rosa muestra concentraciones altas, y los colores verdes y azules representan áreas de menor concentración, tanto de oro, como de plata.

Figura 4.23: Imágenes de microscopío ocurrencia de oro en la veta, Marmato.

Fuente: Propia



Otros elementos presentes en oro se encontraron con concentraciones traza de bismuto (0.7% y 0.9%) en las partículas de las dos zonas, y mercurio (0.2%) en una partícula de oro de Marmato.

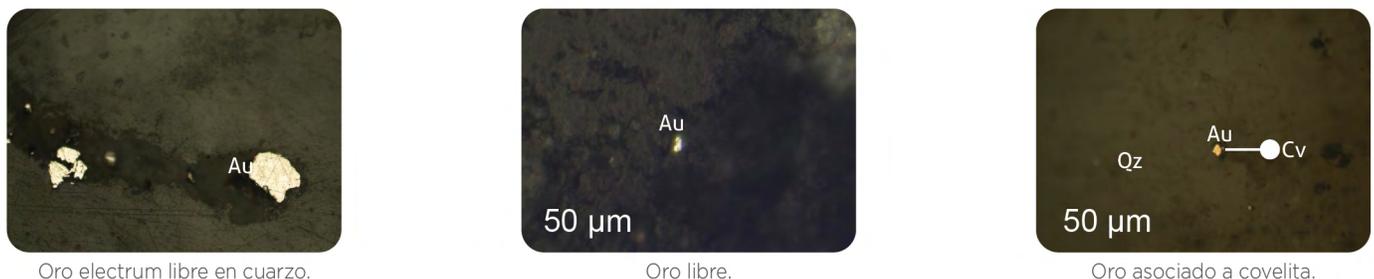
4.2.6.2. MUNICIPIO DE RIOSUCIO

En la zona de Riosucio, en las minas La Millonaria y La Sombra, se identificaron siete granos de oro libre, al parecer electrum, de tamaños que varían entre 1 μm y 80 μm , la mayoría menores de 10 μm en vetillas de cuarzo y libre en roca.

Debido a los pocos granos de oro encontrados en las muestras colectadas en las zonas de Riosucio y Quinchía, el tratamiento estadístico fue realizado solamente para la zona de Marmato.

Figura 4.24: Imágenes de microscopío ocurrencia de oro en la veta, Riosucio.

Fuente: Propia



4.2.6.3. MUNICIPIO DE QUINCHÍA

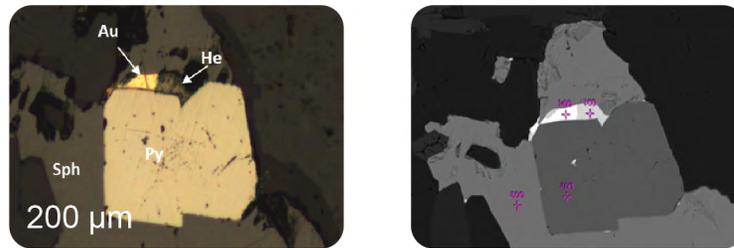
El oro encontrado en tiene un tamaño 22.3 μm (D2q), es tardío en la mineralización y se encuentra incluido en esfalerita y pirita, y está intercedido con telururo (hessita), identificado con microsonda electrónica (SGC-UNAL, 2017). En las imágenes

composicionales se puede observar la zonación del oro, la plata y el telurio, que permite diferenciar claramente los límites de los minerales.

El oro encontrado en la mina La Cruzada (Miraflores, municipio de Quinchía) tiene un tamaño $22.3 \mu\text{m}$ (D2eq), contiene $\text{Au}=72.8\% \text{wt}$, $\text{Ag}=19.4\% \text{wt}$, $\text{Bi}=0.83\%$ y $\text{Cu}=0.034\%$, y se encuentra entre esfalerita y pirita, está intercrecido en paragénesis con telururo (hessita), y es tardío en la mineralización. Los mapas de elementos realizados con microsonda electrónica (SGC-UNAL, 2017) indican la presencia de hessita y la zonación de Au, Ag y Te.

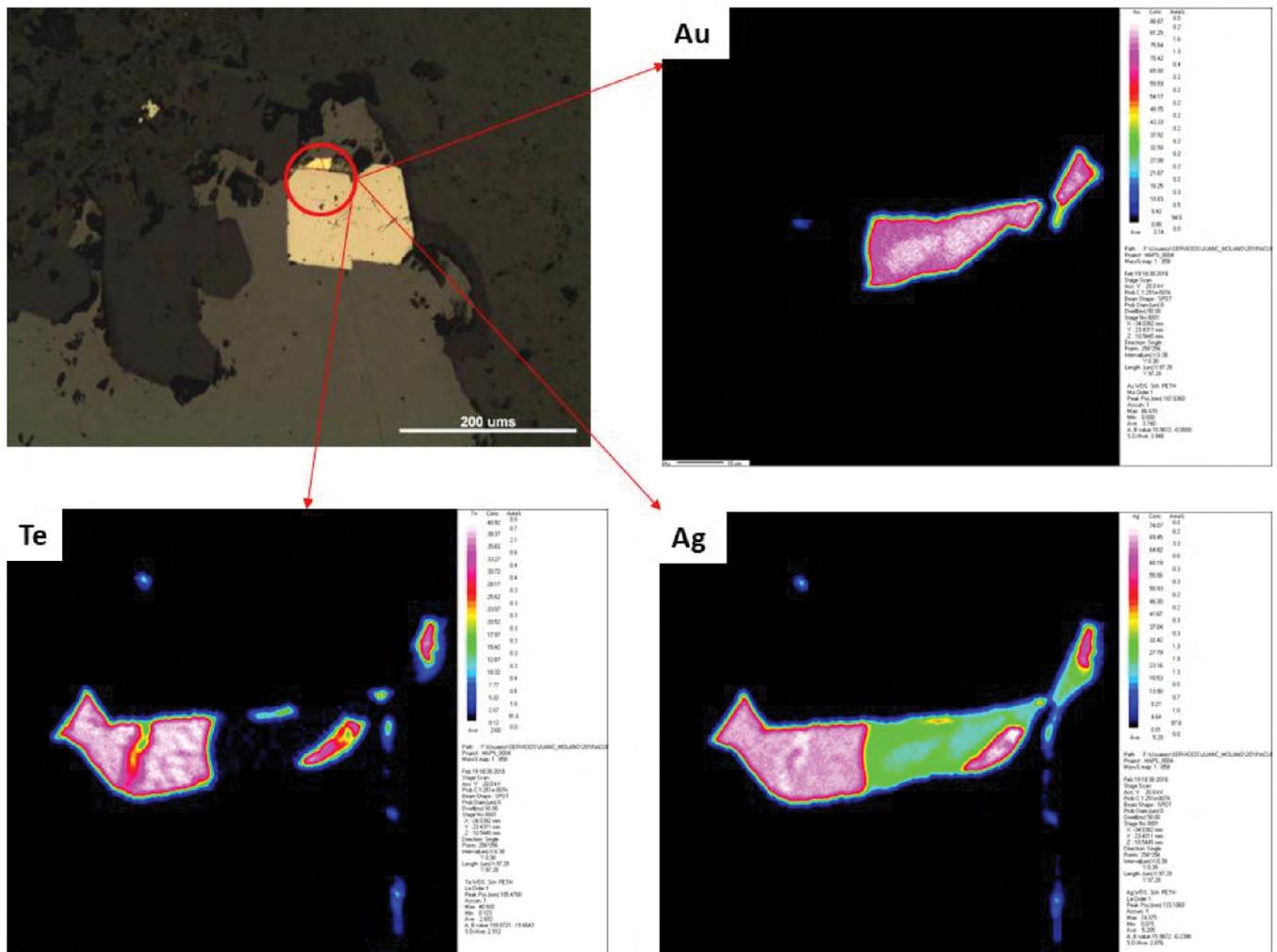
La fineza de este grano corresponde a 789.6 ($72.8\% \text{wt}$), con un contenido de plata de $19.4\% \text{wt}$ (identificado por análisis de microsonda).

Figura 4.25: Imágenes de microscopio ocurrencia de oro en la veta, Quinchía.
Fuente: Propia



Microfotografías en microscopio óptico y composicional con la ubicación del punto analizado para identificar los cristales de Hessita (He) y oro (Au), asociados a pirita (Py) y Sph (esfalerita).

Figura 4.26: Análisis en microsonda ocurrencia de oro, Quinchía.
Fuente: Propia



4.2.7. UNIDADES GEOMETALÚRGICAS (UGM)

Según el estilo de mineralización y la naturaleza de la roca encajante se han podido diferenciar tres unidades geometalúrgicas características.

La mena de Marmato se caracteriza por la presencia de filones de cuarzo con altos contenidos de pirita y esfalerita con cantidades menores de galena, calcopirita y pirrotina, y cantidades apreciables de carbonatos. El oro está asociado a pirita, principalmente, y a esfalerita o galena, en menor proporción. La roca hospedante está parcialmente alterada a carbonatos (alteración propilítica), lo cual aporta minerales que pueden contribuir a la neutralización del drenaje ácido.

Las minas localizadas al norte del municipio de Supía tienen la característica descrita y pueden considerarse una unidad geometalúrgica de baja refractariedad.

Otra mena de interés es la de Riosucio y Quinchía, caracterizada por un contenido alto de pirita cristalina de grano menor de 1 mm, diseminada en una roca totalmente alterada a minerales de arcilla, caolinita-illita-esmectita (alteración argílica). En este caso, la roca se encuentra mineralizada en su totalidad; el oro y los sulfuros se concentran en fracturas menores formando venas y vetillas en amplias zonas de falla, cizalla o brecha. Generalmente, el oro es de tamaño fino y hay presencia de minerales de plata.

Las minas de Riosucio y Quinchía, localizadas al sur del municipio de Supía, tienen la característica descrita y pueden considerarse una unidad geometalúrgica de intermedia refractariedad.

Una mineralización atípica, comparada con las dos anteriores, se presenta en Miraflores-Quinchía, donde aparece, en una zona de intensa fracturación, una mineralización de sulfuros diseminados en brechas hidrotermales y delgados filones, todos hospedados en rocas basálticas y pórfidos dacíticos y andesíticos. La mena se compone de pirita, principalmente, y cantidades menores de esfalerita. El oro se encuentra diseminado en la roca, asociado a pirita o esfalerita, y frecuentemente a telururos. La roca encajante está parcialmente carbonatizada (alteración argílica), y se considera favorable para el beneficio del oro. La refractariedad de la mena se considera relativamente baja, sin tener en cuenta las condiciones de liberabilidad del oro, que puede ser de tamaño muy fino, menor de 100 micras.

4.2.8. LIBERACIÓN DE SULFUROS

4.2.8.1. SECTOR DE MARMATO

La mena de la zona de Marmato está compuesta por pirita (22%), esfalerita (5.9%), arsenopirita (6%), calcopirita 0.2% y cantidades menores de arsenopirita y galena (Ga). La ganga se compone principalmente de cuarzo y carbonato, hasta un 71%. La pirita, que es el sulfuro predominante, se encuentra ligada con carbonatos y ganga de sílice microcristalina y sericita.

La ganga es predominantemente de carbonatos: calcita y siderita, y secundariamente está constituida por cuarzo microcristalino, sericita y clorita como caballo de estéril y alteración de la roca encajante. Los óxidos de hierro, como la hematita, son relativamente escasos.

Los sulfuros mixtos están representados por granos de Py/Ms, de acuerdo con su estrecha relación de oxidación, Py/Sp y Py/Gn están relacionadas genéticamente.

El grado de liberación de los sulfuros es incremental, partiendo de 425 micrones, donde se libera el 40%, hasta 212 micrones, en que se halla liberado el 82%, y a 150 micras el 98% de sulfuros se halla libre.

Figura 4.27: Mapa de ubicación de las UGM en la zona minera.
Fuente: Propia

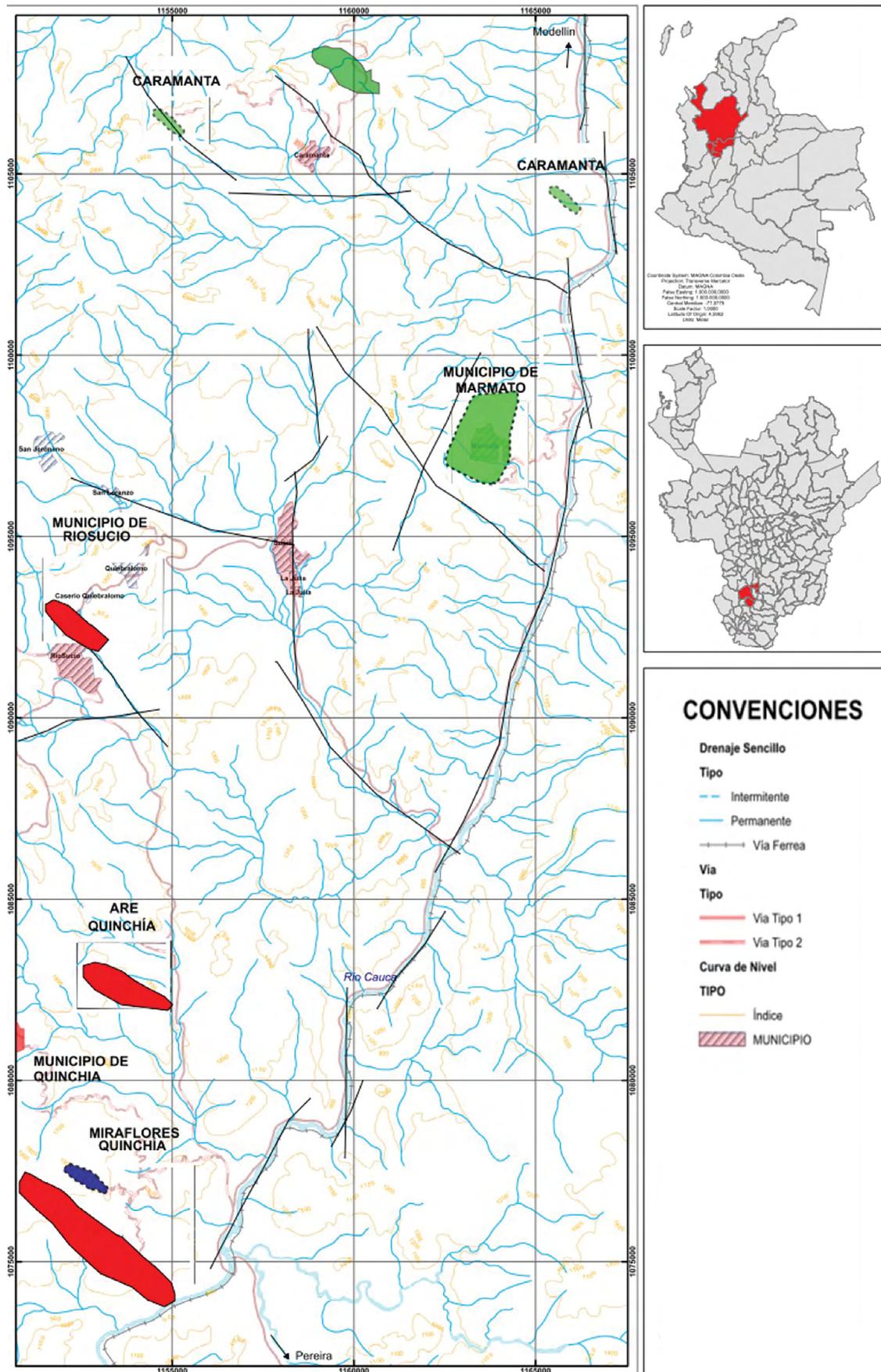


Figura 4.28: Mineralogía de la mena y ocurrencia de oro en la zona de Marmato.
Fuente: Propia

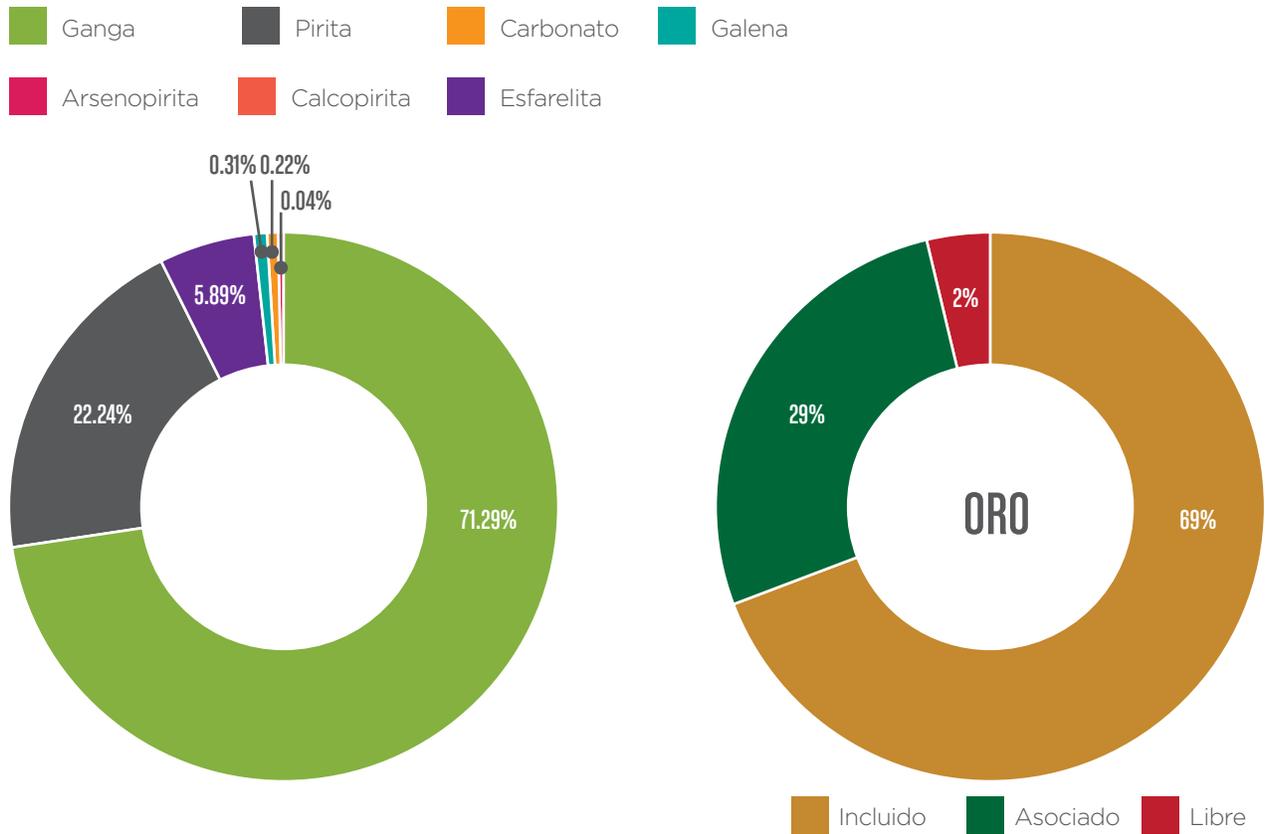
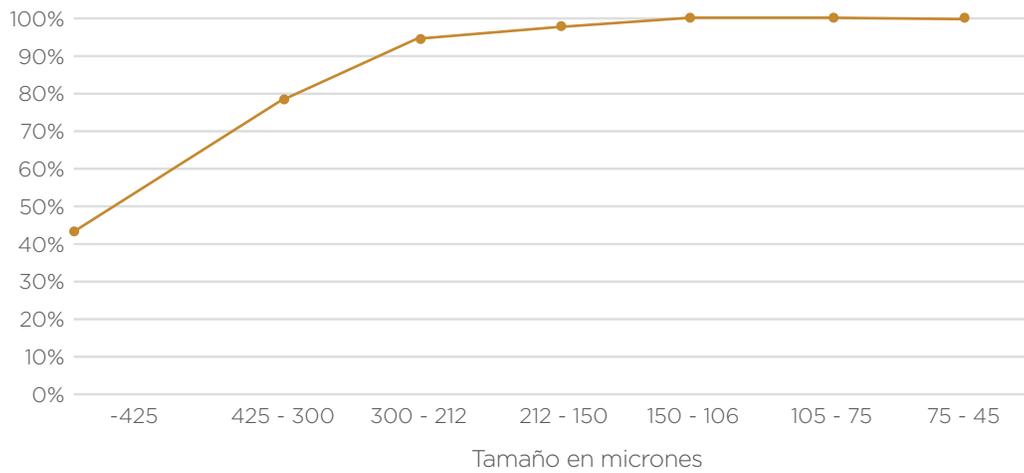


Figura 4.29: Liberación de sulfuros en mena.
Fuente: Propia.



4.2.8.2. SECTOR DE RIOSUCIO

El alto contenido de arcillas derivadas de la alteración profunda de feldspatos es un factor muy importante que debe tenerse en cuenta en el beneficio, puesto que en la mayoría de los casos la fracción de limo y arcilla, tanto caolinitica como illita y esmectita, puede representar el 50% del material explotado.

La composición mineralógica del material de cabeza no contempla el alto contenido de arcilla en la mena, sino únicamente los minerales de ganga de tamaño superior a 30 micras.

El contenido de sulfuros de la cabeza de la mina es aproximadamente del 50%, considerando que ya se han extraído en su mayoría los minerales de arcilla. La asociación de minerales indica que la pirita se encuentra asociada en un 15%, e incluida en ganga en un 10%. La pirita es el sulfuro que se encuentra asociado o incluido en ganga y, en menor proporción, arsenopirita. Cerca de la mitad de los sulfuros se encuentran libres, y la porción mayoritaria corresponde a pirita (23.5%).

La liberación de sulfuros se halla limitada por el tamaño natural de estos, que consiste en cristalización primaria de pirita cúbica de tamaño menor de 100 micras, incluidos en fragmentos de roca alterada. La mayor liberación alcanza el 95% por debajo de 150 micras, hasta un máximo de 99% a tamaño menor de 50 micras.

En el sector de Riosucio se observa que en el concentrado del material de cabeza se encuentra una buena proporción de oro libre (82%), siendo este de tamaño fino en su mayoría, con tamaño por debajo de los 70 μm , aunque se observa que una buena proporción de los granos está entre 90 μm y 150 μm , y algunos aislados que alcanzan hasta los 230 μm , siendo viable la extracción por métodos gravimétricos convencionales, siempre y cuando la molienda sea efectiva. Por otro lado, aunque la presencia de plata es notable en este sector, su tamaño es menor de 40 micras.

Figura 4.30: Mineralogía de la mena y ocurrencia de oro en la zona de Riosucio.

Fuente: Propia

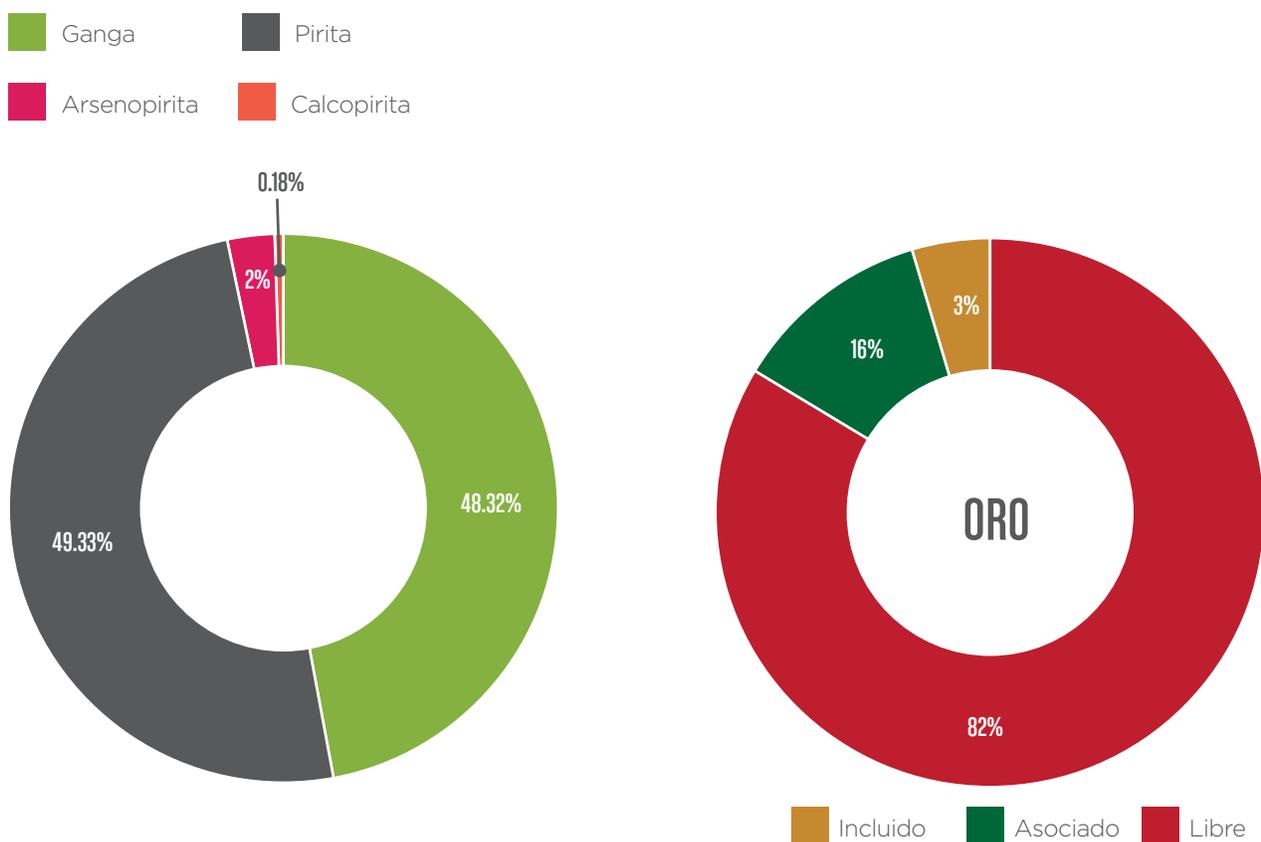
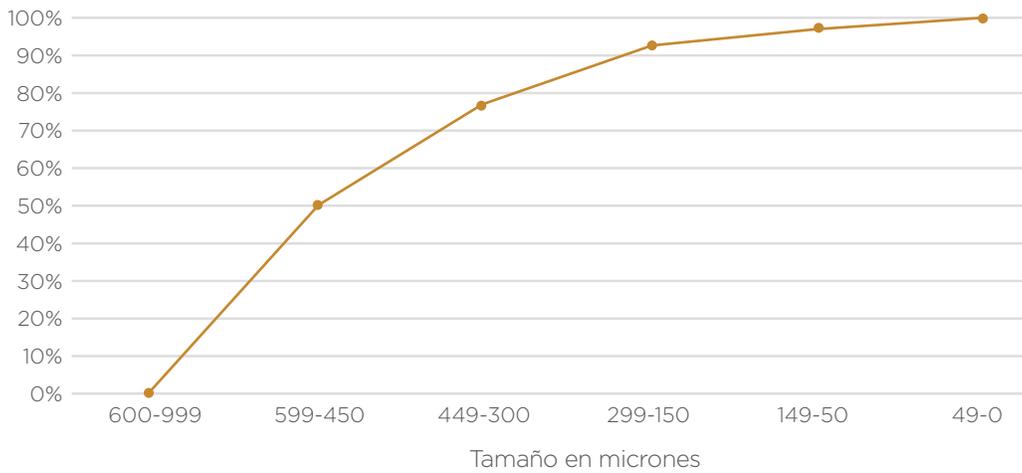


Figura 4.31: Liberación de sulfuros en mena.
Fuente: Propia.

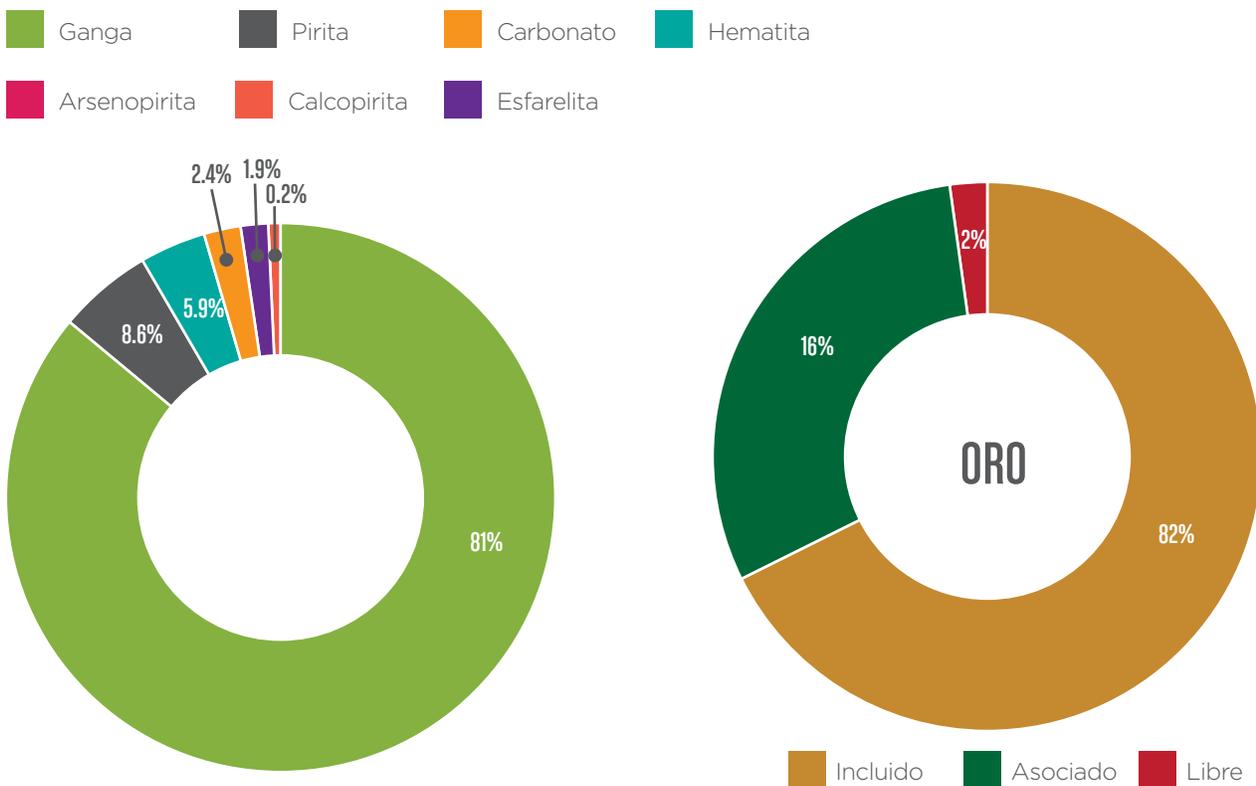


4.2.8.3. SECTOR DE QUINCHÍA

La composición mineralógica del material de cabeza de la mina Guayacanes corresponde en un 81% a ganga de cuarzo y feldespatos; le siguen pirita, con 8.9%, hematita (óxidos de hierro), con 5.9%, y cantidades menores de calcopirita y esfalerita.

Los sulfuros totales representan el 16%, de los cuales el 5.2% se encuentra libre, el 4.5% está asociado a ganga, y el 6.8% restante está incluido en ganga.

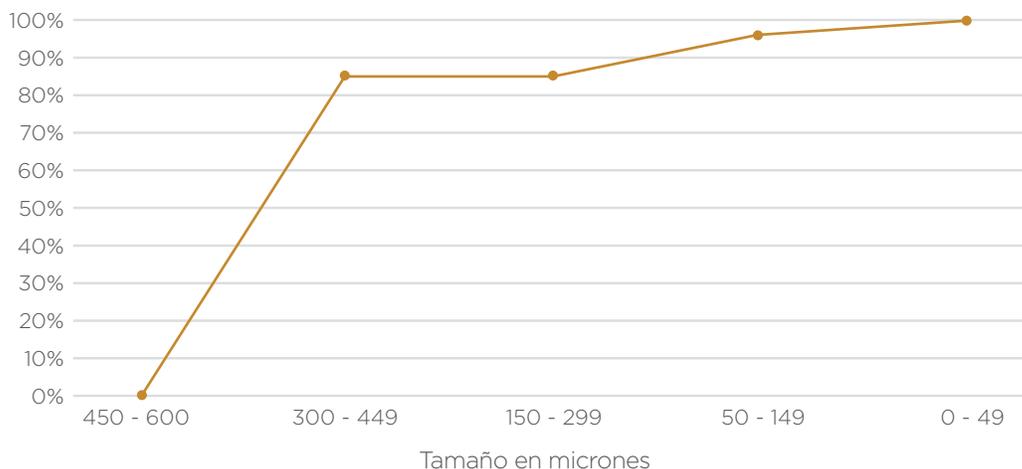
Figura 4.32: Mineralogía de la mena y ocurrencia de oro en la zona de Quinchía.
Fuente: Propia



La tasa de liberación se incrementa hasta el 86% a 300 micras. A partir de este rango la liberación decrece y alcanza el 96% a 50 micras.

El oro encontrado en material de cabeza de la mina presenta una dispersión en los tamaños de partícula, expresado en porcentaje en peso, donde se observan dos grupos con granulometría diferente: uno con granulometría menor de 70 µm, y otro por encima de los 100 µm, partículas que pueden alcanzar hasta los 320 µm. Esto es muy favorable para la recuperación gravimétrica convencional, aunque solo el 36% del oro se encuentra libre, y el restante se encuentra asociado (27%) o incluido (36%).

Figura 4.33: Liberación de sulfuros en mena.
Fuente: Propia.

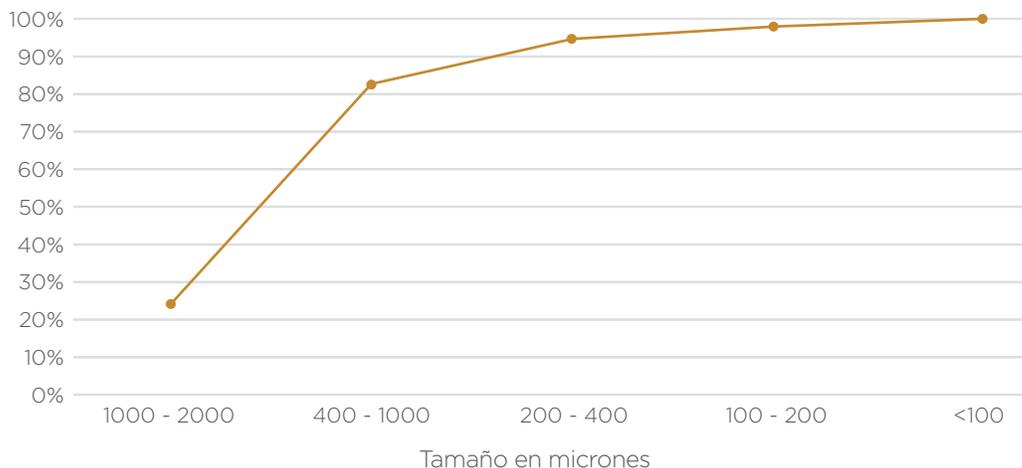


ÁREA DE RESERVA ESPECIAL (ARE)

El análisis de liberación de sulfuros se llevó a cabo mediante conteo de puntos con analizador de imágenes en sección delgada pulida de la cabeza de proceso tamizada a malla de 2 mm.

Los sulfuros representan una porción minoritaria: cerca del 5% de la distribución de la mena. Se encuentran prácticamente liberados en un 82% en el material previamente triturado; el 95% alcanzan 200 µm y el 98% 100 µm. En consecuencia, la liberación de sulfuros ocurre en procesos tempranos de molienda.

Figura 4.34: Liberación de sulfuros en mena área especial de reserva.
Fuente: Propia.





4.3. CONSIDERACIONES EN GEOLOGÍA Y MINERALOGÍA

· Las zonas auríferas estudiadas se encuentran localizadas en una zona de alto potencial aurífero. Las rocas pertenecen a una reconocida época metalogénica de evolución de la cordillera Occidental, que tuvo lugar durante el Neógeno, y corresponden a la subprovincia Cauca-Romeral.

· Existe un control estructural de todas las áreas mineras visitadas. La mayoría de los filones están orientados en dirección NW-SE y coinciden con sistemas de fractura NW-SE, resultante de la interacción de los sistemas de fallas Romeral y Cauca (Mistrató), las cuales se desplazan entre sí en sentido sinistral, promoviendo la generación de sistemas secundarios de fractura en sentido NW-SE, por donde finalmente ascienden los fluidos hidrotermales.

· Existen diferencias entre los estilos de mineralización aurífera de Marmato y Riosucio-Quinchía: mientras en Marmato hay filones de cuarzo ricos en sulfuros polimetálicos, en Riosucio y Quinchía la mineralización ocurre con pirita diseminada en rocas vulcanoclásticas y brechas tectónicas e hidrotermales.

· La mineralización en la zona aurífera de Marmato está caracterizada por la presencia de numerosos filones formados por relleno de espacios abiertos (fracturas) que presentan control estructural, con dirección preferencial NW-SE (dirección promedio N60W), abundancia de stockworks y texturas de relleno (bandeamiento): se encuentran encajados en rocas andesíticas y dacíticas definidas como stock de Marmato.

· La mineralización aurífera de Riosucio consiste en una amplia franja con dirección oeste-noroeste y noroeste de zonas de cizalla con tendencia sinistral, rellenas de venas y venillas de pirita y cuarzo, y dominante diseminación de pirita romboédrica y cúbica con menores y variables contenidos de arsenopirita, galena y ocasionales cristales de calcopirita, pirita framboidal y pirita arseniosa. Las rocas encajantes son tobas andesíticas, dacíticas y pórfidos andesíticos de la formación Combia.

· El depósito de Marmato es considerado de origen epitermal de baja a intermedia sulfuración, teniendo en cuenta la disposición de los filones, la mineralogía dominante y el análisis de inclusiones fluidas, que arrojó temperaturas de 315 y 320 °C y salinidad que varía entre 10 y 16 (Eq wt% NaCl). Esto significa una probable fuente magmática de fluidos.

· Oro asociado con pirita y esfalerita es ocurrencia típica en Marmato, mientras que en la zona de Riosucio y Quinchía generalmente se encuentra diseminado en la roca, y ocasionalmente asociado a pirita y calcopirita.

· En el distrito minero se presentan dos estilos de alteración hidrotermal: alteración propilítica con núcleos de alteración filica y alteración argílica; con alteración filica local en adyacentes a filones mineralizados. El primero se halla concentrado en la zona de Marmato y Caramanta, y el segundo, en los municipios de Riosucio y Quinchía.

· La gran actividad freatomagmática dio lugar a la formación de brechas hidrotermales aflorantes en inmediaciones de Quinchía (Miraflores). Las rocas presentan carbonatización, piritización y oro de grano grueso y fino.

· En Marmato, la formación de carbonatos por alteración de la roca huésped, así como la abundancia de sulfuros poco reactivos, permiten calificar la mena de Marmato como de baja refractariedad, mientras que en las minas de Riosucio y Quinchía, la abundancia de arcillas y el tamaño del oro diseminado en la roca dificultan el beneficio del oro con moderada a alta refractariedad.

· En Riosucio y Quinchía las rocas vulcanoclásticas exhiben una predominante alteración argílica derivada de la interacción con fluidos hidrotermales de vapor calentados a través de zonas de cizalla que depositaron sulfuros de hierro y metales preciosos diseminados en la roca y en delgadas venas y venillas.

· Se han definido tres unidades geometalúrgicas: la primera corresponde a una mena con alto contenido de sulfuros de gran tamaño, rica en carbonatos y cuarzo, con oro de tamaño relativamente grande y baja refractariedad, típica de las minas de Marmato. La segunda unidad corresponde a una mena compuesta esencialmente de minerales de arcilla (caolinita, esmectita y mica), con cantidades menores de pirita de grano fino diseminada en la roca; el oro de tamaño fino también se encuentra diseminado en la roca hospedante, con refractariedad intermedia y alta; a esta unidad pertenecen las minas de Riosucio y Quinchía. La tercera unidad corresponde a una mena de pirita y esfalerita, diseminada en brechas hidrotermales y delgadas filones hospedados en rocas basálticas y pórfidos andesíticos, con oro de tamaño relativamente fino. Su refractariedad puede considerarse de media a baja. A esta unidad están asociadas las minas de Miraflores.

En planta dos mesas de concentración son alimentadas al mismo tiempo por el producto del molino primario.
Fotografía tomada por: Harold Concha / Servicio Geológico Colombiano

5. ASPECTOS METALÚRGICOS

En este capítulo se muestran los diferentes aspectos metalúrgicos que se deben tener en cuenta, partiendo del conocimiento de las fases que comprende el proceso de beneficio y de los principales equipos que realizan las operaciones unitarias.

5.1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: PROCESO DE BENEFICIO METALÚRGICO

5.1.1. BENEFICIO DE MINERALES EN PLANTA

CONTROL MINERALÓGICO



Composición mineralógica, liberación de sulfuros y oro y tamaño de partículas.

Identificación de minerales livianos y pesados, tamaños de partículas y ocurrencia de oro.

Identificación de sulfuros. Proporción de minerales flotados, presentación de oro y ocurrencia de oro en colas de flotación.

Identificación de oro no cianurado y recubrimientos.

Determinación de oro en residuos sólidos. Formación de sulfatos y drenaje ácido (capa rosa). Minerales residuales en colas.

Figura 5.1: Diagrama de procesos general de beneficio en planta
Fuente: Propia

TRITURACIÓN Y MOLIENDA

Preparación del material previo a la extracción de oro. Reducción de tamaño y liberación de sulfuros.



Trituradora de quijadas



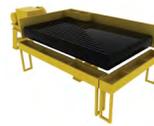
Trituradora de martillos



Molino de bolas

CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA

Diferenciación de partículas y concentración por gravedad y movimiento. Las colas están generalmente compuestas por material que puede contener partículas muy finas de minerales pesados, entre ellas partículas de oro minúsculo.



Mesa Wilfley



Concentrador de Impulsos (JIG)

FLOTACIÓN

Separación selectiva de partículas sólidas de una fase líquida, por medio de burbujas de aire.



Celdas de flotación



Reactivos

CIANURACIÓN

Proceso para separar las partículas de oro de los sulfuros asociados por medio de la lixiviación con cianuro.



Tanques agitadores



Separación sólido - líquido



Merrill Crowe

FUNDICIÓN



Crisol

RESIDUOS SÓLIDOS TRATAMIENTO DE AGUAS

Tratamiento de las soluciones resultantes de las operaciones unitarias, que deben ser clarificadas para su recirculación o desecho.

5.1.2. PROCESO DE CONMINUCIÓN (TRITURACIÓN Y MOLIENDA)

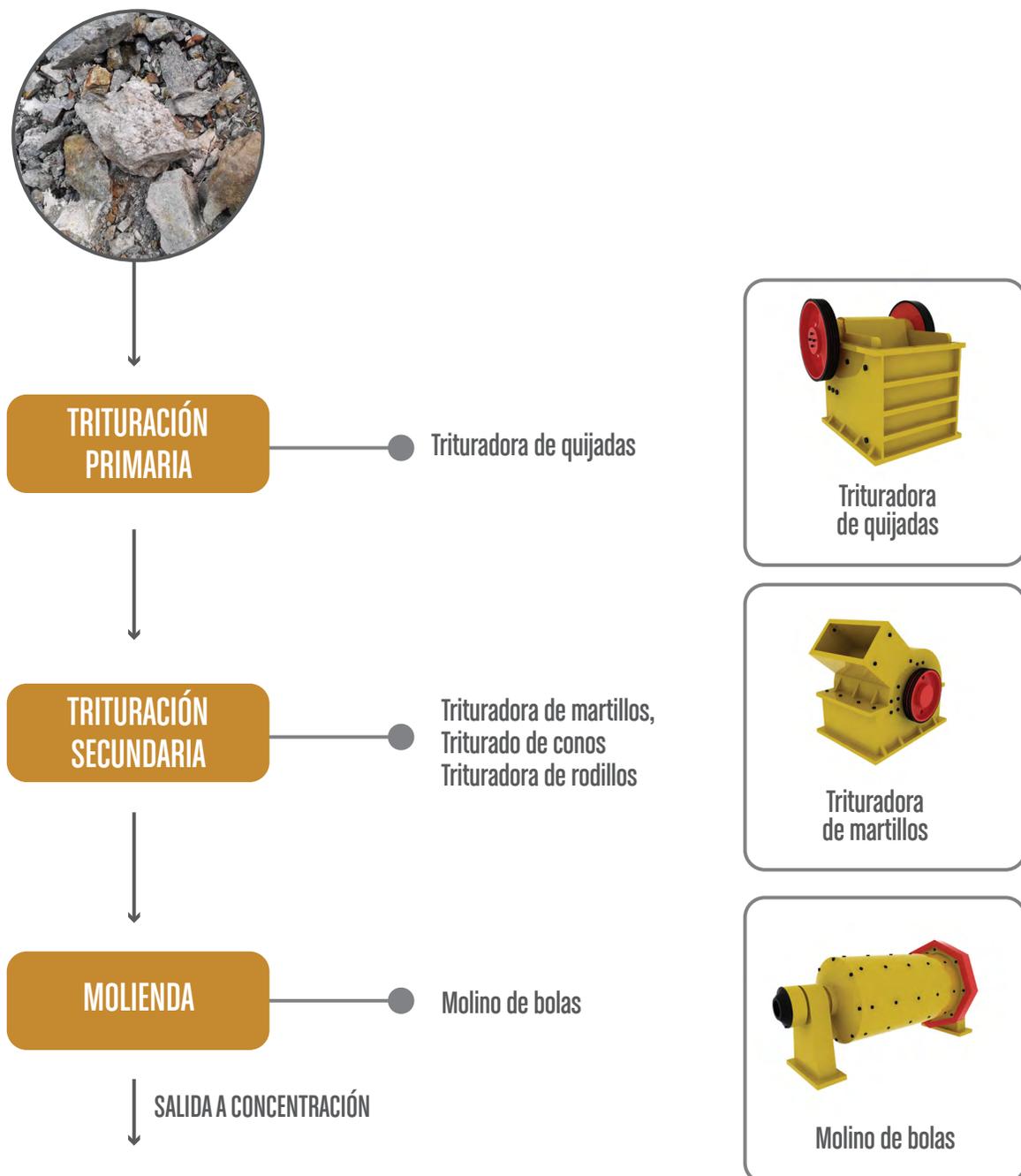
La conminución, o reducción de tamaño de un material, es una etapa importante, y normalmente la primera en el procesamiento de minerales. Los objetivos de la conminución pueden ser los siguientes:

- Producir partículas de tamaño y forma adecuadas para su utilización directa
- Liberar los materiales valiosos de la ganga de modo que ellos puedan ser concentrados
- Aumentar el área superficial disponible para reacción química

La reducción de tamaño de las rocas y minerales, hasta lograr su adaptación a las operaciones de molienda y concentración, se debe realizar por etapas para reducir los costos de energía (la reducción en una sola etapa incurre en mayores gastos energéticos y costos de operación, debido al mayor desgaste de los equipos).

Figura 5.2: Diagrama de proceso de conminución (Trituración y molienda)

Fuente: Propia



Se puede definir la trituración como el conjunto de operaciones cuyo objeto es reducir trozos de material de tamaños grandes a fragmentos, para facilitar las operaciones subsiguientes (transporte, etc.).

El fin principal es entregar a la molienda, en diferentes etapas, un tamaño de partícula lo más reducido posible. Los procesos en las máquinas trituradoras se dividen convencionalmente en trituración primaria (gruesa) y trituración secundaria (media y fina).

5.1.2.1. TRITURACIÓN PRIMARIA (GRUESA)

Para la trituración gruesa se emplean las trituradoras de quijadas y giratorias (cónicas). Los tamaños de alimentación pueden variar según el tamaño de la planta de beneficio. Así, para plantas que procesan más de 1000 t/h la dimensión de los trozos no debe ser mayor de 1500 mm. Fundamentalmente se tritura bajo la acción de las fuerzas de aplastamiento, penetración y frotación hasta obtener trozos con una dimensión aproximada de 300 a 100 mm, que son enviados a las siguientes etapas de trituración.

TRITURADORA DE QUIJADAS

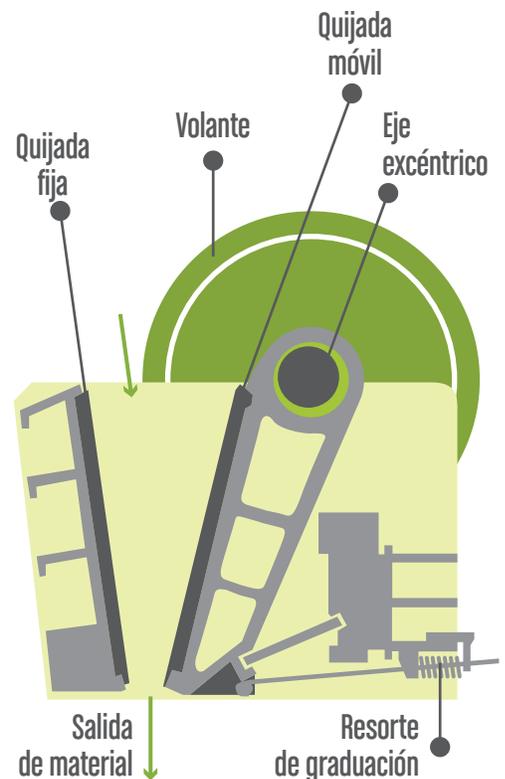
En la trituradora de quijadas el material se fracciona mediante compresión en combinación con la penetración, y por la flexión entre las quijadas fija y móvil. La quijada móvil se aproxima (durante la marcha de trabajo) o se aleja (durante la marcha en vacío) de la quijada fija, al rotar el árbol excéntrico. Durante la marcha de trabajo se efectúa la trituración, y durante la marcha en vacío, la descarga, por debajo del material triturado por la acción de su propio peso.

Fotografía 7: Modelo de trituradora de quijadas.
Fuente: Propia.



Figura 5.3: Diagrama de funcionamiento de la trituradora de quijadas.
Fuente: Propia

VARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE OPERACIÓN
· Ángulo de pellizco	· Ancho de abertura de la boca
· Diámetro mineral inicial	· Longitud de la boca
· Diámetro mineral final	· Altura de la pared delantera
· Índice de Bond (kWh/t)	· Capacidad (t/h)
· Coeficiente de variación de peso	· Velocidad (rpm)
· Densidad mineral	· Velocidad crítica (rpm)
· Eficiencia	· Velocidad óptima (rpm)
· Múltiplo de variación de longitud de boca.	· Potencia requerida (HP)



En Riosucio y Quinchía no se aplica la trituración secundaria. La presencia de arcillas impone un manejo cuidadoso por su gran poder de obstrucción de equipos de reducción de tamaño. De todos modos se debe tener en cuenta que el tamaño de partícula máximo que se considera adecuado para alimentar un molino de bolas no debe ser mayor de 10 milímetros.

Fotografía 8: Modelo de trituradora de martillos.
Fuente: Propia.

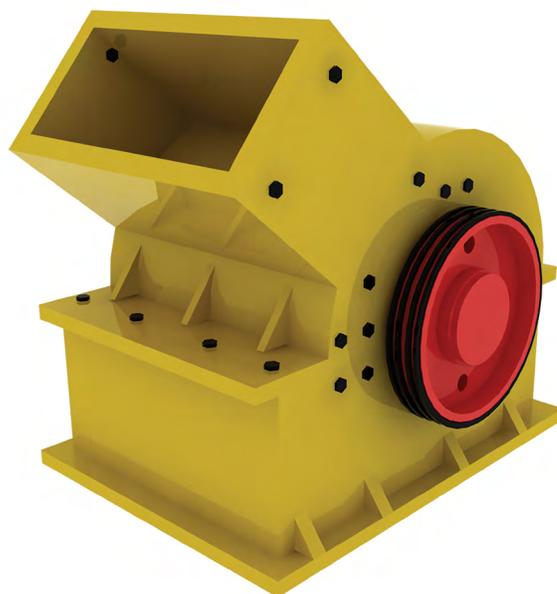
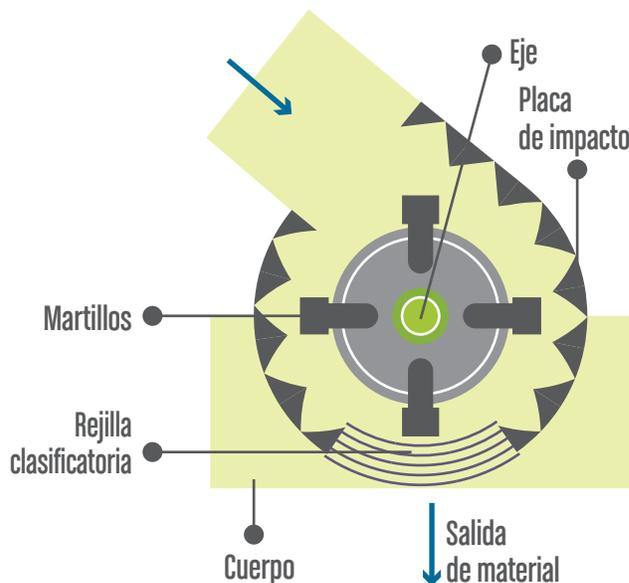


Figura 5.4: Diagrama de funcionamiento de impacto.
Fuente: Propia



5.1.2.2. TRITURACIÓN SECUNDARIA (FINA)

Después de la trituración gruesa, el material se somete con frecuencia a otra trituración, en las máquinas de trituración media y fina, en las que el proceso se realiza con el tamaño de salida de la trituración primaria hasta tamaños tan pequeños como de 10 mm. Para la trituración media y fina se utilizan principalmente trituradoras cónicas y de impacto (martillos).

TRITURADORA DE IMPACTO (MARTILLOS)

La trituradora de impacto es una máquina que aprovecha la energía de un impacto o golpe para romper el material. En general, estas máquinas proporcionan mejores curvas de rendimiento que las trituradoras de mandíbulas, así como un buen factor de forma. Sin embargo, con materiales arcillosos su rendimiento puede desmejorar.

La boca de entrada se sitúa en la parte superior, en un lateral, y a unos 45° con la vertical, y la boca de salida se encuentra en la parte inferior. Las placas de choque, de acero al manganeso se desgastan de forma desigual, por lo que se diseñan simétricas para invertirlas y aprovecharlas mejor. Suelen ser dentadas para facilitar la fractura del material.

MODELO	TAMAÑO DE ALIMENTACIÓN (mm)	TAMAÑO DE DESCARGA (mm)	CAPACIDAD (t/h)	POTENCIA DEL MOTOR (kw)	PESO (kg)
400 x 300	< 100	<10	5-10	11	800
600 x 400	<120	<15	10-25	18.5	1500
800 x 600	<120	<15	20-35	55	3100
1000 x 800	<200	<13	20-40	115	7900
1000 x 1000	<200	<15	30-80	132	8650
1300 x 1200	<250	<19	80-200	240	13600

5.1.2.3. MOLIENDA

Es la operación final del proceso de conminución. Consiste en reducir de tamaño partículas procedentes de la trituración media o fina (con dimensiones por debajo de los 20 mm) hasta un tamaño que se encuentra en el rango de 28 a 200 mallas Tyler en la molienda gruesa, y menores de 325 mallas para la molienda fina. La molienda gruesa se conoce en la práctica como convencional.

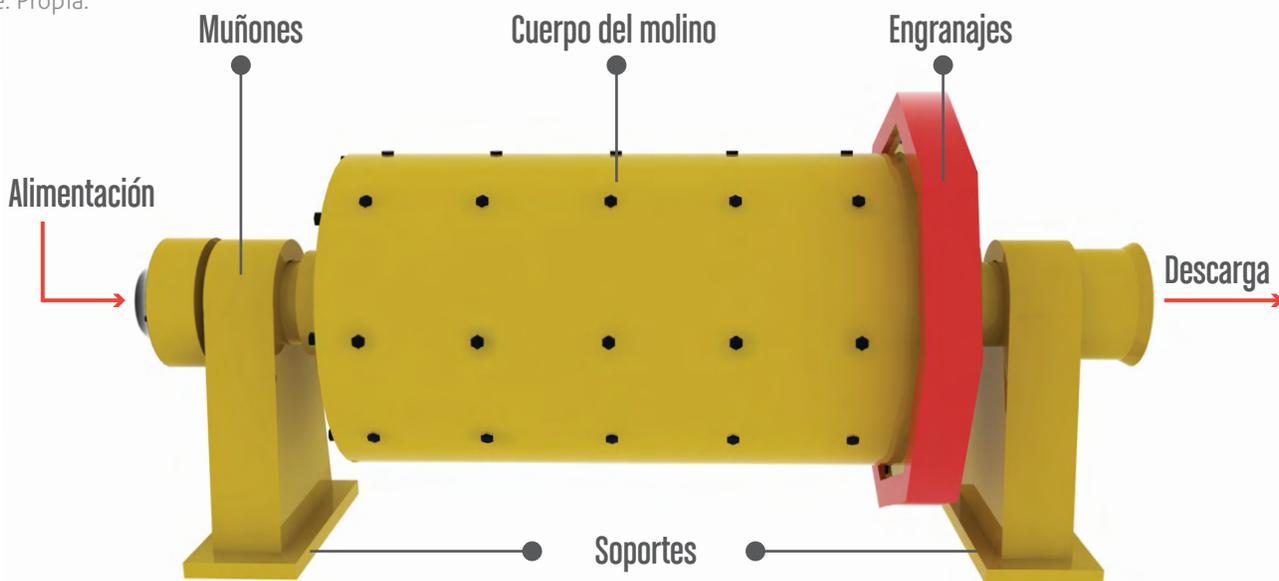
OBJETIVOS DE LA OPERACIÓN

Los objetivos dependen del destino que se le dé al producto. Si la molienda antecede a un proceso de concentración en un circuito de beneficio mineral, puede haber dos objetivos:

- Desprender el mineral útil de la ganga a un tamaño lo más grueso posible. Este es el caso de la concentración gravimétrica, en la cual se debe evitar la sobreproducción de finos (lamas).
- Obtener el tamaño apropiado para el proceso de concentración por flotación espumante o para los procesos hidrometalúrgicos en los que se requiere que el mineral útil esté expuesto en la superficie de cada partícula para que así puedan actuar sobre él los reactivos utilizados en los procesos antes mencionados.

Fotografía 9: Modelo de molinos de bolas.

Fuente: Propia.



MOLINO DE BOLAS

Los molinos rotatorios se componen de un tambor cargado aproximadamente en un 45% de su volumen con medios moledores (bolas de acero, barras y cilindros de acero o guijarros, etc.). Durante la rotación del tambor, los medios moledores son arrastrados conjuntamente por la superficie de las paredes bajo la acción de la fuerza centrífuga y la fuerza de rotación a una altura determinada, y luego se deslizan o caen libremente, y muelen el material por impacto, aplastamiento y fricción.

Las bolas (cuerpo moedor) están completamente sueltas, móviles y son relativamente grandes o pesadas si se comparan con las partículas de material que se va a moler. Los medios moledores (bolas) son arrastrados y levantados por la rotación del tambor en un ángulo tal que la fuerza de gravedad (su propio peso) supera a las fuerzas de cohesión y centrífuga de rotación del tambor. Estas, entonces caen en movimiento de cascada y catarata fracturando, así, las partículas por impactos y fricciones continuas y repetidas. Esto se logra cuando el molino gira por debajo de su velocidad crítica.

La velocidad crítica, es la velocidad en la cual la fuerza centrífuga por efecto del giro del molino, hace que los cuerpos moledores se mantengan adheridos a la pared del molino y no caigan antes de dar un giro completo.

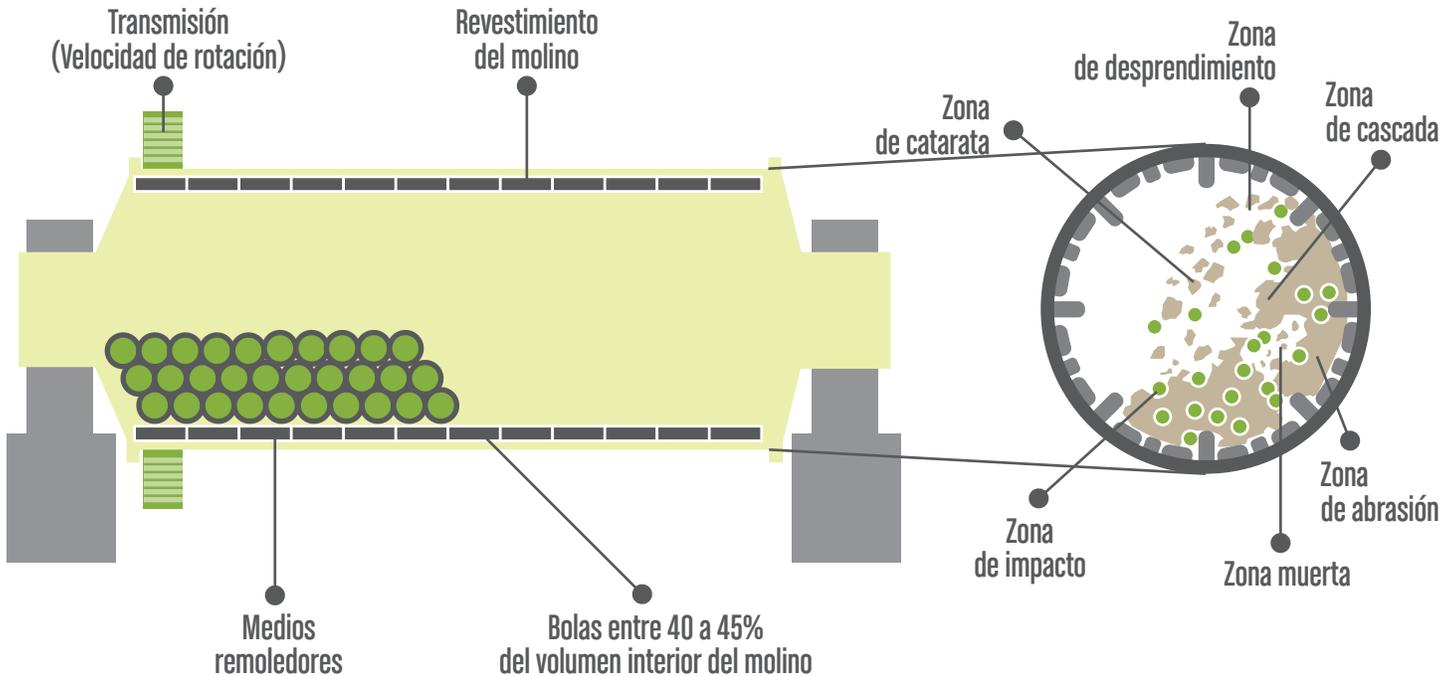
$$V_c = \frac{42,3}{\sqrt{D_m}}$$

V_c = Velocidad crítica del molino, rpm
 D_c = Diámetro interior del molino, m

se recomienda trabajar sobre un 70 % de la velocidad crítica

Figura 5.5: Diagrama de funcionamiento de un molino de bolas.

Fuente: Propia



MODELO	DIÁMETRO X LARGO (mm)	MOLINO (RPM)	MOTOR (HP)	CARGA DE BOLAS 45% (kg)	PESO (kg)	CAPACIDAD (t/día)
3 x 3	915 x 915	33	10	1265	4070	11.5
3 x 4	915 x 1220	33	15	1670	4480	15
3 x 5	915 x 1520	33	20	2080	4880	20
3 x 6	915 x 1830	33	20	2500	5288	24
4 x 4	1220 x 1220	29	25	2980	9620	32

Dados los costos de molienda y la necesidad de controlar el tamaño de las partículas, para una adecuada recuperación gravimétrica del oro es recomendable medir las eficiencias de los actuales molinos de bolas instalados.

Las arcillas arrastran cantidades considerables de oro. Para recuperarlo de las arcillas es recomendable someter este material a flotación.

VARIABLES DE ENTRADA

- Longitud del cilindro
- Diámetro del cilindro
- Nivel de llenado aparente
- Densidad de bolas
- Densidad de mineral
- Densidad del fluido
- Diámetro mineral inicial
- Diámetro mineral final
- Capacidad
- Porcentaje de sólidos
- Índice de Bond

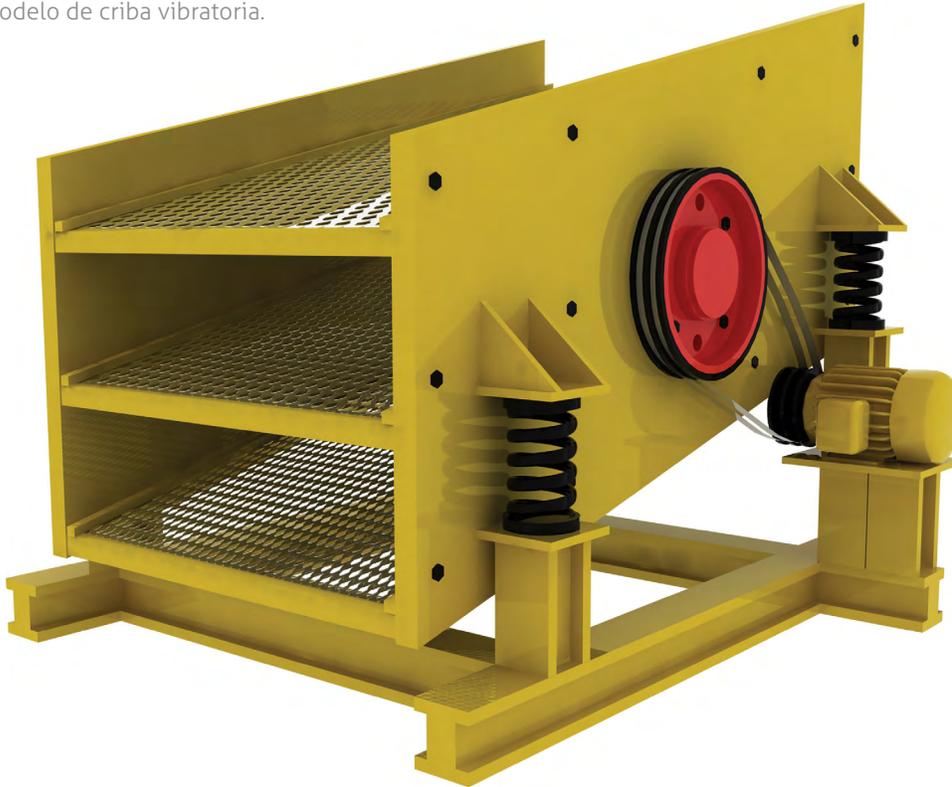
VARIABLES DE OPERACIÓN

- Relación largo - diámetro
- Densidad de pulpa
- Velocidad crítica
- Velocidad óptima
- Volumen del cilindro
- Volumen de carga interior
- Diámetro máximo de bolas
- Número de bolas con diámetro máximo
- Potencia neta
- Tiempo de residencia

5.1.3. CLASIFICACIÓN GRANULOMÉTRICA

El proceso de división de los sólidos a granel en clases, según el tamaño, mediante el cernido a través de uno o varios tamices, se denomina clasificación granulométrica. La clasificación granulométrica en la criba se efectúa con un movimiento relativo del material y la superficie de trabajo (tamiz). Como resultado se obtienen dos productos: partículas que pasan a través del tamiz (corriente b, llamada de bajo tamaño) y partículas que quedan en la parte superior del tamiz (corriente k, llamada de rechazo).

Fotografía 10: Modelo de criba vibratoria.
Fuente: Propia.



La función de la criba es dividir la corriente de alimentación en fracciones por tamaño, independientemente de su composición química o mineralógica.

VARIABLES QUE AFECTAN LA OPERACIÓN

El que una partícula determinada de la alimentación vaya al rechazo k o al bajo tamaño b depende de la posibilidad que tenga para pasar a través de la abertura del tamiz.

Las partículas sobre la superficie de trabajo se estorban unas con otras, y por ello puede ocurrir que algunas no lleguen a descender hasta la superficie. La posibilidad de que una partícula pase a través de un orificio, una vez llegue a la superficie, depende de tres factores:

- De las dimensiones de las partículas y del orificio del tamiz
- De la forma de alimentación y la posición de llegada a la superficie
- De la inclinación de la superficie

Las cribas son útiles principalmente durante las etapas de trituración. En tamaños de orificio inferiores a 1/16 de pulgada, pierden su eficiencia debido a taponamiento.

5.1.4. CLASIFICACIÓN HIDRÁULICA

Esta operación de clasificación se caracteriza por el uso de agua adicional a la de la pulpa de alimentación, introducida de manera que la dirección de su flujo se oponga a la dirección de las partículas que se están realimentando.

En la minería de oro se suelen emplear genéricamente dos tipos de clasificadores hidráulicos: los clasificadores hidráulicos de corriente horizontal accionados mecánicamente y los hidrociclones.

Fotografía 11: Modelo de hidrociclón.
Fuente: Propia.



HIDROCICLÓN

El hidrociclón es un equipo que se emplea, entre otras cosas, para la clasificación de partículas de relativamente bajo tamaño (entre 300 y 5 micrones, aproximadamente).

La palabra hidrociclón está formada por el prefijo hidro, que se refiere a una operación por vía húmeda (generalmente agua) y por ciclón, que se refiere a la formación interna de un vórtice hidráulico (cuando se opera con agua) o neumático (cuando se opera con aire).

Aunque el hidrociclón es un equipo bastante simple en su forma, su funcionamiento es muy complejo.

Partamos del hecho de que la pulpa entra a una alta velocidad tangencial, que forma un vórtice. Debido a este movimiento circular, las partículas se ven sometidas a dos fuerzas: la fuerza centrífuga, que lanza las partículas hacia las paredes del hidrociclón, y que es producto del movimiento curvilíneo, y la fuerza centrípeta, dirigida, como su nombre lo indica, al centro del equipo; esta fuerza es el resultado de un movimiento radial que se origina por un semivacío que se produce en el centro del hidrociclón.

Debido a la diferencia de presión entre el vórtice y su centro, se origina una fuerza para tratar de llenar el vacío. Ahora, si al vórtice formado por la pulpa se le introduce un tubo en la parte superior (buscador de vórtice), por este comienza a ascender dicha pulpa y a evacuar el hidrociclón. Por lo tanto, queda un equipo con una entrada tangencial y dos salidas: una superior que se denomina rebalse, y otra inferior, que se denomina descarga.

Entonces, como el buscador del vórtice está ubicado en el centro, por él va a evacuarse el material fino, mientras que por la descarga saldrán las partículas más gruesas de la distribución granulométrica que ha ingresado al equipo.

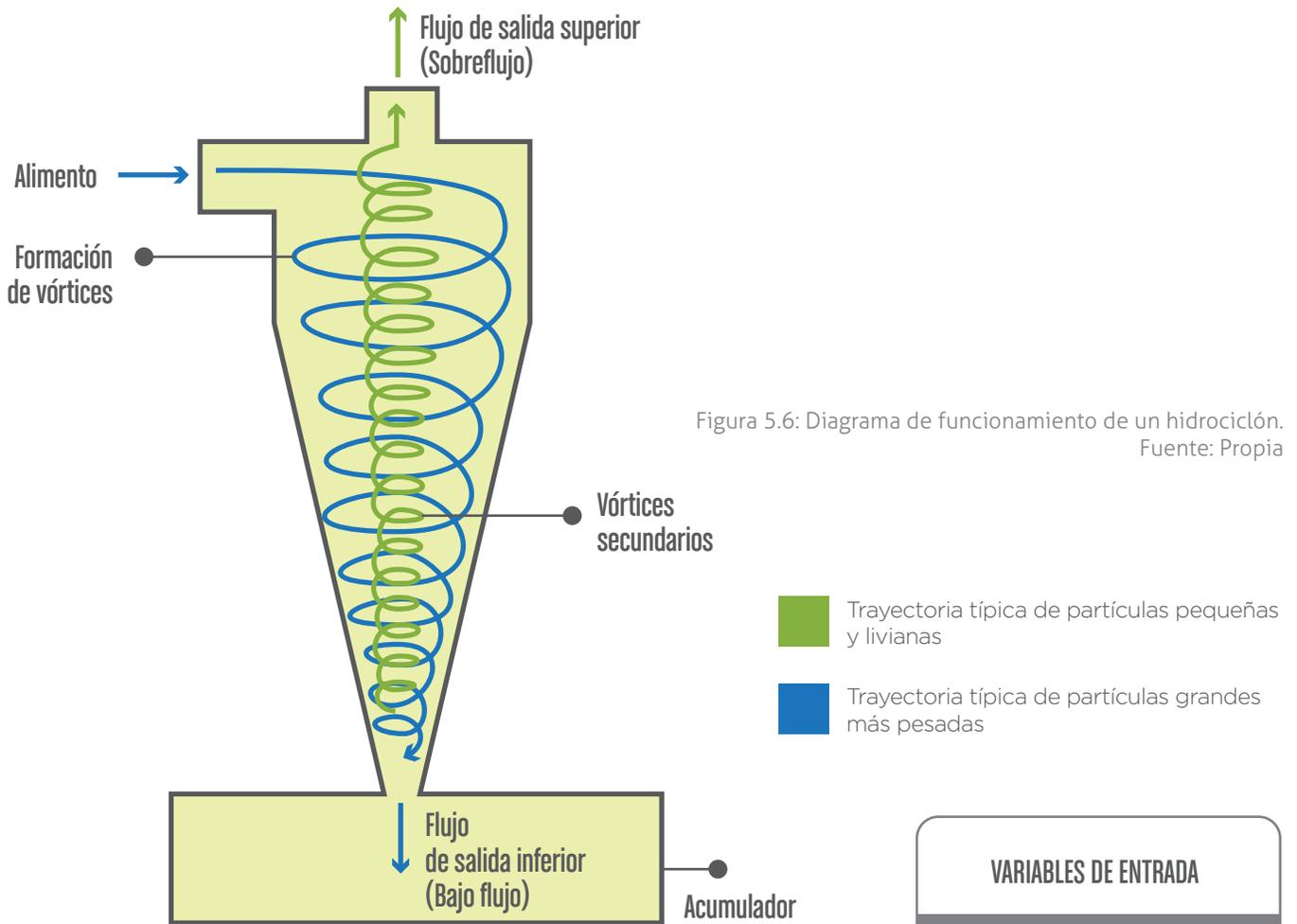


Figura 5.6: Diagrama de funcionamiento de un hidrociclón. Fuente: Propia

VARIABLES DE OPERACIÓN

- Peso de la pulpa
- Densidad de la pulpa
- Caudal de pulpa
- Diámetro cilíndrico
- Diámetro rebosadero
- Diámetro de alimentación
- Diámetro de descarga

VARIABLES DE ENTRADA

- Masa de sólidos en descarga
- Diámetro mineral rebosadero
- Densidad del sólido
- Densidad de fluido
- Porcentaje de sólidos
- Masa de sólidos por hora
- Caída de presión
- Porcentaje de rebose (Overflow)

PULGADAS	DIÁMETRO (mm)	ALTURA (mm)	PESO (kg)	VOLUMEN (m ³)	CAUDAL (m ³ /h)	PRESIÓN MÁX: (Kg/cm ²)
2"	8	792	20	0.063	11-17	8
3"	8	910	26	0.133	18-34	8
4"	16	1630	105	1.100	52-82	8
6"	20	2195	230	1.350	98-160	8

5.1.5. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR GRAVIMETRÍA

El objetivo principal de la concentración es el de enriquecer el mineral eliminando la ganga y minimizando la pérdida de mineral en cuanto sea posible.

El concepto de tenor es importante en el desarrollo de los objetivos que se pretenden alcanzar en la concentración de minerales. Podemos definir el tenor de un mineral como la relación que existe entre la cantidad másica o volumétrica de mineral de interés o útil (oro) respecto a la cantidad másica o volumétrica en la mena. Por tanto, el tenor se puede expresar en gramos de mineral útil por tonelada de material total (g/t, g/m³).

$$\text{TENOR} = \frac{\text{CANTIDAD DE MINERAL ÚTIL}}{\text{CANTIDAD DE MINERALES EXTRAÍDOS}}$$

Ahora, el objetivo de la concentración es elevar el tenor de una especie mineralógica de un metal u otro material en el concentrador, partiendo del tenor de alimentación.

En el caso ideal, el tenor del material útil en las colas debe ser nulo o cercano a cero. Como en todos los procesos no hay escenarios perfectos, este debe minimizarse en la medida de lo posible.

Elimina del circuito de planta minerales que no poseen riqueza alguna y que generan costos de manejo y tratamiento, como las gangas.

Elimina del circuito de planta minerales cuya presencia pueda presentar consecuencias negativas en el proceso de extracción metalúrgica.

En algunos casos el concentrado obtenido ya es un material con valor comercial o industrial, como los concentrados de oro de fácil recuperación.

IMPORTANCIA DEL PROCESO DE CONCENTRACIÓN

CONCENTRACIÓN GRAVITACIONAL O GRAVIMÉTRICA

La concentración gravimétrica puede definirse como la separación de dos o más especies de minerales con diferente peso específico (diferente densidad), causada por el movimiento relativo, bien sea en un medio acuoso o de aire, debido a la respuesta de los sólidos a las fuerzas gravitacionales, de arrastre y empuje.

Para que exista una buena separación debe tenerse en cuenta que no hay que alimentar las máquinas de concentración con distribuciones granulométricas muy amplias, es decir, en las que haya desde partículas muy finas a partículas muy gruesas.

Para una separación gravimétrica efectiva, debe existir una diferencia entre los valores de la densidad del mineral y la ganga. Calculando el criterio de concentración, se tendrá una idea de la viabilidad de la operación.

$$CC = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f}$$

ρ_h = Densidad del mineral pesado.
 ρ_f = Densidad del medio fluido.
 ρ_l = Densidad del mineral liviano.
 CC = Criterio de concentración.

VALOR DE CC =
 + 2.50
 1.75 - 2.50
 1.50 - 1.75
 1.25 - 1.50
 <1.25

SEPARACIÓN
 Fácil
 Posible
 Díficil
 Muy difícil
 No posible

MESAS DE CONCENTRACIÓN (MESA WILFLEY)

Este concentrador consiste en una mesa ligeramente inclinada, sobre la cual la alimentación con un porcentaje de casi un 25% en peso de sólidos se introduce en la caja de alimentación y se distribuye por medio del agua de lavado que se introduce a lo largo de la superficie por el lado de la alimentación. La mesa vibra longitudinalmente por medio del mecanismo, lo que produce un desplazamiento lento hacia la izquierda y un retorno rápido hacia la derecha. Esto hace que las partículas minerales se arrastren lentamente a lo largo de la cubierta paralela en dirección del movimiento más lento.

Las partículas se mueven diagonalmente a través de la cubierta desde el extremo de alimentación. Las más pequeñas y pesadas viajan con mayor velocidad hacia el punto de recolección, en el extremo distante, mientras que las partículas más ligeras y grandes son conducidas al lugar de recolección de colas. Se usan colectores con separadores ajustables para recibir el producto concentrado, medios (mezcla de concentrado y ganga) y colas (ganga liberada).

Fotografía 12: Modelo de mesa de concentración.
Fuente: Propia.

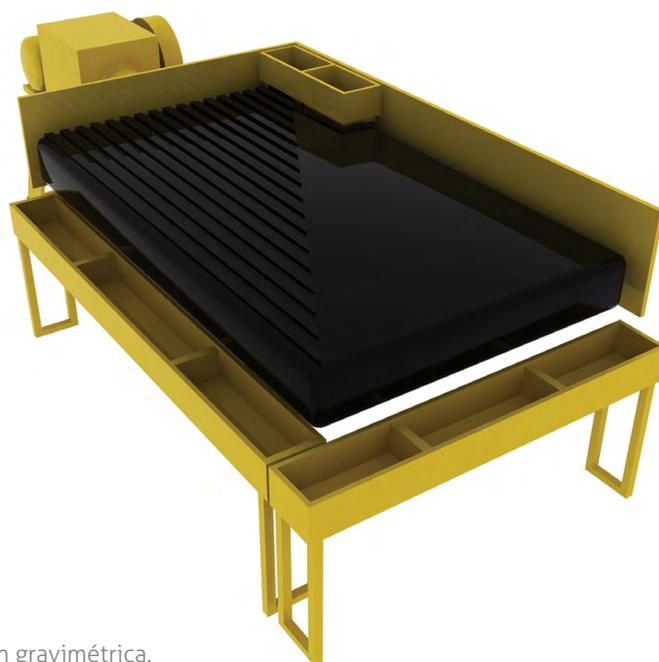
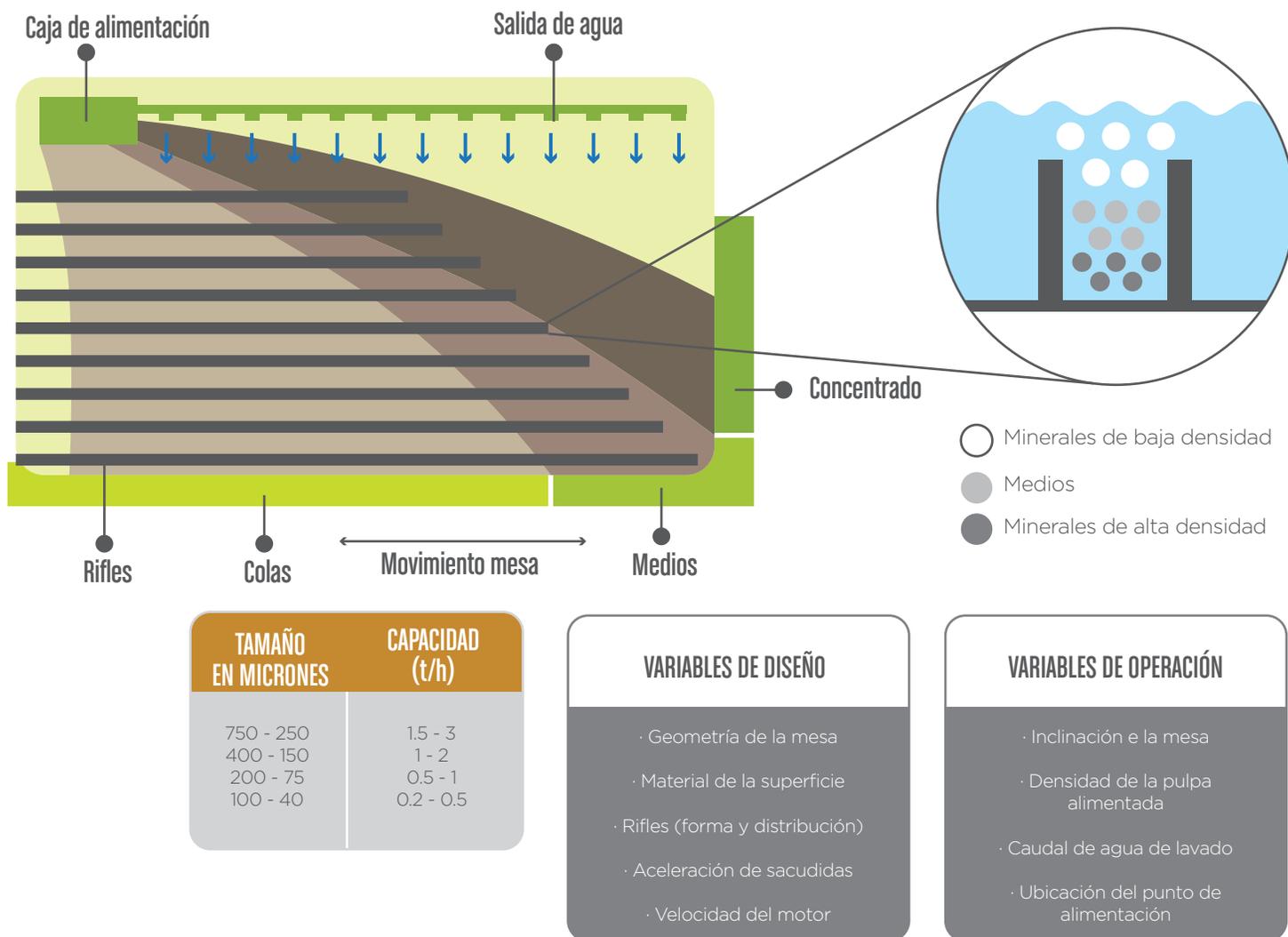
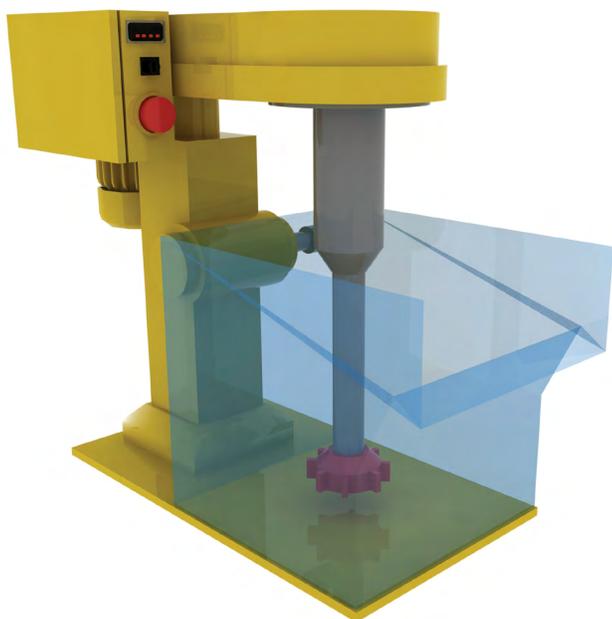


Figura 5.7: Diagrama de funcionamiento de una mesa de concentración gravimétrica.
Fuente: Propia



5.1.6. CONCENTRACIÓN DE MINERALES AURÍFEROS POR FLOTACIÓN

Fotografía 13: Modelo de celda de flotación para laboratorio.
Fuente: Propia.



Fotografía 14: Modelo de celda de flotación industrial.
Fuente: Propia.

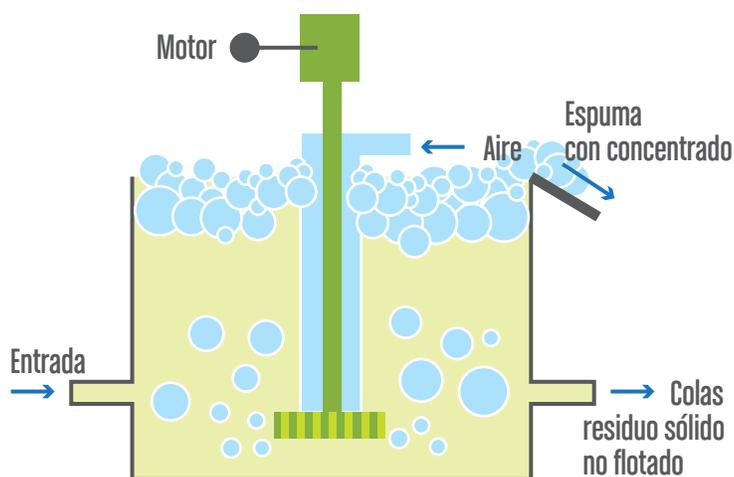


La flotación espumante se basa en la capacidad que tiene la superficie de un sólido de ser humectada o no por el agua.

Cuando dicho sólido se deja humectar, se dice que es hidrofílico (adsorbe agua en su superficie), mientras que si no se deja mojar, es hidrofóbico. Al introducir los hidrofóbicos en agua, sus superficies no formarán enlaces con los grupos polares; por ende, en presencia de una burbuja que asciende, este se adhiere y la acompaña a flotar en la superficie.

Para retirar este mineral es necesario agregar un reactivo químico (tensoactivo) que disminuye la tensión superficial del agua y permite el paso de las partículas. Este tensoactivo produce una fase de espuma que se puede retirar con una paleta, de forma manual o mecánicamente. Debido a que la gran mayoría de minerales son hidrófilos, es necesario agregar otro reactivo que se adsorba selectivamente sobre la superficie de las partículas de interés. Este reactivo se denomina agente colector, y es de enorme importancia en la operación.

Figura 5.8: Diagrama de funcionamiento de una celda de flotación.
Fuente: Propia



REACTIVOS DE FLOTACIÓN	DESCRIPCIÓN
Agente espumante	Tensoactivo para generar espuma. Generalmente se usa aceite de pino (0.1 libra por tonelada, aprox.).
Agente colector	Para el caso del oro, colectores afines al azufre, generalmente xantatos (0.1 libra por tonelada, aprox.).
Reguladores de pH	Se acostumbra tener un pH de 6 a 7.

VARIABLES DE ENTRADA

- Porcentaje de sólidos
- Densidad del sólido
- Densidad del fluido
- Cantidad de sólido por hora
- Cantidad de celdas

VARIABLES DE OPERACIÓN

- Densidad de la pulpa
- Caudal de pulpa por hora
- Volumen de trabajo en celdas
- Volumen de una sola celda
- Longitud de lado de la celda

5.1.7. CIANURACIÓN

El proceso de lixiviación de oro con cianuro es el principal método desarrollado para extraer el metal, y es utilizado en prácticamente todas las grandes operaciones mineras del mundo.

Las razones para su gran aceptación son tanto económicas como metalúrgicas. En general, con este método se recupera más metal que con el proceso de amalgamación, es más seguro y simple de operar que procesos con cloro o bromo.

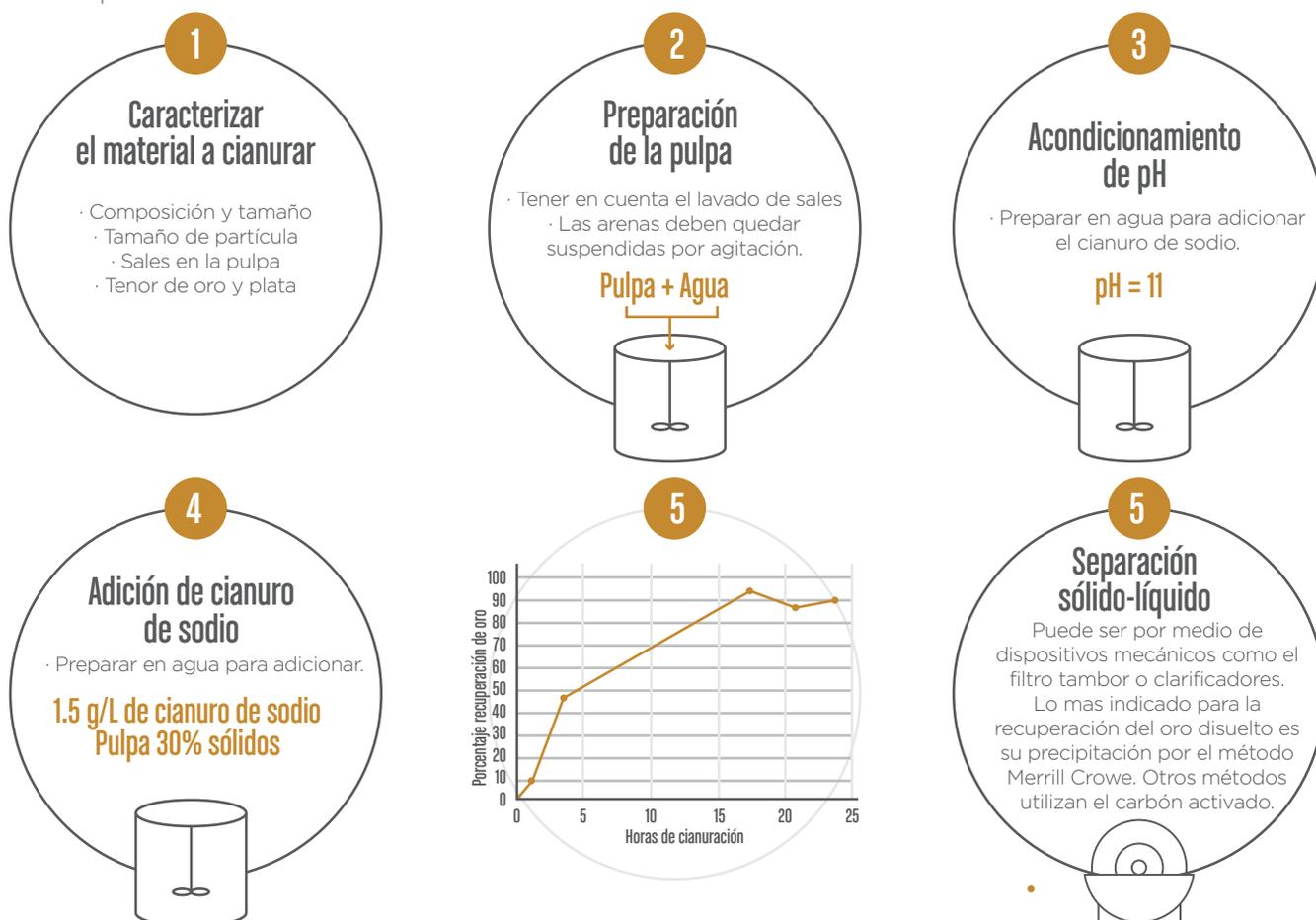
El proceso de cianuración se basa en el hecho de que las soluciones de cianuro de potasio o sodio tienen una disolución preferencial hacia las partículas de oro metálico que hacia otros materiales.

La siguiente ecuación engloba la reacción de la cianuración y el compuesto que se analiza:



Figura 5.9: Diagrama de pasos a tener en cuenta para realizar el proceso de cianuración.

Fuente: Propia



La cianuración es fuertemente afectada por el pH de la solución. Es esencial que la solución de cianuro se mantenga alcalina (altos pH) durante la lixiviación del oro, por las siguientes razones:

- Para prevenir la hidrólisis del ion cianuro
- Para prevenir la descomposición del cianuro por el CO_2 presente en el medio ambiente
- Para neutralizar compuestos ácidos de las menas, tales como sales ferrosas y sulfato de magnesio en las aguas

En Quinchía la eficiencia de la cianuración se ve afectada por la presencia de arcilla y por el tamaño de una proporción considerable de oro. Aquí es necesario tener el material que se va a cianurar exento de arcillas y con un tamaño de partícula menor de 15 micrones. Dadas estas condiciones, se recomienda que la cianuración vaya un concentrado de flotación remolido.

de las plantas antes de ser agregadas al circuito de cianuración

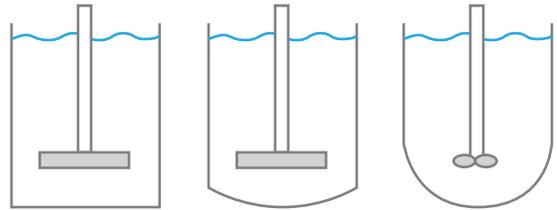
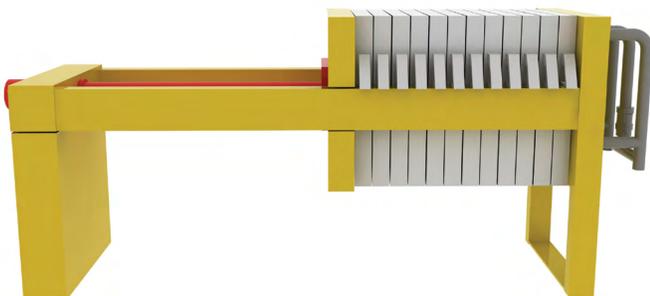
- Para descomponer el bicarbonato en las aguas de las plantas antes de usarse en la cianuración
- Para ayudar a la sedimentación de partículas, de tal manera que se pueda obtener una solución clara durante la separación de la mena cianurada

Fotografía 15: Modelo de tanque agitador.
Fuente: Propia.



Hay otros métodos para separar la solución rica de las arenas al finalizar la cianuración. El espesador es un sedimentador que entrega solución clarificada por rebose y una pulpa sedimentada con una concentración de sólidos por peso que puede ser mayor del 80%. Esta pulpa puede impulsarse a un filtro prensa, filtro de tambor o llevarse a un tanque percolador para efectos de recuperar una solución rica y descomponer compuestos ambientalmente dañinos.

Fotografía 16: Modelo de filtro prensa.
Fuente: Propia.



VARIABLES DE ENTRADA

- Densidad del sólido (kg/m^3)
- Densidad del fluido (kg/m^3)
- Volumen de la solución (l)
- Velocidad del impulsor (rpm).
- Tipo de fondo del tanque:
plano, plato, esférico
- Tipo de impulsor:
Hélice paso cuadrado, 3 palas
Hélice paso de 2, 3 palas
Turbina, 6 palas planas
Turbina, 6 palas curvas
Turbina, 2 palas planas

VARIABLES DE OPERACIÓN

- Volumen del tanque (l)
- Diámetro del tanque (m)
- Longitud del tanque (m)
- Altura de solución (m)
- Diámetro del agitador (m)
- Ancho del agitador (m)
- Distancia fondo agitador (m)
- Diámetro de los 4 baffles (m)
- Potencia del impulsor (HP)

Para estos casos de cianuración en los que las arcillas y los lodos prevalecen y dificultan la separación por sedimentación y filtración, además de los efectos fisicoquímicos de las arcillas, puede ser efectiva la aplicación de la cianuración del carbón activado en lixiviación (CIL).

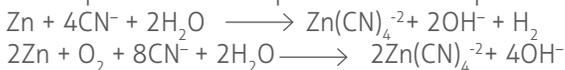
5.1.7.1. PRECIPITACIÓN POR EL PROCESO DE MERRILL CROWE

La cianuración industrial de un material aurífero produce una solución cuya concentración de oro está generalmente por encima de 2 miligramos de oro por litro (ppm), dependiendo del material lixiviado y del sistema utilizado.

Durante la precipitación de oro en zinc, la solución aurífera entra en contacto con el zinc y, espontáneamente, dado que el zinc es mucho más electropositivo que el oro, ocurre un intercambio por medio del cual el zinc metálico se va solubilizando en la solución, mientras el oro se va precipitando desde ella. Una expresión química que representa el modelo de precipitación de oro en zinc es la siguiente:

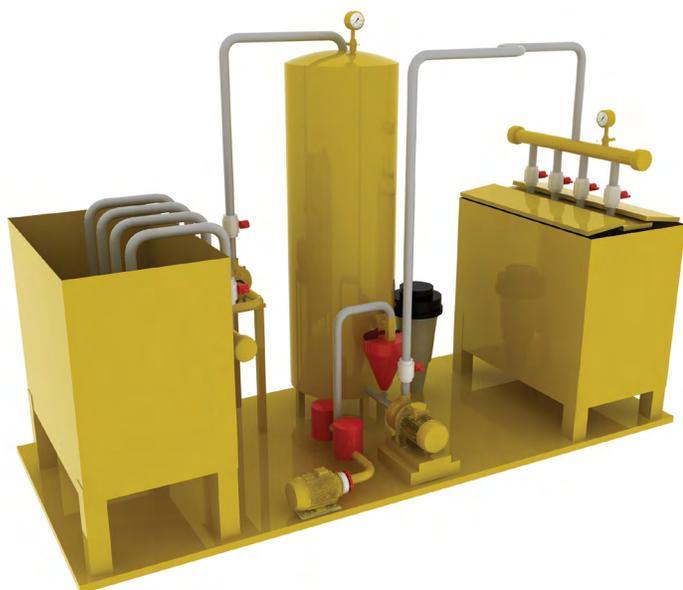


El zinc puede corroerse por mecanismos que involucren la reducción del agua y oxígeno:



Fotografía 17: Modelo de planta de Merrill Crowe.

Fuente: Propia.



En la práctica se debe adicionar zinc entre cinco y diez veces más que los requerimientos estequiométricos. Asimismo, la presencia de oxígeno disuelto puede provocar la redisolución del oro ya precipitado, por lo que se debe garantizar una condición de vacío para evitarlo. Esto es posible utilizando el sistema Merrill Crowe:



En las condiciones que se aplican típicamente en la industria se ha encontrado que la transferencia de masa es el paso determinante para el proceso de precipitación. Por ello es fundamental que el zinc presente una extensa y limpia superficie de reacción (se recomienda zinc en polvo).

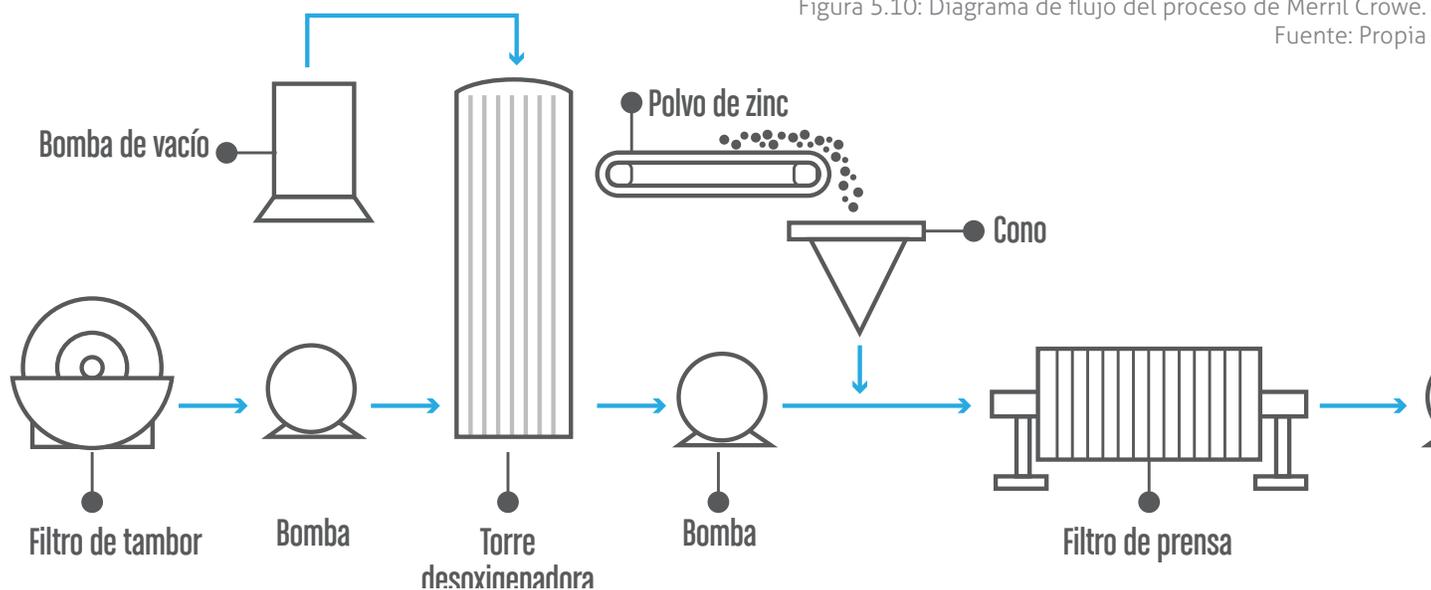
La presencia de material particulado fino suspendido en la solución, especialmente arcillas y silicatos coloidales, reduce la eficiencia de la precipitación, posiblemente por cubrir la superficie del zinc, por lo que se debe garantizar un perfecto filtrado de la solución rica.

Es muy conocido el efecto benéfico de los iones de plomo en la precipitación a baja temperatura, debido a sus efectos electroquímicos. Concentraciones de Pb^{2+} de 0.01 g/L ejercen un buen efecto en soluciones de 1 a 10 g/t de oro, y hay que tener cuidado de no estar por debajo de este valor. Excesos de 0.06 a 0.1 g/L de plomo divalente perjudican el proceso.

Otros iones metálicos divalentes, como Hg, Th, Bi, Cd y Cu, en concentraciones muy bajas, han mostrado efectos similares a los del plomo.

Figura 5.10: Diagrama de flujo del proceso de Merrill Crowe.

Fuente: Propia



5.1.8. FUNDICIÓN

El objetivo de esta operación es procesar los cementos (precipitados de cianuración) de metales preciosos para obtener barras (lingotes) comerciales de oro de alta pureza mediante la determinación de una carga de fundentes apropiada, aplicando las normas de seguridad necesarias.

Los principales métodos de tratamiento de los precipitados para alcanzar metales preciosos son los siguientes:

- **FUNDICIÓN DIRECTA**
- **FUNDICIÓN DESPUÉS DE CALCINACIÓN**
- **TRATAMIENTO ÁCIDO SEGUIDO DE FUNDICIÓN**

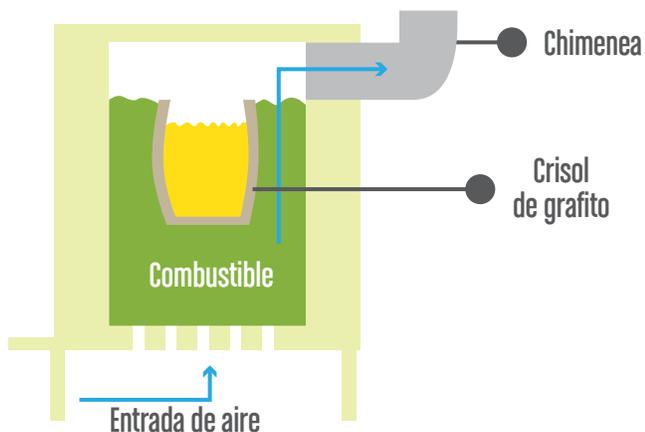
FUNDICIÓN DIRECTA

La fundición directa de precipitados de metales preciosos es una técnica rutinaria utilizada a gran escala. La desventaja de esta operación pirometalúrgica es que el zinc se volatiliza a alta temperatura ($> 1100\text{ }^{\circ}\text{C}$) y suele arrastrar consigo algo de oro, lo cual produce pérdidas que pueden variar del 1 al 5%.

Las cargas de fundición varían dependiendo de las características de los precipitados. Estas se logran partiendo de ensayos de laboratorio preliminares realizados a una muestra del precipitado, y se establecen las cantidades de los reactivos que se van a utilizar. Entre los más comunes se encuentran los siguientes:

- **Carbonato de sodio**
- **Bórax**
- **Sílice**
- **Nitrato de potasio**

Las respectivas cargas se homogeneizan, se llevan a crisoles de grafito y se recubren con una capa de bórax. Posteriormente los crisoles cargados se introducen en el horno para efectuar la fundición a una temperatura de $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante un tiempo que oscila entre una y dos horas. La carga se vacía en moldes previamente parafinados para finalmente, luego del enfriamiento, realizar la separación de la barra de oro de la escoria.



Fotografía 18: Modelo de horno con crisol.
Fuente: Propia.



Figura 5.11: Diagrama de funcionamiento de un horno con crisol
Fuente: Propia

RIESGOS	MEDIDAS DE SEGURIDAD
Inhalación de polvos de calcinas y fundentes.	Uso de mascarillas para polvo.
Quemaduras con herramientas calientes, moldes y salpicaduras con escoria fundida.	En general, se usan delantales y guantes de asbesto, botas y caretas.
Astillas de escoria sólida y pedazos fluidos de escoria.	Caretas y guantes de asbesto
Quemaduras con ácido	Debe usarse guantes de caucho, ropa a prueba de ácido, caretas y respiradores.

6. ASPECTOS QUÍMICO - AMBIENTALES

El estudio del beneficio de oro en esta zona minera pretende aportar elementos suficientes para encontrar una ruta metalúrgica adecuada basada en la mineralogía del material con contenido de oro. En este sentido, la química ambiental aplica las metodologías de caracterización química y las pruebas ambientales que permiten identificar potenciales impactos negativos sobre el medio ambiente y encontrar soluciones viables, para de esta manera aportar a su preservación y conservación.

En este marco, se hace énfasis en la caracterización química, el control de procesos metalúrgicos, la descomposición de soluciones residuales cianuradas y la determinación de toxicidad de relaves; además, se establece un marco de referencia para contribuir a evaluar el riesgo ambiental creado por la actividad minera en el área estudiada, para lo cual se hace énfasis en la contaminación por mercurio y cianuro.

Para la caracterización química y ambiental se recolectaron muestras de relaves y sedimentos activos de corriente (fase sólida y líquida) provenientes de plantas de beneficio y fuentes hídricas. Se realizó un muestreo de sedimentos activos en dos quebradas ubicadas en la zona de Riosucio, que hacen parte de la cuenca media del río Supía, con extensión en Caldas.

6. ASPECTOS QUÍMICO - AMBIENTALES

La implementación de metodologías analíticas y la utilización de la instrumentación en las diferentes líneas de la investigación en una planta de beneficio buscan día a día optimizar los procesos, usar tecnologías mejoradas y resolver los problemas que se presentan en el seguimiento de las operaciones con la aplicación de métodos simples, económicos y versátiles, que muestren resultados confiables.

Existen dos tipos de análisis: los cualitativos y los cuantitativos. Cada uno de ellos, ofrece unas ventajas instrumentales que permiten evaluar un estudio de interés geológico, los procesos metalúrgicos o la valoración ambiental.

6.1. CONTRIBUCIÓN Y CARACTERIZACIÓN QUÍMICA, CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS Y QUÍMICO AMBIENTALES

Con los análisis químicos de los materiales de mena, de planta de beneficio y de relaves es posible obtener la siguiente información:

Figura 6.1: Desarrollo de las etapas aplicadas en el control químico ambiental.

Fuente: Propia

CARACTERIZACIÓN QUÍMICA

Composición elemental del mineral.

Posibilidad de encontrar concentraciones altas en el material de minerales que pueden interferir en los procesos extractivos.

Deducir comportamientos en los procesos metalúrgicos.

Cuantificación de cianuro en muestras de proceso.

Aplicación de técnicas instrumentales de análisis: espectrofotometría de absorción atómica - llama y GH (Au, Ag, Fe, Cu, Pb y Hg), difracción de rayos X (composición de minerales), fluorescencia de rayos X (composición elemental), difracción láser (tamaño y distribución de partícula), potenciometría de ion selectivo CN⁻ total, volumetría CN⁻ y gravimetría (formas de S).

CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS

Determinar la concentración de oro en un proceso de cianuración.

Deducir el tiempo de cianuración y gastos de reactivos.

Efectividad de procesos de recuperación con zinc.

Reuso de solución con contenido de CN para otras cianuraciones.

Cuantificación de oro por espectrofotometría de absorción atómica- cinética de disolución de oro en cianuro de sodio (cianuración), ensayos al fuego y eficiencias de proceso de recuperación de oro con zinc (Merrill Crowe), púrpura de Cassius, potenciometría de ion selectivo CN⁻ total, volumetría CN⁻.

CONTROL QUÍMICO- AMBIENTAL

Determinar toxicidad de los relaves para mitigar procesos de contaminación por exposición al medio ambiente.

Descomposición de cianuros libre y total para realizar procesos extractivos sostenibles ambientalmente.

Aplicación de pruebas de toxicidad y contaminación como: TCLP (toxicity characteristics leaching procedure) y Tratamiento de descomposición de cianuro libre y complejo en muestras residuales de proceso de cianuración. (Descomposición con peróxido de sodio y sulfato ferroso).

6.2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS: MÉTODOS Y APLICACIONES QUÍMICO - AMBIENTALES

6.2.1 CONTAMINACIÓN POR MERCURIO EN MINERÍA

El mercurio (Hg), por ser líquido a temperatura ambiente y por tener una presión de vapor baja, tiene una movilidad significativa en el aire; el valor de solubilidad en agua, entre 0.02 mg/L y 25 °C, indica que es de mediana movilidad en agua, y el valor Log Kow de 5.95 muestra su alta afinidad con la biota animal. Además, el mercurio no solo es altamente bioacumulable, sino que forma parte de una cadena trófica; las especies mayores, como el hombre, pueden acumularlo y biomagnificarlo en su organismo.

El mercurio se presenta en la naturaleza en diferentes especies químicas: las de tipo elemental (Hg^0), las de tipo inorgánico (Hg^+ , Hg^{2+}) y las orgánicas. El metilmercurio (HgCH_3) y el dimetilmercurio ($\text{Hg}(\text{CH}_3)_2$) son las formas orgánicas más tóxicas: afectan el sistema inmunológico, alteran los sistemas genéticos y enzimáticos y dañan el sistema nervioso, incluyendo la coordinación y los sentidos del tacto, el gusto y la vista.

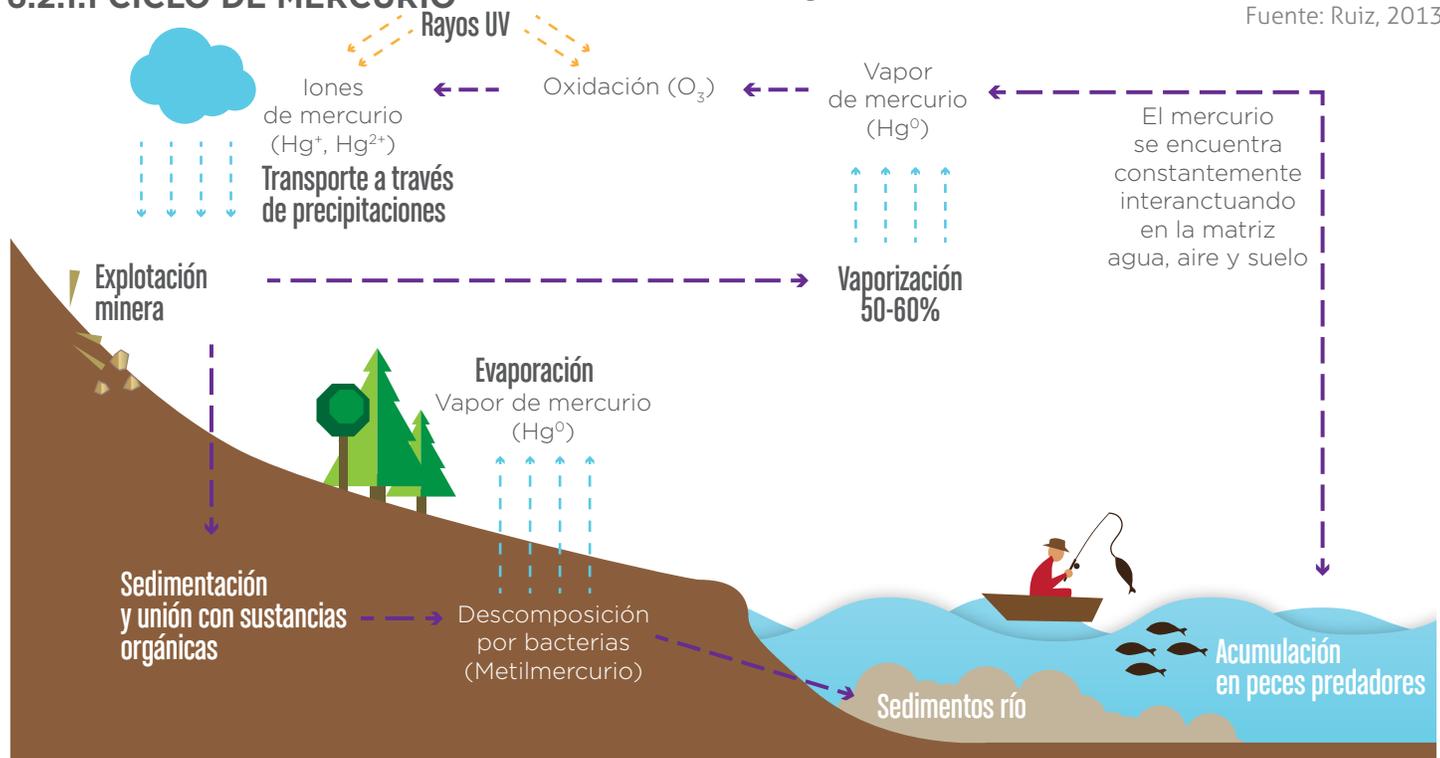
En el organismo humano, las principales manifestaciones de la intoxicación con mercurio son los daños del sistema nervioso, daños cerebrales, daño del ADN y de los cromosomas, reacciones alérgicas, cansancio, dolor de cabeza y defectos de nacimiento y abortos.

En estado cero, el mercurio es móvil en el ambiente, debido a que es ligeramente soluble en el agua (56 ug/L); por lo tanto, produce contaminación de las aguas subterráneas y de fuentes superficiales cuando hay disposición de colas de procesos de amalgamación. No todos los acuíferos resultan contaminados con concentraciones extremas de mercurio (Barringer et al., 2012). Sin embargo, un estudio determinó que en una mina de oro y plata, el mercurio de las colas del proceso se lixivió y contaminó las aguas subterráneas, donde alcanzó concentraciones de hasta 15 ug/L (Foucher et al., 2012). Otro riesgo es la práctica de cianuración de arenas previamente usadas en amalgamación, pues el cianuro forma con el mercurio complejos estables, solubles y difíciles de remover ($\text{Hg}(\text{CN})_2$ y $\text{Hg}(\text{CN})_4$). La lixiviación de complejos cianuro-mercurio (usualmente en forma Hg^{+2}) incrementa la concentración de mercurio en las aguas subterráneas (Coles y Cochrane, 2006).

6.2.1.1 CICLO DE MERCURIO

Figura 6.2: Ciclo dinámico del mercurio en el medio ambiente.

Fuente: Ruiz, 2013



La figura 6.2 muestra gráficamente el ciclo biogeoquímico del mercurio. Tal como se aprecia en ella, los compuestos orgánicos, especialmente el metilmercurio, pueden entrar en los organismos a partir de la biota acuática, en donde se bioacumula, y posteriormente concentrarse en la cadena alimenticia (Programa de las Naciones Unidas y Ministerio del Medio Ambiente, 2012).

6.2.2. USO DEL MERCURIO Y SU NORMATIVIDAD EN COLOMBIA

El marco jurídico colombiano que se relaciona con el proceso de minería de oro sigue la jerarquía normativa existente, presidida por la norma constitucional, en segundo lugar, por las leyes, y por último, por los reglamentos o decretos, emitidos no solo en el ámbito nacional, sino también en el regional y local.

Directamente sobre el manejo del mercurio, la Ley 1658 de 2013 desarrolla el marco legal “por medio de la cual se establecen disposiciones para la comercialización y el uso de mercurio en las diferentes actividades industriales del país, se fijan requisitos e incentivos para su reducción y eliminación y se dictan otras disposiciones”. Los ministerios de Minas y Energía, Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, Salud y Protección Social, Trabajo, Agricultura y Desarrollo Rural, Transporte y Comercio, Industria y Turismo, formularon el Plan Único Nacional de Mercurio (Ministerio de Medio Ambiente, 2014), y deberán realizar reglamentos técnicos sobre el tema.

La ley establece incentivos focalizados en el sector minero, con los que se busca eliminar el uso del mercurio. Cabe resaltar que los dueños de las plantas de beneficio de oro podrán solicitar créditos blandos al Banco Agrario y Finagro, u otra agencia del Estado especializada, para reducir y eliminar el uso del mercurio y/o para la reubicación o traslado de dichas plantas a zonas compatibles con los planes de ordenamiento territorial existentes. A los pequeños mineros auríferos se les ofrece créditos blandos para facilitarles las adquisiciones necesarias para efectuar la reconversión y para estimular el uso de nuevas tecnologías de extracción y beneficio del oro que no empleen mercurio.

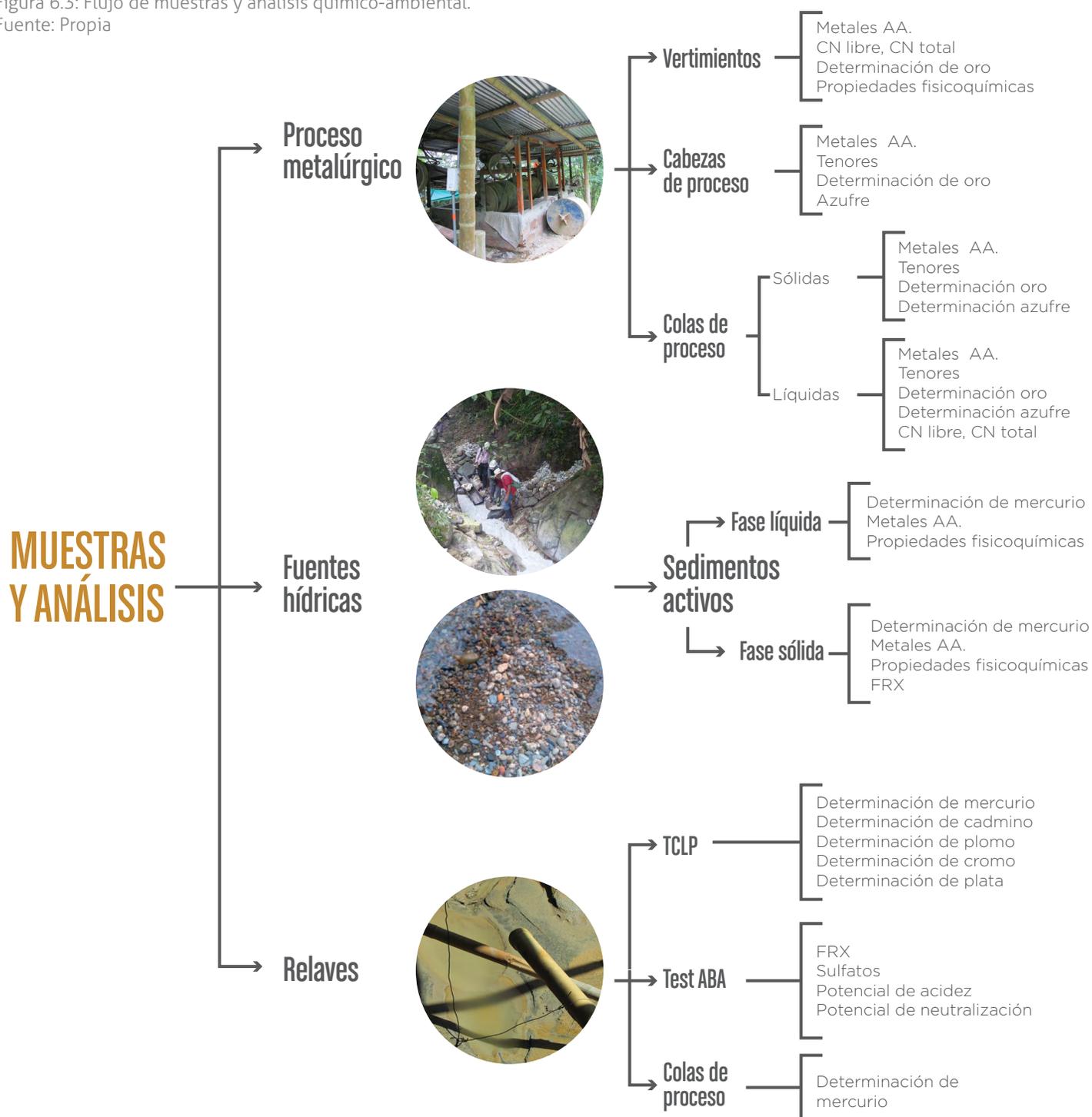
De igual manera, la Ley 1658 hace referencia a las denominadas “alternativas limpias”. En este punto, Colciencias fomentará la realización de investigaciones de tecnologías limpias para la reducción y eliminación del mercurio en los diferentes procesos destinados a obtener el metal precioso. Los ministerios de Minas y Energía; Comercio, Industria y Turismo; Educación y el SENA promoverán y desarrollarán, en el marco de sus competencias, la realización de programas de formación, capacitación, fortalecimiento empresarial y asistencia técnica para la inserción de tecnologías limpias en los procesos de beneficio de oro y demás procesos industriales y productivos asociados que requieren la utilización del mercurio (Congreso de la República, 2013).

6.2.3. CARACTERIZACIÓN QUÍMICA Y AMBIENTAL

En el estudio y caracterización geoquímica de los minerales para las zonas de interés ambiental y geometalúrgico se analizan muestras de sedimentos y rocas, representativas de las zonas influidas por la actividad minera. Con el propósito de hacer una investigación químico-ambiental fundamentada se aplican diferentes técnicas instrumentales y gravimétricas, entre las cuales se cuentan la espectrofotometría de absorción atómica —técnica de detección— llama (Au, Ag, Fe, Cu, Pb, Zn, Cr) y técnica de generación de hidruro para Hg, espectrometría de fluorescencia de rayos X (composición elemental para elementos mayores y menores), potenciometría de ion selectivo CN⁻ total, volumetría CN⁻. En el control químico de los procesos metalúrgicos se realizó cuantificación de oro para controlar la cinética de disolución de oro en cianuro de sodio (cianuración), ensayos al fuego, eficiencias de proceso de recuperación de oro con zinc (Merrill Crowe) y caracterización de relaves. El control químico ambiental se realiza aplicando las pruebas de toxicidad para un residuo sólido conocido como TCLP, sigla de toxicity characteristic leaching procedure. Para evaluar la posibilidad de generar drenaje ácido de mina se realizó el test ABA a los materiales sólidos residuales de las plantas de beneficio (relaves). Finalmente se evaluaron las fuentes hídricas aledañas a la zona, en las cuales se cuantificó mercurio en sedimentos activos (fase sólida y fase líquida), y también se analizaron vertimientos derivados del proceso de beneficio.

Figura 6.3: Flujo de muestras y análisis químico-ambiental.

Fuente: Propia



6.2.4. ANÁLISIS QUÍMICOS APLICADOS PARA LA CARACTERIZACIÓN Y CONTROL DE PROCESOS METALÚRGICOS Y AMBIENTALES

Para la caracterización química de un mineral se requiere la aplicación de metodologías analíticas dirigidas a cualificar y cuantificar los diferentes materiales, bien sean muestras geológicas, como material de veta en estado sólido, o muestras líquidas provenientes de los diferentes procesos metalúrgicos. De esta manera se apoya y se interactúa con la investigación en las áreas de metalurgia y mineralogía.

En este marco se ha incluido la evaluación de las operaciones y procesos aplicados en la zona para beneficiar y extraer el oro del material, con el propósito de aportar información y conocimiento para mejorar el aprovechamiento del recurso y para controlar el impacto ambiental que se genera en las plantas de beneficio. En particular, se busca proponer alternativas metalúrgicas para sustituir la amalgamación y evitar así el uso del mercurio, con lo cual se contribuye a la sostenibilidad ambiental del proceso.

6.2.4.1. ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Para realizar la determinación de metales (Fe, Cu, Pb, Zn, Ni, Mg, Mn, Mo, etc.) por absorción atómica de llama es necesario tener los analitos en solución, y libres de posibles interferentes, tales como materia orgánica o particulado. Para lograr estas condiciones, y con el objeto de reducir la interferencia por materia orgánica y liberar los metales de la matriz manteniéndolos en solución, es necesario el tratamiento previo de las muestras, y se debe realizar el procedimiento de preparación, digestión y preservación. Estos tratamientos se realizan según el tipo de matriz.

El mercurio también es medido con esta técnica, pero se realiza en ausencia de llama debido a su fácil volatilidad. Esta metodología se denomina absorción atómica-generación de hidruros (vapor frío).

La siguiente ecuación engloba la reacción de la cianuración y el compuesto que se analiza:



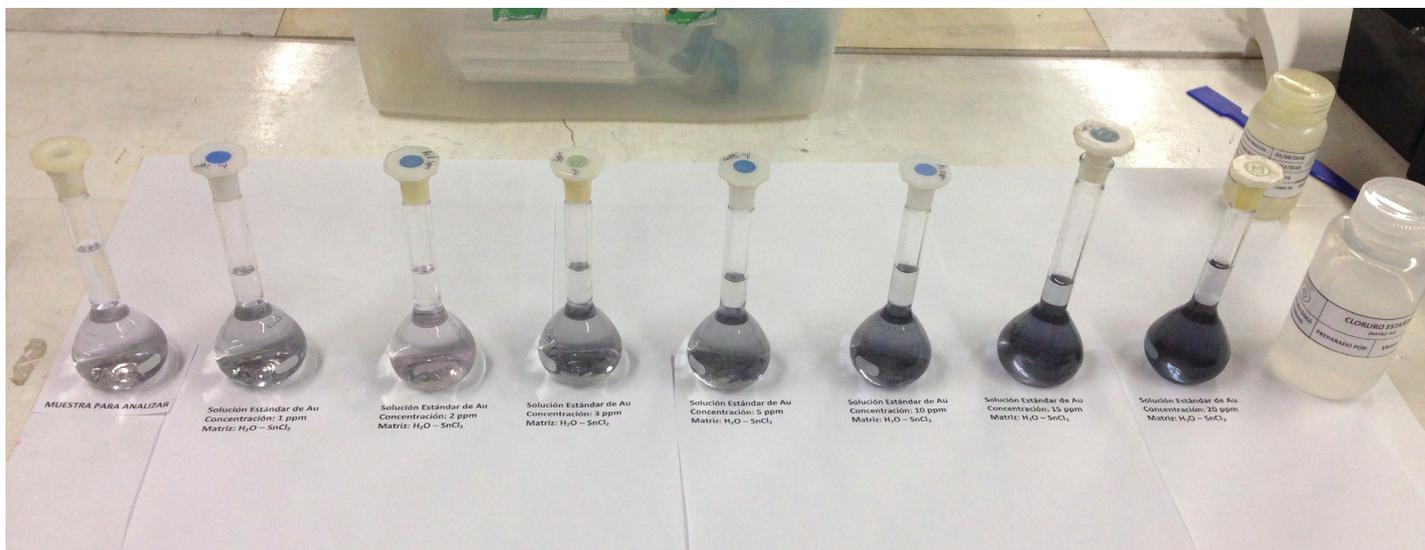
Estas técnicas se emplean específicamente de procesos de cianuración de oro, en los que se obtienen soluciones ricas en dicho metal y se hace necesario conocer sus concentraciones para efectos de control del proceso, como son las velocidades de disolución del oro, el consumo de cianuro, cal y oxígeno, en el control de recuperación de oro en procesos de precipitación con zinc, este análisis genera la información para evaluar en general la cinética de reacción, los porcentajes de recuperación y la efectividad de la lixiviación.

Generalmente, las muestras provienen de diversos orígenes, y las más frecuentes son las muestras de aguas, efluentes, rocas, suelos, etc. Como todas las matrices varían, son diferentes en su composición intrínseca y en su respuesta al tratamiento previo de adecuación a la medición por llama.

6.2.4.2. ESPECTROFOTOMETRÍA DE ULTRAVIOLETA VISIBLE

La determinación de oro por colorimetría es una alternativa de análisis instrumental aplicada cuando no se cuenta con espectrofotómetro de absorción atómica (AA). Este método es aplicable en trabajo de campo.

Para determinar microcantidades de oro en soluciones cianuradas se realiza la precipitación con zinc, con el objeto de eliminar interferencias. Esta precipitación se realiza con soluciones cianuradas que contengan una concentración de cianuro mayor que, o igual a 1 g/L, y que se encuentren a valores de pH mayores de 11 unidades. El precipitado formado se disuelve y se desarrolla el color usando el método de cloruro estañoso. Este reactivo permite cuantificar oro en soluciones usando la prueba del método púrpura de Cassius.



Fotografía 19: Curva de calibración para el análisis de oro por colorimetría, posterior a medición en el equipo UV Vis. Fuente: Propia.

6.2.4.3. POTENCIOMETRÍA DEL ION CIANURO

Para determinar la cantidad de cianuro que se encuentra presente en una solución de proceso, o solución final, para desecharla, es necesario aplicar metodologías instrumentales que combinan destilación y potenciometría.

Una de estas es la descomposición de cianuro total a libre, que se realiza mediante el método de electrodo de ion selectivo integrado a un analizador de cianuro. Se fundamenta en la destilación de la solución de cianuro mediante enfriamiento de aire; el ácido cianhídrico (HCN) producido durante la reacción es condensado y absorbido por burbujeo en una solución de hidróxido de sodio (NaOH 0,1 N) e inmediatamente es detectado y leído usando el electrodo de ion selectivo para cianuro. El análisis permite determinar cianuro total en cualquier tipo de soluciones, con un rango de detección que va desde 5 ppb a 260 ppm. Puede ser aplicado para análisis de aguas residuales, aguas procedentes de procesos metalúrgicos y actividad minera.

En la determinación de cianuro en una solución se tienen en cuenta las siguientes etapas: la primera consiste en una titulación de cianuro libre, luego la medición de cianuro total (equipo cianurometro o equipo de destilación) y finalmente la interpretación del resultado, como se observa en la figura 6.4.

Figura 6.4: Determinación de cianuro total en una solución residual.
Fuente: Propia



6.2.5. TRATAMIENTOS PARA DESCOMPOSICIÓN DE CIANURO: FORMAS LIBRE Y COMPLEJO

6.2.5.1. EL CIANURO Y SUS FORMAS

El cianuro de sodio es ampliamente utilizado en la extracción de oro. Cuando se encuentra en solución y es adicionado un material de mina, este reacciona con los metales presentes y puede presentar diferentes formas químicas con mayor o menor afinidad. El gráfico presenta las formas de cianuro y relaciona los métodos de descomposición aplicados en este documento guía para lograr el entendimiento de las especies formadas cuando se realiza una cianuración de oro.

Para realizar la determinación de cianuro total es importante primero conocer las posibles formas de cianuro que se encuentran en la soluciones residuales de procesos metalúrgicos. Presentadas en el siguiente numeral.

En caso de no contar con un cianurometro este puede ser reemplazado por un equipo de destilación y la determinación final se realiza por titulación de cianuro libre.

Valor máximo permitido:
CN⁻ TOTAL = 1 mg/L Resolución 0631
de 2015

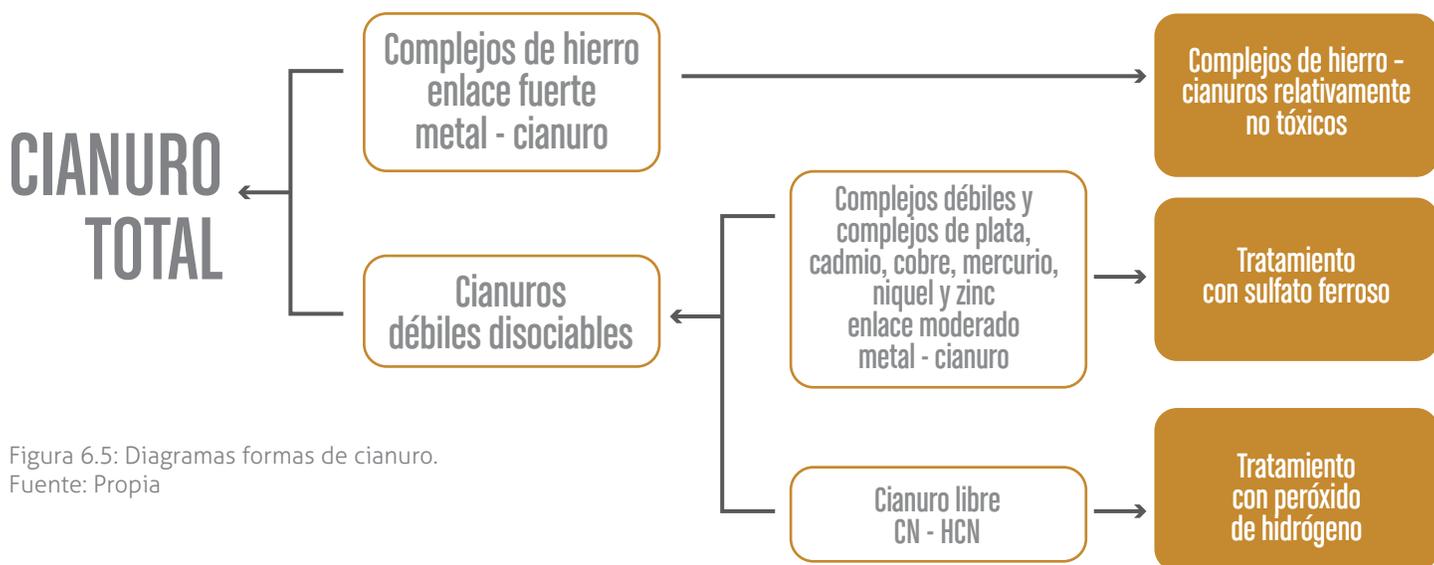


Figura 6.5: Diagramas formas de cianuro.
Fuente: Propia

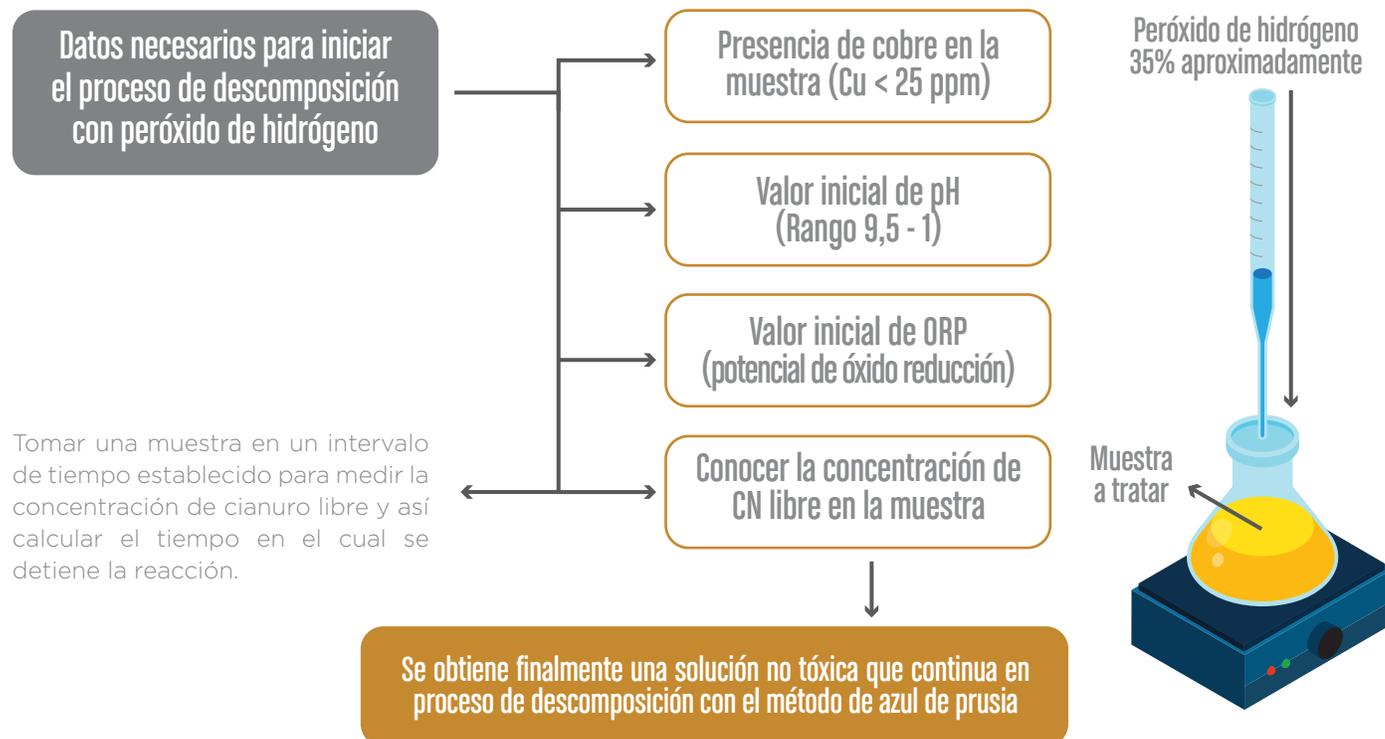
6.2.5.2. TRATAMIENTOS DE DESCOMPOSICIÓN: USO DEL PERÓXIDO DE HIDRÓGENO Y SULFATO FERROSO

De acuerdo con lo expuesto, existen dos formas principales de cianuro: libre y compleja. Con el material de Marmato se desarrollaron dos tratamientos para cada forma, en los que se evidenció, mediante prácticas con los mineros en el laboratorio y planta piloto del Grupo de Trabajo Cali, la descomposición de cianuro a formas amigables con el medio ambiente. Para descomponer el cianuro libre se utiliza el método de descomposición con peróxido de hidrógeno al 35%. En ocasiones se encuentran en el mercado concentraciones mayores, que pueden utilizarse de acuerdo al cálculo de reacción.

El diagrama presentado evidencia los parámetros fisicoquímicos que deben tenerse en cuenta en el proceso y los equipos requeridos.

Figura 6.6: Tratamiento Método Peróxido de Hidrógeno-Descomposición Cianuro libre.
Fuente: Propia

MÉTODO PARA DESCOMPONER EL CIANURO LIBRE PRESENTE EN LA SOLUCIÓN POBRE.



Tomar una muestra en un intervalo de tiempo establecido para medir la concentración de cianuro libre y así calcular el tiempo en el cual se detiene la reacción.

- **Cálculo para la dosificación de peróxido**

Los valores necesarios para realizar el cálculo son:

1. **Concentración de cianuro libre.**
2. **Volumen de muestra que se tratará en mL.**
3. **Concentración de peróxido: ficha técnica del insumo o titulación con permanganato de potasio y ácido sulfúrico.**
4. **Densidad del peróxido a la concentración y temperatura usadas.**

Los reactivos utilizados son de grado comercial.

Es importante hacer ensayos en escala pequeña antes de realizar las descomposiciones de cianuro libre y complejo.

Convertir a peso de CN⁻:

$X = \text{cualquier cantidad} / \text{NaCN} = \text{cianuro de sodio} / \text{CN} = \text{cianuro}$

$(X \text{ mg NaCN/L}) * (1/1000\text{mg}) * (1\text{mol de NaCN}/49,00\text{g NaCN}) * (1\text{mol CN}^-/1\text{mol NaCN}) * (26,02\text{g CN}^-/1\text{mol de CN}^-) = \text{g de CN}^-/\text{L}$

Fórmula para el consumo de peróxido, relación 5 a 8 veces:

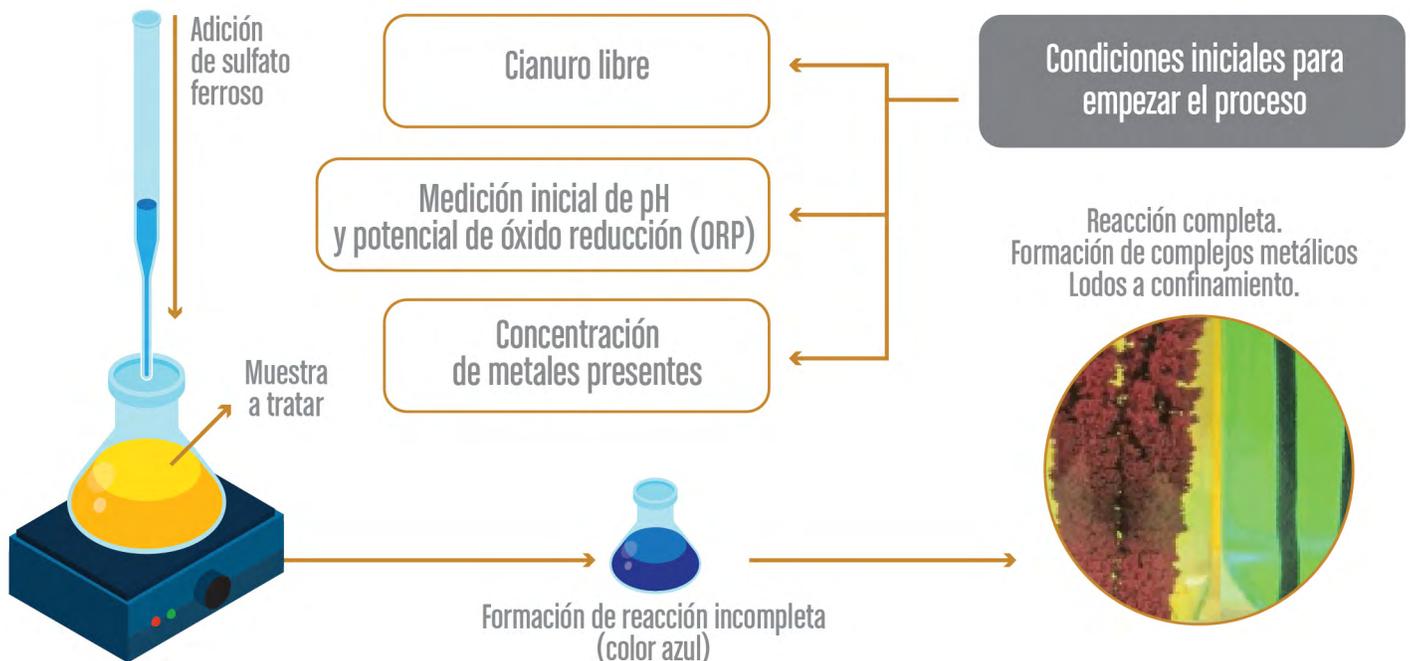
$X \text{ g CN}^-/\text{L} * \text{volumen de muestra a tratar} * 5 = \text{g de H}_2\text{O}_2$

$(\text{g de H}_2\text{O}_2/0,35)/1\text{mL}/1,19\text{g H}_2\text{O}_2 = \text{volumen en mL a gastar de H}_2\text{O}_2$

La metodología del **azul de Prusia** es el proceso final para completar la descomposición de todos los complejos metálicos transformándolos en compuestos más estables y que no generen impacto negativo en condiciones ambientales. El material (lodo) producto de este proceso es llevado a confinamiento.

Figura 6.7: Tratamiento método azul de prusia.

Fuente: Propia



- **Cálculo para la dosificación del sulfato ferroso (FeSO₄·7H₂O).**

Los valores necesarios para realizar el cálculo son:

1. **Concentración de cianuro libre no detectable (rango de trabajo ácido formación de HCN si la Rx continua).**
2. **Concentración de cianuro total: destilación y titulación o cianurómetro (complejo).**
3. **Volumen a tratar de muestra en mL para escalar y en litros en planta.**
4. **Concentración de sulfato ferroso: 33%.**

Convertir a moles de CN⁻:

$X = \text{cualquier cantidad} / \text{NaCN} = \text{cianuro de sodio} / \text{CN} = \text{cianuro}$

$(X \text{ mg NaCN/L}) * (1/1000\text{mg}) * (1\text{mol de NaCN}/49,00\text{g NaCN}) * (1\text{mol CN}^-/1\text{mol NaCN}) = \text{moles de CN}^-/\text{L}$

Fórmula para el consumo de sulfato ferroso, relación 0,5 a 5 veces:

$X \text{ moles CN}^-/\text{L} * \text{volumen de muestra a tratar} * 0,5 \text{ o } 5 = \text{moles de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$

$(\text{moles de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} * 278,05\text{g FeSO}_4/1\text{mol FeSO}_4 * \text{concentración de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} = \text{volumen a necesitar de FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O al 33\%}$

• CARACTERÍSTICAS FÍSICOQUÍMICAS DE LAS ETAPAS DE DESCOMPOSICIÓN

La concentración de cianuro total puede disminuir en el transcurso del tiempo y llegar al valor mínimo o no detectable. Los colores típicos de las reacciones que se llevaron a cabo fueron azul, verde y marrón, típicos de la precipitación de cianuro.

En carencia de hierro se puede formar azul de Prusia soluble que luego se convierte a hexacianoferrroso soluble. Al final de la coagulación-floculación se obtiene un color azul que indica que el tratamiento es incompleto. La solución final se torna marrón.



• PRUEBA DE CONTROL AMBIENTAL A CANCHAS DE RELAVES (Toxicity Characteristics Leaching Procedure)

El análisis de TCLP es una prueba de lixiviación que mide la liberación de contaminantes en un residuo sólido cuando entra en contacto con fases líquidas.

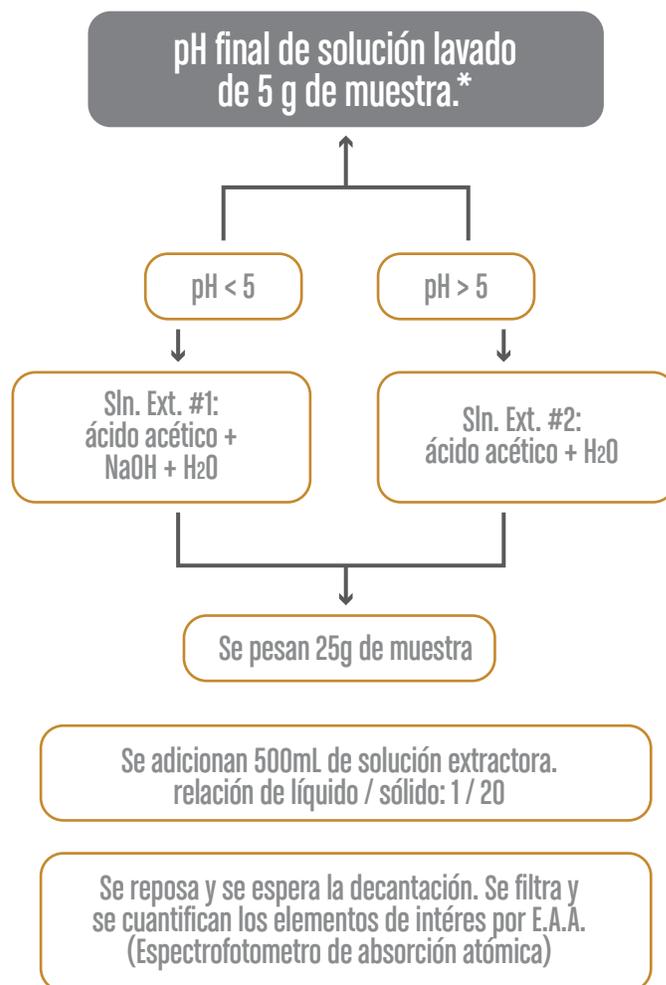
Hace parte de las pruebas de interés para residuos de beneficio de minerales auríferos, junto con las pruebas de reactividad de cianuros y sulfuros.

La prueba de TCLP determina si el residuo es o no peligroso, entonces no aplican los valores de descarga para residuos industriales líquidos: lo que se usan son los límites asociados a concentraciones máximas que se pueden lixiviar de las muestras, y esto depende de cada metal. Estos valores máximos se muestran en la tabla siguiente.

ELEMENTO	PERMISIBLE EN EL LIXIVIADO*
Arsénico - As	5,0
Bario - Ba	100
Cadmio- Cd	1,0
Cromo - Cr	5,0
Plomo - Pb	5,0
Mercurio-Hg	0,2
Selenio -Se	1,0
Plata - Ag	5,0

*Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP-Decreto 4741 de 2005.

Figura 6.8: Porceso prueba TCLP.
Fuente: Propia



*Adicionar 3.5 ml de HCl 1 M, posteriormente se calienta y agita por 10 min. medición de pH.

6.3. CARACTERÍSTICAS QUÍMICO-AMBIENTALES DE LA ZONA MINERA

6.3.1. RELAVES

Los patios de relaves, o depósitos de colas, generalmente no están confinados y están expuestos a los fenómenos meteorológicos del ambiente, tales como la humedad, la temperatura, la oxidación y la radiación solar. Estos factores inducen diversas reacciones químicas en el depósito, que generan, entre otras cosas, acidez y iones solubles, tales como los sulfatos y los iones metálicos. Tanto la acidez como los metales producen un daño ambiental cuya magnitud que depende del caso específico.

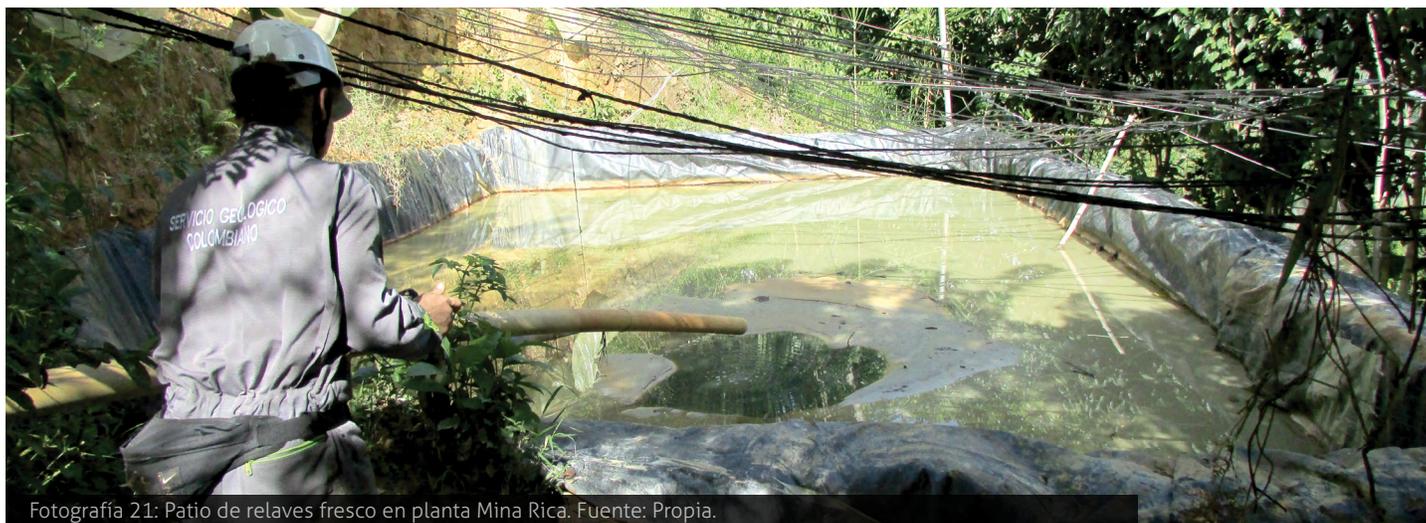
Las muestras de suelo se tomaron de las canchas de relaves y sedimentos activos de río, aledañas a las plantas de beneficio visitadas.

PATIOS DE RELAVES MINA RICA (QUINCHÍA)

El patio de relaves de Mina Rica contenía, en el momento del muestreo, material perteneciente a amalgamaciones realizadas antiguamente (aprox. 3 a 4 años) por los propietarios en esa época. En la fotografía 20 se observa el relave 1 muestreado, y en la fotografía 21 el relave 2 fresco proveniente del proceso actual de beneficio del metal precioso.



Fotografía 20: Patio de relaves en planta Mina Rica. Fuente: Propia.



Fotografía 21: Patio de relaves fresco en planta Mina Rica. Fuente: Propia.

PATIO DE RELAVES DE MIRAFLORES (QUINCHÍA)

La mina Miraflores no tiene una planta asociada conformada. Se observaron solo dos molinos de bolas en los cuales se realiza amalgamación; el material residual es almacenado en un relave que, por la inclinación que presenta la zona, tiende a descender por la montaña.



Fotografía 22: Vista general del entable Miraflores. Fuente: Propia.

6.3.2. FUENTES HÍDRICAS

QUEBRADA LA CRISTALINA, SECTORES DE SAN BARTOLO Y LA UNIÓN

Se realizó un muestreo de sedimentos activos en dos quebradas ubicadas en la zona de Riosucio, hacen parte de la cuenca media del río Supía, con extensión en Caldas de 35 242 (ha).

Esta zona es de difícil acceso, no existe vía construida y se encuentran cafetales propios de la agricultura de la región; la vegetación es abundante. En las fotografías 23 y 24 se ven cursos de agua en la zona.

Se encontró turbiedad en la quebrada La Unión, posiblemente debido a la concentración de material estéril y aguas residuales de otras actividades. Se recolectó muestras en aguas intermedias de la quebrada San Bartolo. Este muestreo se realizó para cuantificar mercurio y verificar parámetros físico-químicos.



Fotografía 23: Quebrada La Cristalina - sector San Bartolo. Fuente: Propia.

Se recolectó una muestra en aguas intermedias de la quebrada San Bartolo. pH: 7.78 Und. Altura: 1559 m.



Fotografía 24: Quebrada La Cristalina - sector San Bartolo. Fuente: Propia.

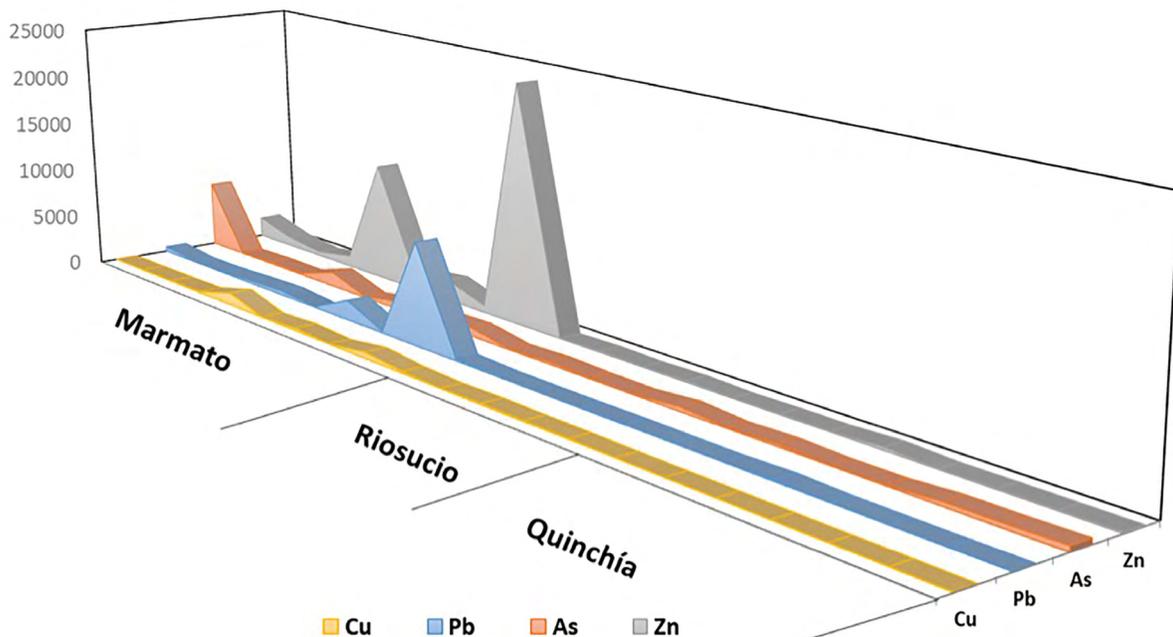
Se encontró turbiedad en la quebrada La Unión, debido, posiblemente, a la presencia de material estéril y de aguas residuales de otra actividades. pH 7.84. Altura: 1499 m.

6.3.3. COMPOSICIÓN MINERALÓGICA DE LOS SECTORES ESTUDIADOS

Los análisis elementales de fluorescencia de rayos X de las muestras de filón de cada uno de los sectores indican que en la zona de Marmato la cantidad de sulfuros es mucho más alta que en los sectores de Riosucio y Quinchía, algo que se manifiesta por la presencia de zinc, plomo y arsénico, principalmente en las minas La Pesebrera y San Antonio; en la mina La Maruja se presenta una mayor concentración de cobre.

Esto se corrobora en la siguiente figura, donde se observa cómo la presencia de hierro y azufre superpuestos se relacionan con la presencia de pirita, que nuevamente es más alta en la zona de Marmato que en las otras dos zonas, principalmente en las minas San Antonio y La Pesebrera.

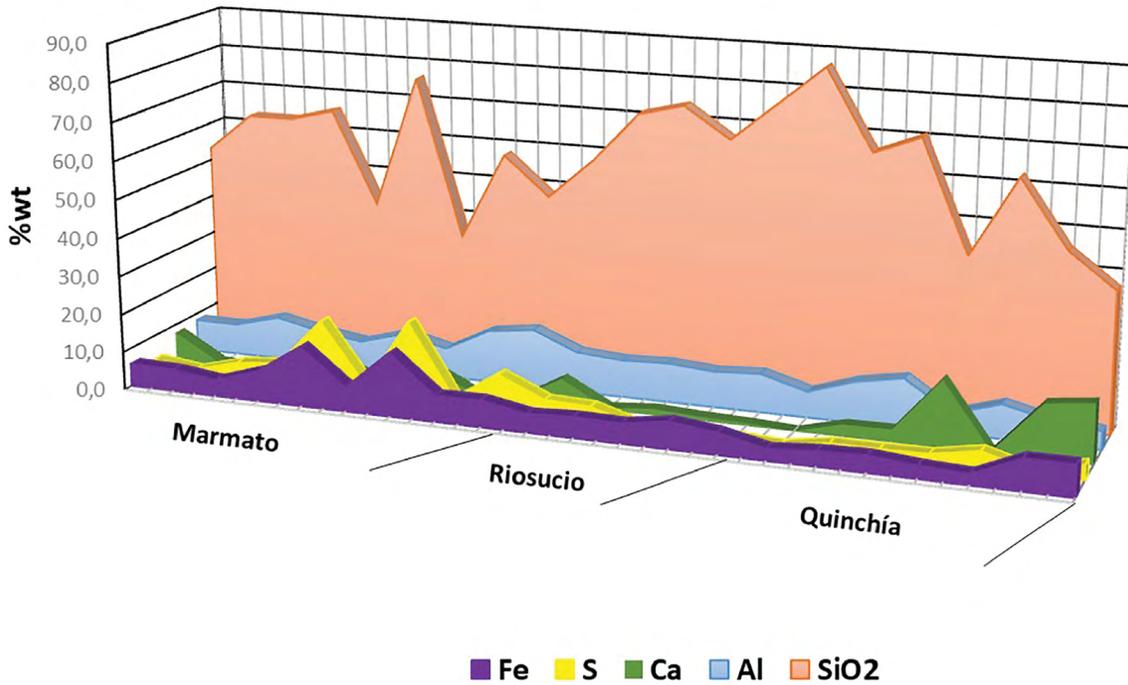
Figura 6.9: Concentración de metales en las muestras de filón tomadas en cada uno de los sectores en ppm.
Fuente: Propia



En las zonas de Riosucio y Quinchía, tal y como se observa en las gráficas, la presencia de sulfuros es baja. Las concentraciones más altas de sulfuros se presentan en la mina La Cruzada, en Miraflores, cuyos datos corresponden a la parte del extremo derecho de la gráfica.

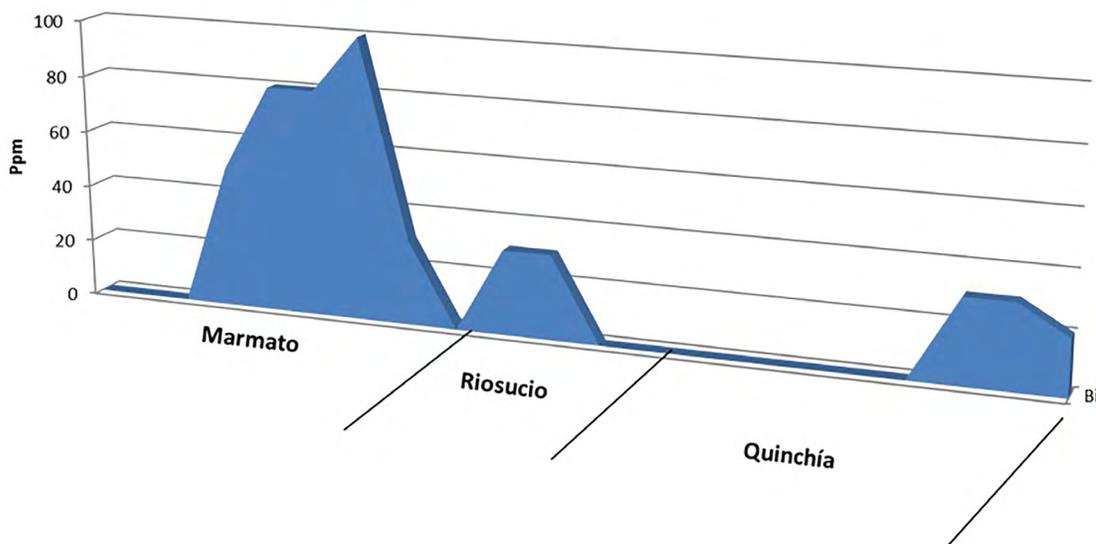
En las tres zonas, el contenido de sílice es bastante alto, y en Marmato es consecuencia de la presencia de filones cuarzosos, principalmente, aunque en la gráfica se observa cómo en algunos puntos donde las concentraciones de sulfuros y/o carbonatos aumentan, el porcentaje de sílice disminuye. El contenido de aluminio es muy homogéneo en las tres áreas, y se observa un ligero descenso debido a que aumenta el contenido de carbonatos. El aluminio se debe al contenido de arcillas producto de la alteración filica y argílica que se presenta en los filones.

Figura 6.10: Concentración en porcentajes en peso (%wt) de elementos mayores y azufre en las diferentes zonas del área de estudio. Fuente: Propia



Por otro lado, se detectaron pequeñas concentraciones de bismuto en los análisis de fluorescencia, principalmente en la zona de Marmato, lo que corrobora la presencia de este elemento en la galena, que fue identificado en un cristal por medio de análisis de microsonda electrónica.

Figura 6.11: Contenido de Bismuto en los diferentes sectores del área. Fuente: Propia



6.3.4. METALURGIA

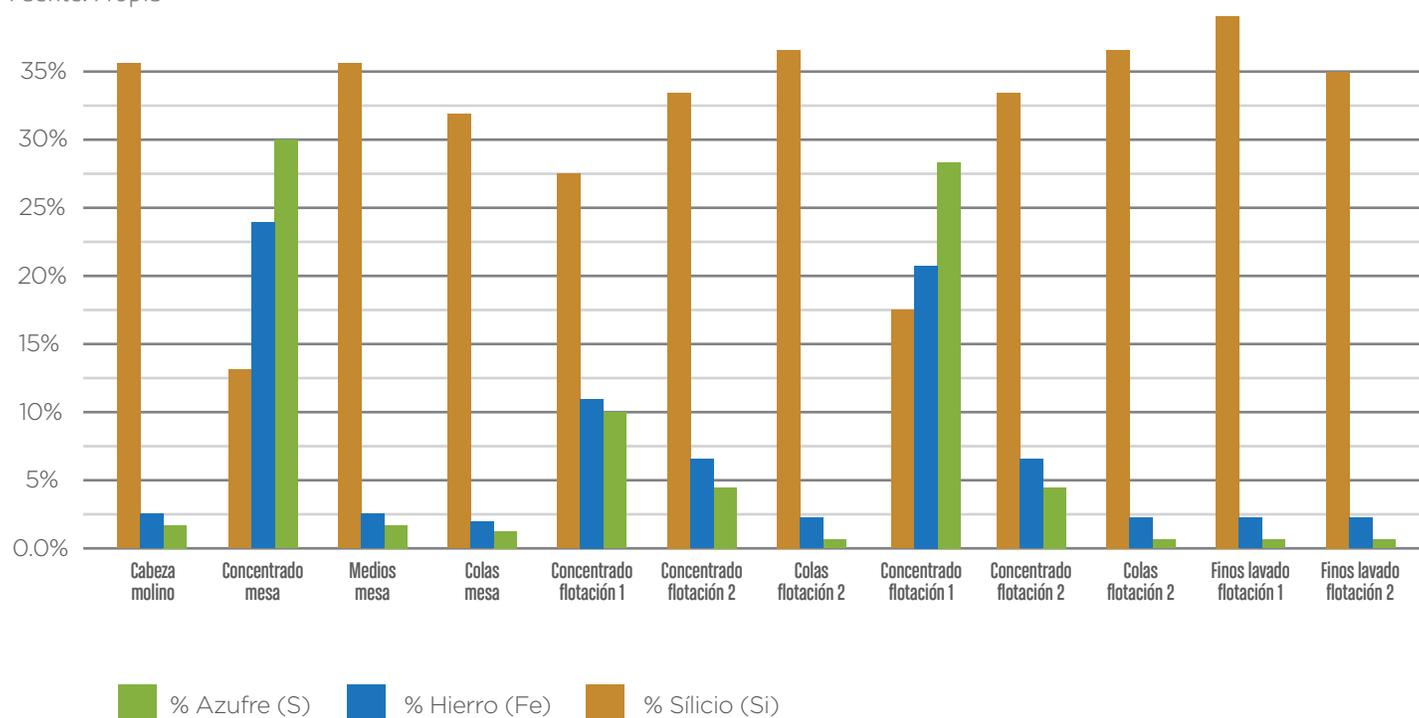
La composición de los materiales que serán sometidos a pruebas metalúrgicas debe conocerse previamente. Para esto se realizaron determinaciones del material proveniente de las operaciones unitarias aplicadas en cada uno de los procesos en cada planta. En este orden, se presentan los elementos mayores para las cabezas, concentrado y colas de mesa, cabeza y colas de cianuración, cabeza y concentrado de flotación.

Los resultados obtenidos de las muestras recolectadas en la planta La Millonaria evidencian baja recuperación de los sulfuros en la concentración en mesa. Los valores de los elementos que se asocian a los sulfuros, tales como Fe, S, Zn, Cu, Pb y As de concentrado de mesa y concentrados que se iban a cianurar, están incrementados frente a la cabeza de proceso.

En la planta de Las Perreras y La Bendición, la evaluación del proceso, desde el punto de vista de la concentración de sulfuros, presenta una buena recuperación, ya que en los concentrados de mesa se observa una reducción de la sílice de 60%, mientras el Fe y S se incrementan 7 y 14 veces, respectivamente.

Figura 6.12: Concentración de S, Fe y Si en ensayo de flotación de cabeza de molino.

Fuente: Propia



6.3.5. CARACTERIZACIÓN DE SOLUCIONES RICAS Y POBRES DEL PROCESO METALÚRGICO POR ESPECTROFOTOMETRÍA DE ABSORCIÓN ATÓMICA

Para evaluar los procesos metalúrgicos es necesario conocer las concentraciones de ciertos analitos. En la cianuración se cuantifica el oro con el fin de conocer su proceso de disolución en el tiempo (cinética), recuperación y efectividad del proceso, así como otros parámetros.

La concentración de Zn es cuantificada para conocer la eficiencia del proceso de electrodeposición de oro en polvo de zinc (Merrill Crowe). Se observa, en las soluciones ricas analizadas, la concentración de Zn en la planta de La Pesabrera, de 968.9 ppm, lo que indica que la solución cianurada es recirculada con contenido alto, si se compara con los valores óptimos en los procesos de lixiviación con cianuro.

Figura 6.13: Análisis de metales por AA.
Fuente: Propia

REFERENCIA	(mg/L)					
	Au	Cu	Fe	Zn	Pb	Cd
Solución rica La Esperanza	1,01	62,5	0,15	168,2	0,09	2,98
Solución pobre La Esperanza	0,04	160,4	10,2	604,9	0,30	0,61
Solución rica La Pesebrera	1,35	57,4	2,42	968,9	3,53	2,81
Solución pobre Guayacanes	0,11	75,2	0,28	852,8	0,28	ND

Au: Oro Fe: Hierro Pb: Plomo Fuente: (SGC, 2017).
Cu: Cobre Zn: Zinc Cd: Cadmio EAA- llama. Thermo Scientific Ice Series 3000.

6.3.6. CIANURO LIBRE Y TOTAL EN MUESTRAS DE PROCESO METALÚRGICO

Se determinó cianuro libre y total en muestras líquidas cianuradas de las plantas La Esperanza, La Pesebrera y Guayacanes.

Figura 6.14: Determinación de cianuro libre y total.
Fuente: Propia

REFERENCIA	(mg/L)	
	Cianuro libre	Cianuro total
Solución pobre La Esperanza	2981,5	3771,1
Solución pobre La Pesebrera	3837,5	4394,2
Solución pobre Guayacanes	37500	37617,5

Fuente: (SGC, 2017).
Volumetría-AgNO3-KI (indicador)

Se encontraron 789.6 ppm de cianuro complejo en la solución pobre de la planta La Esperanza, hecho que concuerda con los valores de las concentraciones de los metales Cu, Fe, Zn y Pb encontrados mediante espectrofotometría de absorción atómica.

ENSAYOS AL FUEGO

La relación de plata y oro es alta en el municipio de Marmato. Se observa una relación promedio de hasta 80 veces. En el municipio de Riosucio, solamente en la planta El tesoro se observa una alta relación. Esto indica que podrían necesitarse unos tiempos mayores de cianuración, debido a que la presencia de plata puede pasivar la cianuración, por la formación de pátina.

6.3.7. PRUEBA TCLP

Los valores de los metales obtenidos mediante la prueba TCLP permiten conocer la liberación de Hg en el ambiente al entrar en contacto con fases líquidas. Estos resultados se comparan con lo dispuesto en el Decreto 4741 de 2005, por el cual se reglamenta parcialmente la prevención y el manejo de los residuos o desechos peligrosos generados en el marco de la gestión integral y se establecen las concentraciones máximas permisibles en la prueba para clasificar el residuo como peligroso o no peligroso. Se encontró que los relaves de Mina Rica y de Miraflores no presentan concentraciones detectables de Ag, Cd y Cr lixiviables. Por su parte, el relave de Miraflores presenta una concentración de Pb de 1.15 mg/kg, valor que no sobrepasa la norma colombiana para este metal, cuya concentración máxima permitida es de 5 mg/kg, y no se detectó Hg.

Se obtuvo una concentración apreciable de Hg en los relaves de Mina Rica; sin embargo, no excedían la concentración máxima establecida, que es igual a 0.2 mg/L.

De esta manera, y para los analitos cuantificados, los residuos mineros de Quinchía se clasifican como no peligrosos; sin embargo, existe movilidad de los metales detectados.



6.4. CONSIDERACIONES QUÍMICO-AMBIENTALES

EN AGUAS SUPERFICIALES

- En la quebrada La Cristalina (sector de San Bartolo, en Riosucio) no se detectaron concentraciones de mercurio. Esto evidencia que no hay movilidad de este analito en el punto de muestreo. Se observó que algunas características organolépticas de esta quebrada, como la turbiedad, eran altas.
- En la Quebrada La Cristalina (sector de La Unión, en Riosucio) se detectó mercurio con un valor de 2.72 µg/L. Esta corriente de agua presenta contaminación con este analito que, de acuerdo con la normatividad vigente, si se utiliza para consumo humano (1.0 µg/L, según la Resolución 2115 del 2007).
- Las plantas visitadas no cuentan con control de sus relaves, ya que están expuestos al medio ambiente, donde existe posibilidad de contaminar las zonas aledañas, incluidas la vegetación y fauna propia del sector. Según los resultados de los análisis de Hg de las muestras de los relaves 1 y 2 de Mina Rica, hay un valor de 2.88 mg/kg y 1.55 mg/kg, respectivamente. En el relave de la planta de Miraflores se encontró Hg con un valor de 172.71 mg/kg. Actualmente, en Colombia no existe una normativa ambiental que establezca los valores para definir suelos (relaves de minería) contaminados por Hg. Existen valores de referencia para niveles permisibles, en México, de 23 mg/kg para uso agrícola y 310 mg/kg para uso industrial (NOM-147-Sernat/SSA1, 2004); entre 0.08 y 1.40 mg/kg en suelo agrícola establecidos por el Community Bureau of Reference (BCR) SRM 2709 (Acosta et al., 2011); de 0.07-0.3 mg/kg definidos en el marco del Convenio sobre la Contaminación Atmosférica Transfronteriza a Larga Distancia de la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (Pirrone et al., 2001).
- En los resultados del análisis ambiental de lixiviación llamado TCLP se encontró que los relaves de Mina Rica y de Miraflores no presentan concentraciones detectables de Ag, Cd y Cr lixiviables. El relave de Miraflores presenta una concentración de Pb de 1.15 mg/kg, valor que no sobrepasa los límites establecidos por la norma colombiana para este metal, cuya concentración máxima

permitida es de 5 mg/kg, y que posiblemente se encuentre debido a la presencia de galena en el mineral de trabajo. No se detectó mercurio lixiviable en dicho análisis.

RECOMENDACIONES

- Dadas las condiciones en las cuales se encuentran los depósitos de residuos mineros del proceso de beneficio del oro en la zona estudiada, se recomienda realizar una adecuación del espacio con techos y geomembranas impermeables en el fondo del depósito para disminuir la exposición de los minerales presentes en los relaves a fenómenos ambientales como las precipitaciones y a fenómenos de meteorización que promueven la generación de drenaje ácido de mina y la movilidad de metales pesados que pueden contaminar las fuentes hídricas, flora y fauna cercanas.
- Se recomienda realizar investigaciones en procesos de biorremediación de relaves, empleando plantas que acumulen en sus tejidos, estabilicen o metabolicen el mercurio y otros metales pesados, disminuyendo el impacto ambiental que generan estos a los ecosistemas y a la salud humana.

En las soluciones de cianuración rica y pobre de las plantas de los municipios Marmato y Quinchia se cuantificó la concentración de metales (Au, Cu, Fe, Zn, Pb, y Cd), lo que indica la necesidad de contar con equipos para lograr controlar los procesos de beneficio.

Trabajo en molino de bolas en planta de beneficio.
Fotografía tomada por: Benedicto Galindo / Servicio Geológico Colombiano

7. RUTA METALÚRGICA PROPUESTA PARA LA ZONA MINERA

Luego de realizar el recorrido por los aspectos relevantes que deben tenerse en cuenta en el proceso de beneficio de oro, en este capítulo se presenta la propuesta de ruta metalúrgica adecuada para aplicar en la zona minera, propuesta desarrollada de acuerdo con las características geológicas y mineralógicas, pruebas metalúrgicas y la caracterización físico-química de relaves.

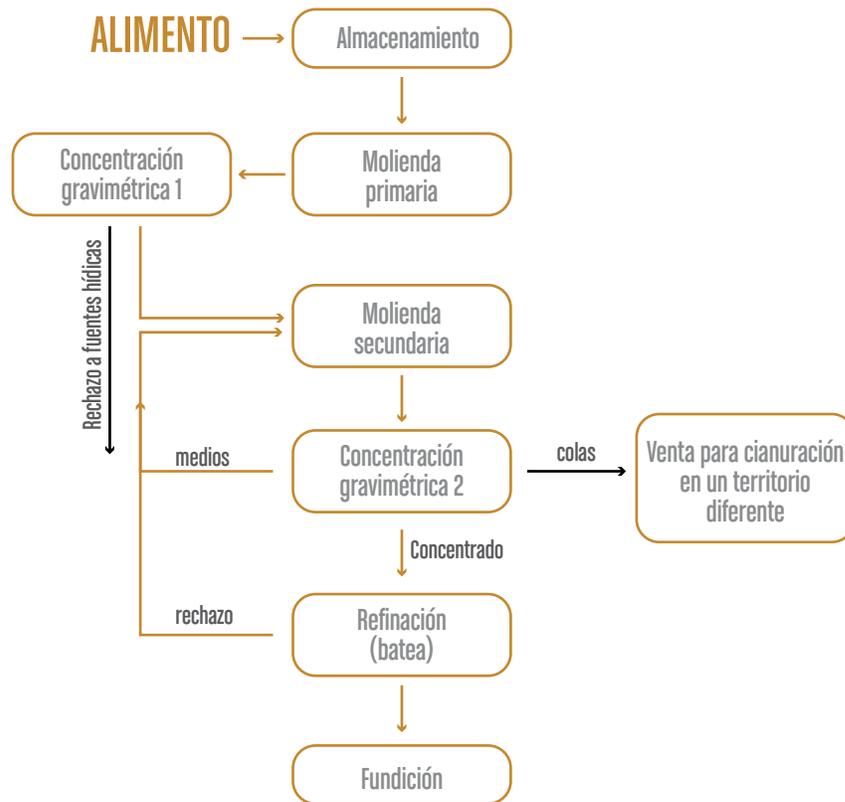
7.1. PROCESO DE BENEFICIO DESARROLLADO ACTUALMENTE

7.1.1. PROCESO DE BENEFICIO ACTUAL EN RIOSUCIO

La Autoridad de los Cabildos Indígenas exige que las operaciones hidrometalúrgicas de extracción de oro sean solo gravimétricas. En la zona no existen procesos de amalgamación del oro con mercurio ni extracción con cianuro de sodio. Adicionalmente, la cantidad de material a procesar por planta de beneficio está restringido, para mitigar el impacto de la contaminación de las aguas con material particulado.

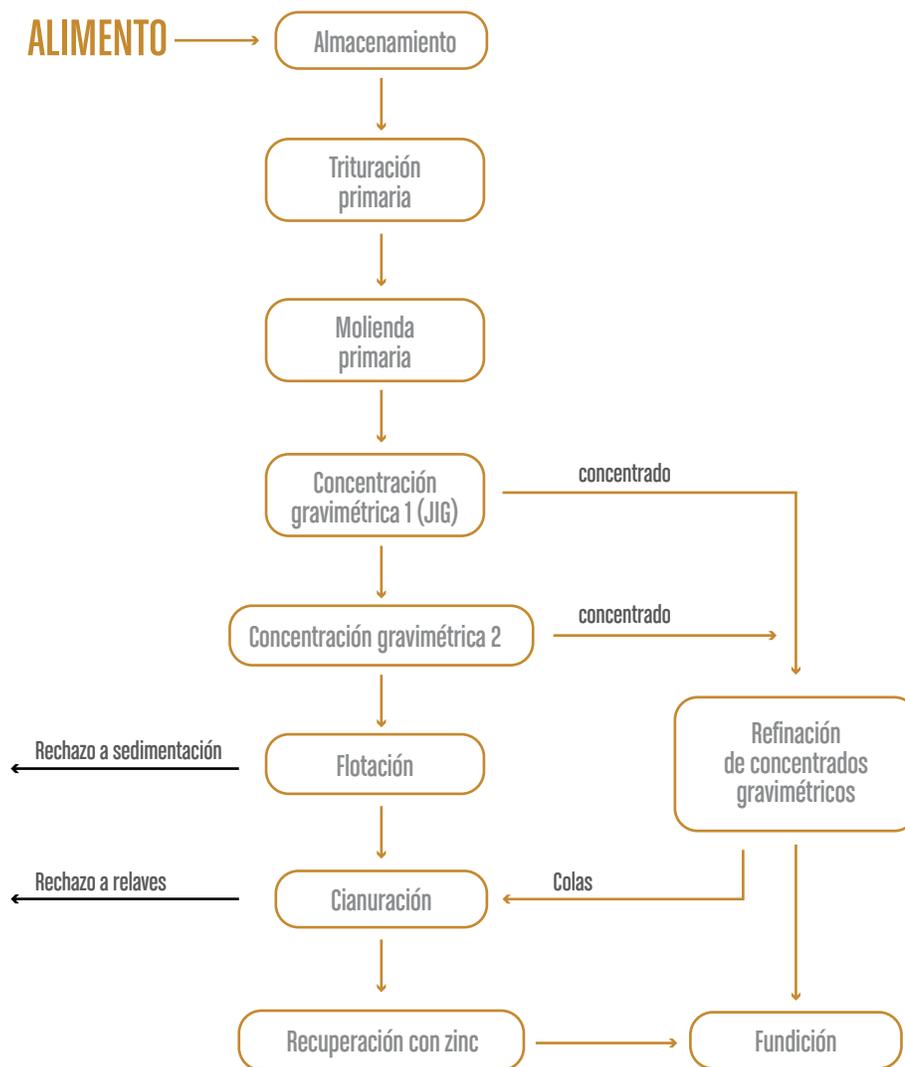
La planta Las Perreras se puede tomar como referente del tipo de planta de beneficio existente en Riosucio-Caldas.

Figura 7.1: Diagrama de proceso de beneficio actual de la zona de Riosucio.
Fuente: Propia



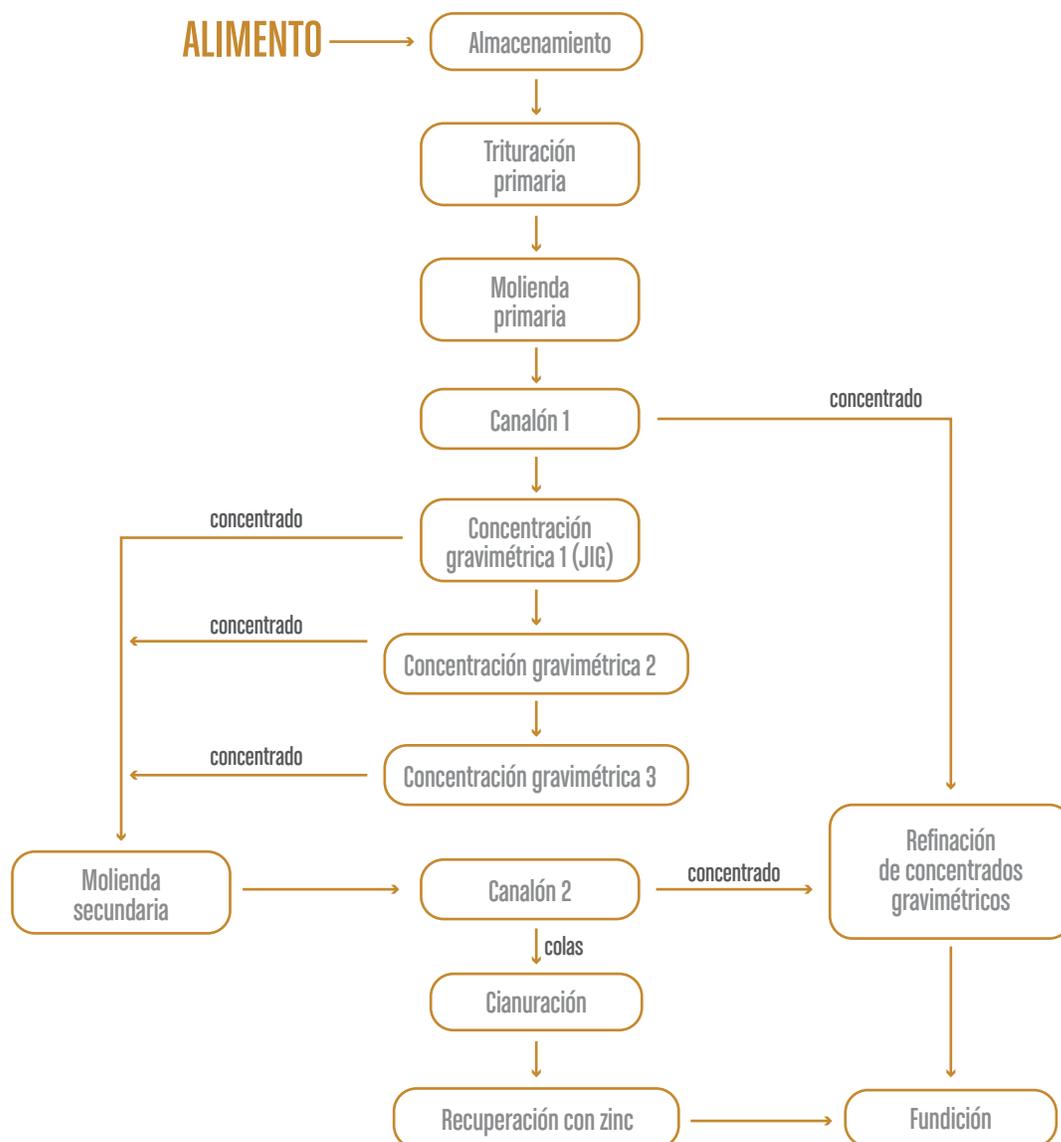
7.1.2. PROCESO DE BENEFICIO ACTUAL EN QUINCHÍA - SECTOR MINA RICA

Figura 7.2: Diagrama de proceso de beneficio actual de la zona de Quinchía - sector Mina Rica.
Fuente: Propia



7.1.3. PROCESO DE BENEFICIO ACTUAL EN QUINCHÍA - SECTOR MIRAFLORES

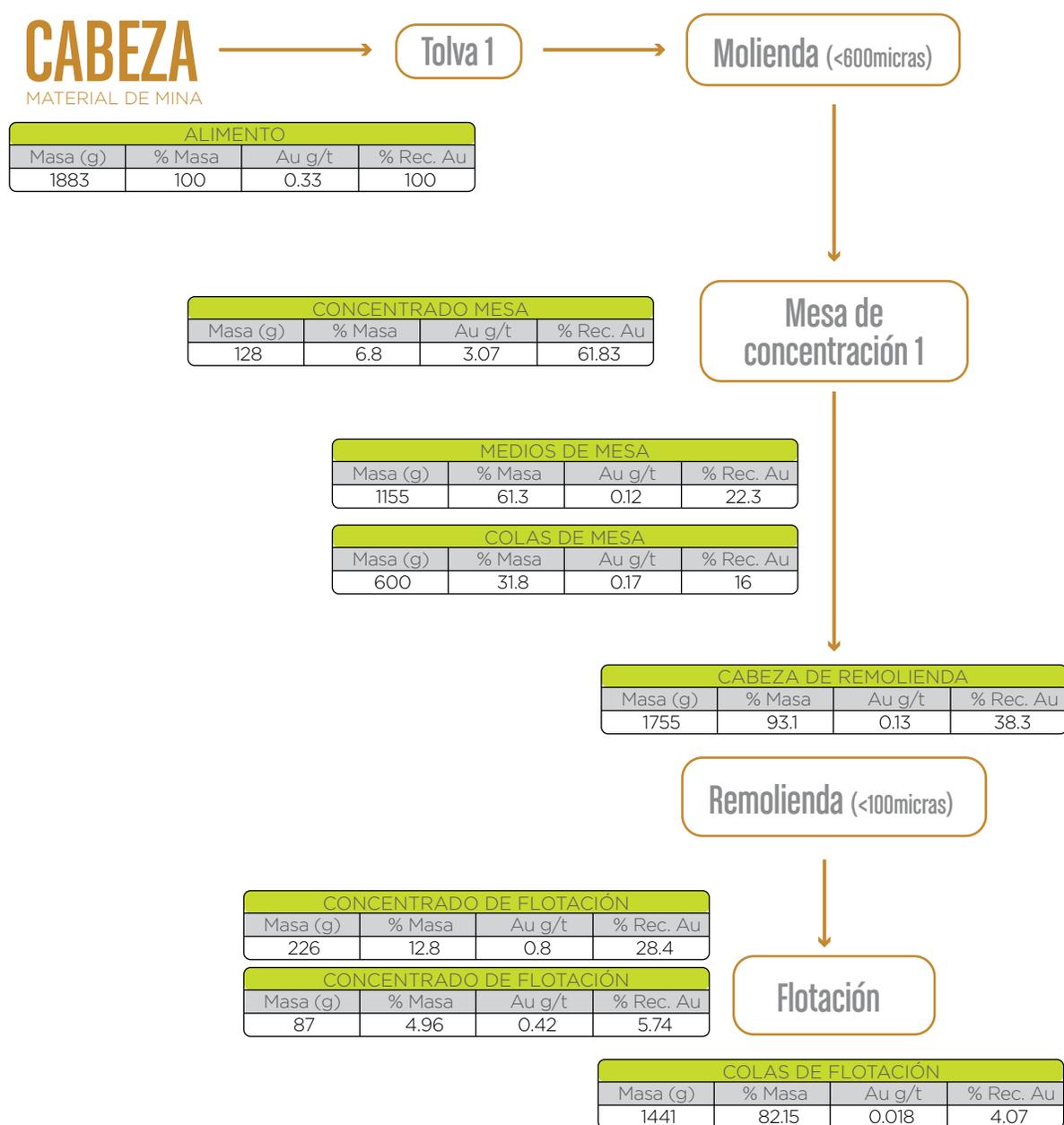
Figura 7.3: Diagrama de proceso de beneficio actual de la zona de Quinchía - sector Miraflores.
Fuente: Propia



7.2 PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO SEGÚN LA MINERALOGÍA

7.2.1. ENSAYOS EN LABORATORIO PARA MEJORAS EN EL PROCESO DE BENEFICIO ACTUAL - RIOSUCIO

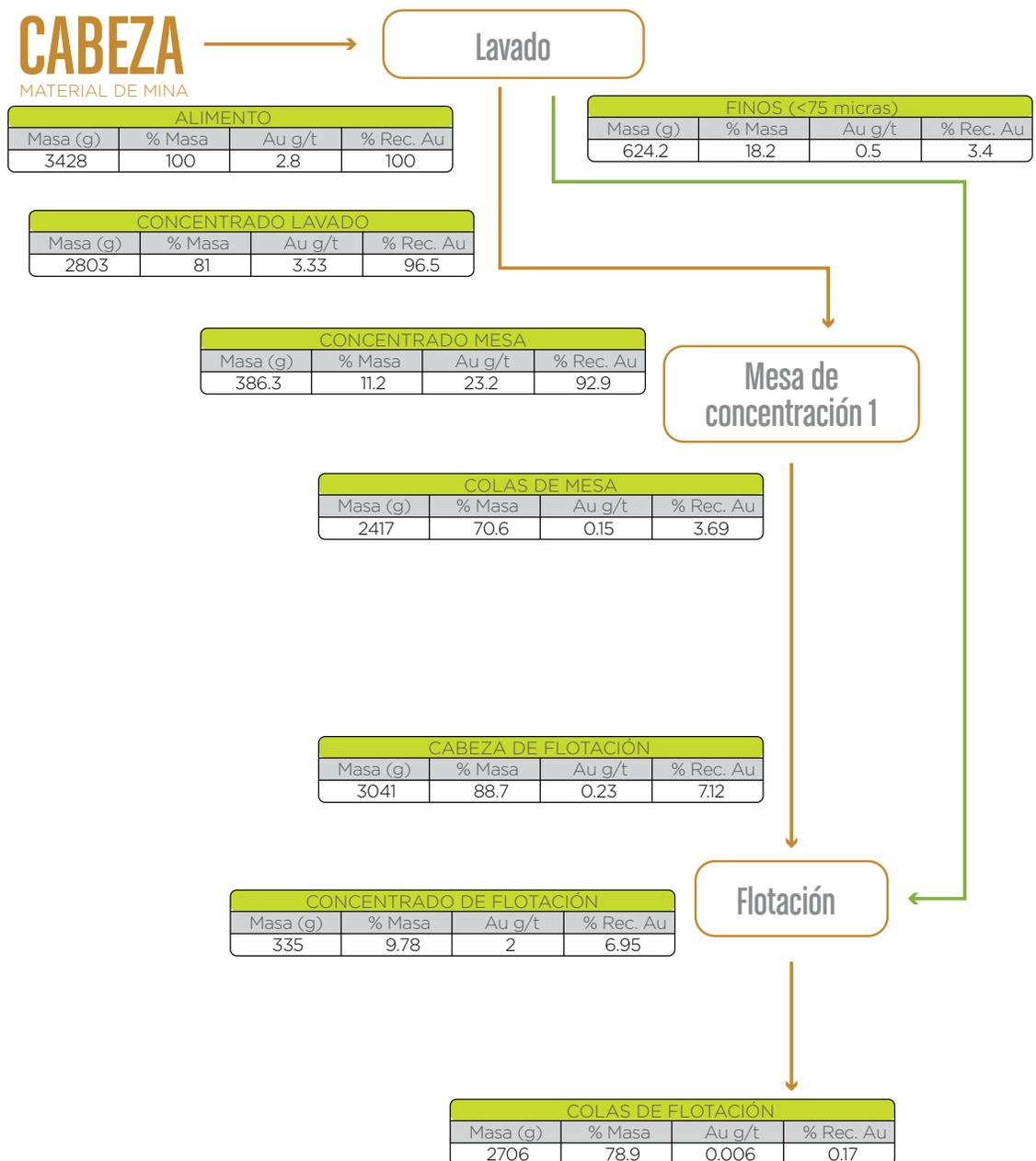
Figura 7.4: Diagrama de balance de masa con ensayo de laboratorio para el mejoramiento del proceso de beneficio en Riosucio.
Fuente: Propia



7.2.2. ENSAYOS EN LABORATORIO PARA MEJORAS EN EL PROCESO DE BENEFICIO ACTUAL QUINCHÍA - SECTOR MINA RICA

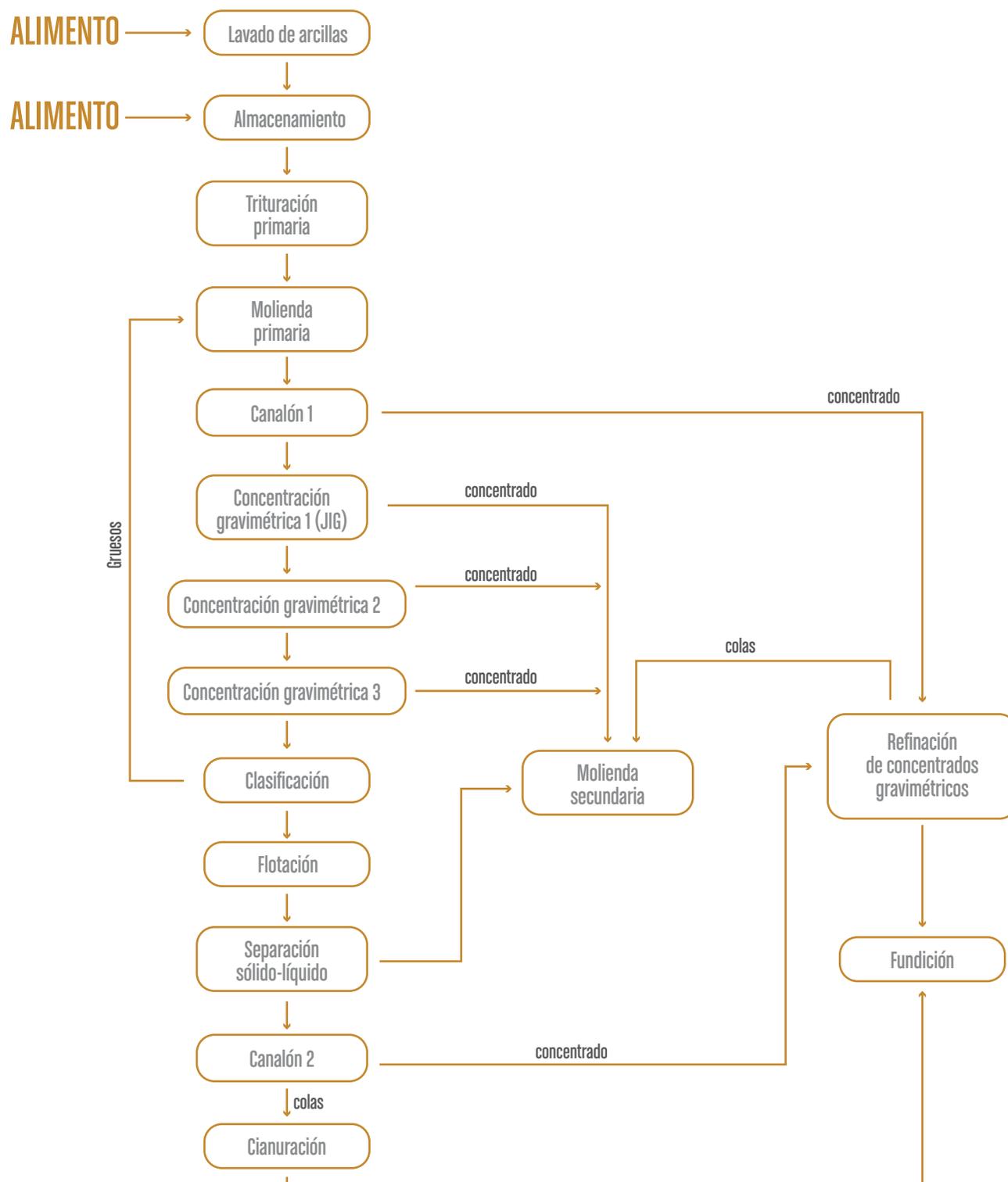
Figura 7.5: Diagrama de balance de masa con ensayo de laboratorio para el mejoramiento del proceso de beneficio en Quinchía - sector Mina Rica..

Fuente: Propia



7.3. PROCESO DE BENEFICIO SUGERIDO PARA QUINCHÍA - SECTOR MIRAFLORES

Figura 7.6: Diagrama de proceso de beneficio sugerido para Quinchía - sector Miraflores.
Fuente: Propia



7.3.1. DIAGRAMA DE FLUJO DE OPERACIONES, PROCESOS Y MASA PARA EL BENEFICIO SUGERIDO.

El diagrama de flujo con balance de materia permite visualizar y tener un control sobre la cantidad de mineral de entrada y salida, como de oro procesado en cada etapa del circuito de beneficio.

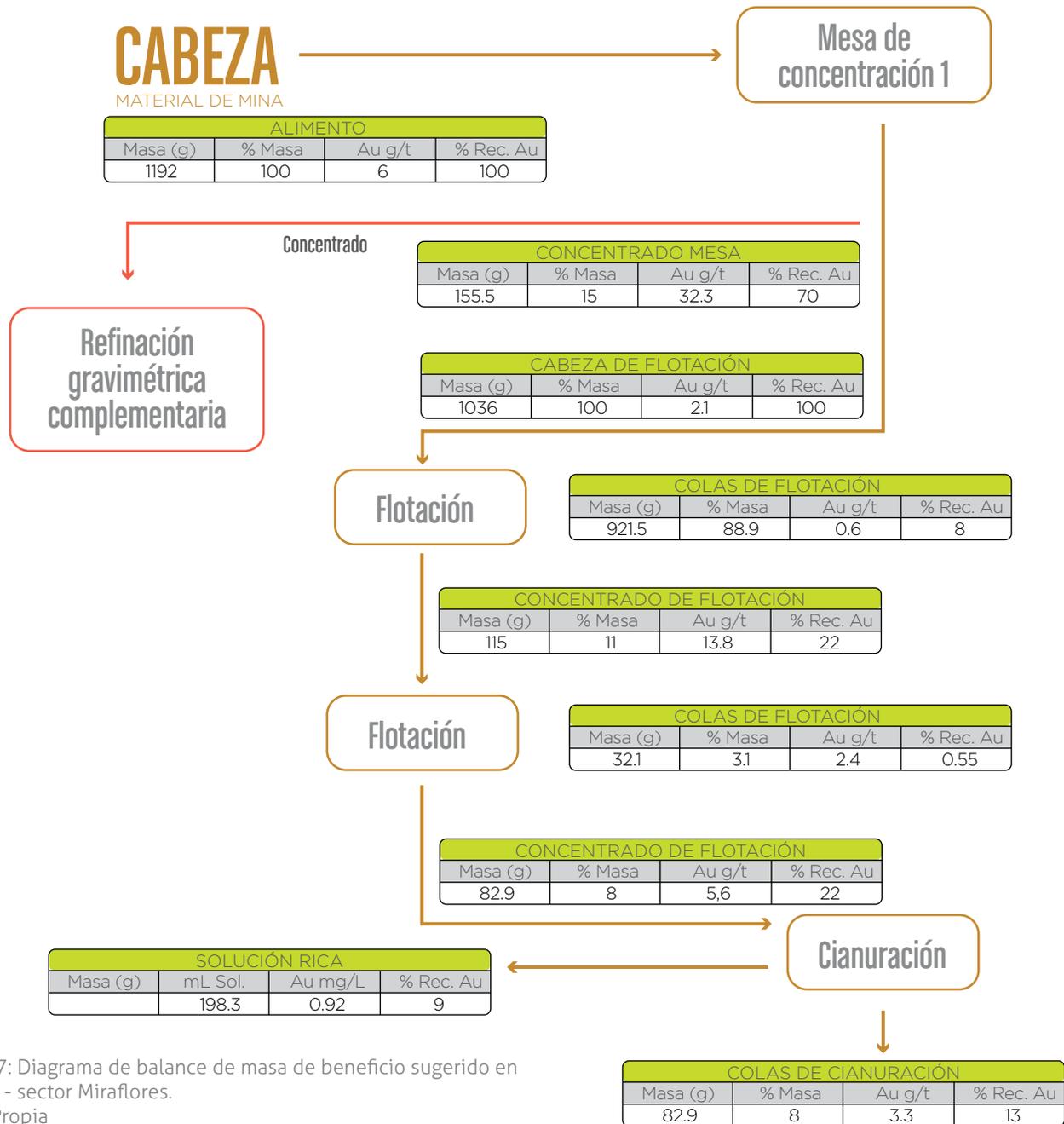
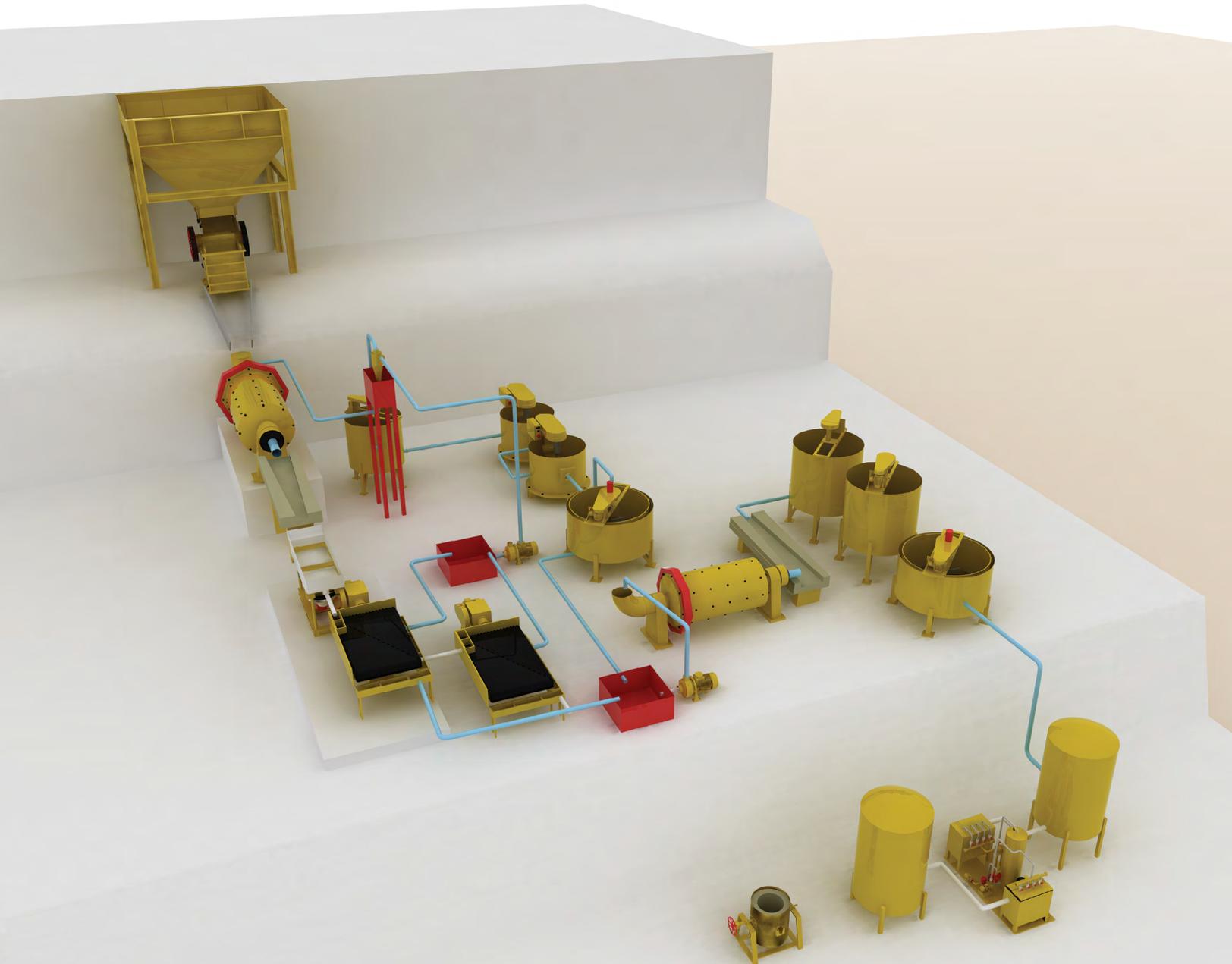


Figura 7.7: Diagrama de balance de masa de beneficio sugerido en Quinchía - sector Miraflores. Fuente: Propia

- % Masa = Procentaje de masa respecto al material entrante en la cabeza del proceso de beneficio.
- Au g/t = Concentración oro gramos por tonelada.
- % Rec. Au = Porcentaje de recuperación de oro con respecto al oro entrante en la cabeza del proceso.
- Proceso de trituración y molienda: Preparación de material para beneficio.
- Concentrados con oro de fácil recuperación a fundición.
- Concentrados con oro asociado a sulfuros que continúan en el proceso de beneficio.
- Colas reprocesadas.

7.4. MONTAJE DE PLANTA DE BENEFICIO SUGERIDA

Fotografía 24: Modelado en 3D de la planta de beneficio propuesta para la zona minera.



El gráfico muestra una aproximación a la configuración de la planta de beneficio que se requiere para seguir los pasos de la ruta metalúrgica sugerida para el caso de Quinchía, sector de Miraflores. Además, incorporan los equipos que componen la planta de beneficio actual, y se propone una adecuación que los incluye.

La inclusión de los nuevos equipos permitirá la optimización de los recursos y un mayor aprovechamiento del material, lo cual se traducirá en un mayor porcentaje de recuperación de oro.

CONVENCIONES

SÍMBOLO	MÁQUINA	FOTOGRAFÍA
	TOLVA	
	TRITURADORA DE QUIJADAS	
	CRIBA VIBRATORIA	
	TRITURADORA DE MARTILLOS	
	BANDA TRANSPORTADORA	
	MOLINO DE BOLAS	
	HIDROCICLÓN	
	CAJA REPARTIDORA	
	TANQUE ACONDICIONADOR	
	CELDA DE FLOTACIÓN CIRCULARES	
	TANQUE DE COLAS	

SÍMBOLO	MÁQUINA	FOTOGRAFÍA
	JIG CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO	
	CAJA DE PULPA	
	BOMBA CENTRÍFUGA	
	MESA DE CONCENTRACIÓN	
	TANQUES AGITADORES	
	FILTRO DE TAMBOR	
	TANQUE SOLUCIÓN RICA	
	TANQUE SOLUCIÓN POBRE	
	TANQUE DE AGUA DE PROCESO	
	TANQUE ESPESADOR	
	FUNDICIÓN CRISOL	



7.6. CONSIDERACIONES METALÚRGICAS ACERCA DE LA RUTA PROPUESTA

- La flotación permite recuperar hasta un 90 % del oro que no se recupera en los procesos gravimétricos.
- El oro contenido en el concentrado de flotación se extraería por cianuración.
- Es necesario limpiar el concentrado de las arcillas que lo acompaña para poder tener una cianuración exitosa.
- La operación del lavado de las arcillas previo a la operación de trituración depende en lo fundamental del grado de dificultad que ellas produzcan en cada caso en particular. Si las arcillas obstruyen el avance del material por el circuito de planta y neutralizan la trituración y la molienda, es necesario hacer el lavado previo.
- La distribución de tamaño de partícula que le debe entregar el molino a la concentración gravimétrica en mesa debe ser con un d80 de 300 micrómetros.
- La flotación es un proceso promisorio para la recuperación del oro fino, el cual puede llegar a tener un porcentaje hasta del 15 % del oro total de la mena.

RIOSUCIO

- Dado que el oro se presenta en un amplio rango de tamaño, tanto la operación gravimétrica como el proceso de flotación son efectivos.
- El material de la zona probado en cianuración no presentó refractariedad y no hubo inconvenientes durante las pruebas realizadas en el laboratorio.
- Debido a las restricciones de la autoridad minera, se recomienda que tanto la flotación como la cianuración se realicen en un territorio donde sea permitido, para cumplir con la normativa ambiental y de seguridad industrial.

QUINCHIA

- Dado que el oro se presenta en un amplio rango de tamaños, tanto la operación gravimétrica como el

proceso de flotación son efectivos, razón por la cual se recomienda optimizarlos y/o implementarlos en la zona.

- La cianuración de oro presenta refractariedad debido a la presencia de arcillas y al tamaño de la partícula de oro.
- Las arcillas arrastran partículas de oro en cantidades considerables. Experimentalmente, este fenómeno alcanzó una proporción de hasta el 30% de oro en Guayacanes. En Mina Rica fue de 2%.
- El tamaño de las partículas de concentrados recomendado para llevar a cianuración debe ser inferior a 15 micras, y deben estar exentas de arcillas.

Según los resultados obtenidos, se puede implementar la flotación antes de la cianuración en el proceso de beneficio, lo cual mejorará el porcentaje de recuperación de oro mínimo de 53 a 79%. Este aumento en el porcentaje de recuperación es viable en el caso de estudio de Quinchía, sector de Miraflores.

Detalle de limpieza de oro libre o de fácil recuperación en batea.
Fotografía tomada por: Benedicto Galindo / Servicio Geológico Colombiano

8. ESTUDIO ECONÓMICO Y FINANCIERO

La toma de decisiones de inversión en proyectos de reconversión y modernización tecnológica de una empresa minera requiere un análisis económico y financiero riguroso, a fin de establecer la conveniencia de emprender el proyecto y efectuar una asignación eficiente de recursos.

En este capítulo se aportan los fundamentos teóricos y metodológicos mínimamente necesarios para que el minero pueda realizar un ejercicio de planeación y evaluación financiera de la operación futura de su planta de beneficio, después de haber implementado la ruta metalúrgica propuesta en esta guía.

8.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS PARA LA EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO

Esta primera sección se dedica al estudio de generalidades teóricas sobre los proyectos de inversión y al análisis de cada una de las etapas que comprende el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.

8.1.1. GENERALIDADES SOBRE LOS PROYECTOS DE INVERSIÓN

8.1.1.1 DEFINICIÓN

Un proyecto de inversión es un plan que contiene dos elementos esenciales: una serie de actividades secuenciales e interrelacionadas entre sí y la descripción del conjunto de recursos o medios necesarios para la materialización de una idea, la satisfacción de una necesidad o la solución de un problema. En este sentido, los proyectos constituyen un instrumento básico de información para la toma de decisiones de inversión.

8.1.1.2 CLASIFICACIÓN

En general, los proyectos de inversión se clasifican en tres campos:

- a) Según la categoría. De acuerdo con esta clasificación, los proyectos pueden ser de producción de bienes o de prestación de servicios. (En este caso, el proyecto es de producción de bienes).
- b) Según la actividad económica. Esta clasificación se efectúa con base en el sector económico que atiende el proyecto. (En este caso, el sector económico del proyecto es el de minería aurífera).
- c) Según el carácter y la naturaleza de la entidad que los promueva. De acuerdo con esta característica, los proyectos se clasifican en privados (con ánimo de lucro) y públicos (sin ánimo de lucro). (En este caso, el proyecto es de carácter privado con ánimo de lucro).

8.1.1.3. EL CICLO DE LOS PROYECTOS

El término *ciclo de vida* de un proyecto hace referencia al conjunto de etapas secuenciales que van desde su inicio hasta su cierre. En la formulación y evaluación de proyectos es indispensable disponer de información oportuna, confiable y suficiente en cada una de estas etapas, para que el inversionista pueda tomar decisiones acertadas.

Las etapas del ciclo de vida de los proyectos son la propuesta, la preinversión, la inversión y la operación.

- **La propuesta**

En esta etapa se realizan los estudios diagnósticos necesarios para identificar los problemas que requieren solución y las oportunidades de negocio que puedan aprovecharse. En el caso de los proyectos de modernización tecnológica, esta etapa corresponde a todos los estudios diagnósticos del sistema de operación que se realizan con el fin de identificar necesidades de reemplazo de maquinarias y equipos obsoletos y la sustitución de procesos.

- **La preinversión**

Esta etapa comprende la realización de estudios previos a la toma de decisiones de inversión. Por lo general, esta etapa se divide en dos fases: la formulación y la evaluación.

- **La formulación del proyecto:**

En la fase de formulación, los estudios técnicos que se efectúan tienen como objetivo fundamental establecer los mejores procedimientos para satisfacer la necesidad o solucionar los problemas previamente identificados, así como cuantificar los recursos necesarios para la puesta en marcha de la propuesta y, finalmente, estimar los ingresos y egresos que resultarán de la operación del proyecto.

La etapa de formulación del proyecto se puede desarrollar en dos niveles: prefactibilidad y factibilidad.

Los proyectos de inversión tienen varios orígenes. En el caso de los proyectos de innovación y modernización tecnológica, estos resultan de la necesidad de las empresas de aumentar su productividad, adoptar prácticas responsables con el medio ambiente y disminuir costos directos para competir eficientemente en el mercado con precio y calidad, y, a la vez, contribuir al desarrollo sostenible de la región en donde se desarrolla el proyecto.

Prefactibilidad

En los estudios de prefactibilidad, las investigaciones se realizan de forma preliminar a partir de información proveniente de fuentes primarias (trabajo de campo) y secundarias (bibliográficas). Vale la pena aclarar que en algunos casos la información secundaria es limitada, por lo cual es necesario realizar una investigación más profunda antes de decidir la elaboración de un estudio definitivo o de factibilidad.

Factibilidad

En los estudios de factibilidad, o definitivos, las investigaciones que se realizan son de mayor profundidad, puesto que la información resultante debe permitir la definición de estrategias definitivas para la materialización de la propuesta. Por lo general, los estudios de prefactibilidad o de factibilidad contienen los siguientes estudios:

- Estudio de mercado, que permite verificar la existencia de mercado para el bien o servicio, por medio del estudio de la demanda, la oferta y los precios del bien que se va a producir.
- Estudio técnico, que permite verificar la posibilidad técnica de fabricación del producto para alcanzar los objetivos del proyecto y descartar contingencias técnicas que impidan su implementación.
- Estudio organizacional, que permite verificar la mejor forma de organización o estructura empresarial del proyecto productivo, de acuerdo con sus características y necesidades específicas.

Teniendo en cuenta que el presente capítulo tiene por objetivo primordial aportar información suficiente al minero para que por su cuenta realice un ejercicio de planeación financiera, en la sección 8.1.2 se incluye una explicación detallada de cada una de las etapas que comprende el estudio y la evaluación financiera de proyectos de inversión.

- Estudio financiero, que permite cuantificar el monto de las inversiones necesarias para la puesta en marcha de la propuesta y definir los ingresos y egresos de operación durante el período de evaluación del proyecto. Para el efecto se considera toda la información proveniente de los estudios de mercado, el estudio técnico y el estudio organizacional.

La evaluación del proyecto

En esta fase se valora la viabilidad de la propuesta de inversión tomando como referencia la información contenida en cada uno de los informes técnicos. El objetivo fundamental de esta fase es evaluar la bondad financiera de las alternativas encontradas, con el fin de aceptarlas o rechazarlas, conforme a las exigencias de rentabilidad del inversionista.

• La inversión

En esta etapa se materializan las acciones contenidas en los estudios técnicos que se efectuaron en la etapa de preinversión, lo cual da como resultado la adquisición de bienes o servicios que servirán para satisfacer la necesidad o solucionar los problemas previamente identificados.

La etapa de inversión comprende el período en que se toma la decisión de ejecutar el proyecto (desembolso del dinero) y finaliza cuando el proyecto entra en operación.

• La operación

Esta etapa corresponde al período de permanente producción de bienes o prestación de servicios. En el caso de los proyectos de modernización tecnológica, la etapa de operación inicia en el momento en que se utiliza la maquinaria y se emplean procesos nuevos para la producción de bienes.

También puede definirse esta etapa, como la materialización del plan en hechos reales mediante la movilización de recursos humanos, financieros y logísticos que expresan salidas de dinero que están representadas en costos de producción y en ingresos, por la venta de los bienes o servicios.

8.1.2. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DE PROYECTOS DE INVERSIÓN

8.1 2.1. PROPÓSITO DEL ESTUDIO FINANCIERO

Como se había mencionado, el estudio financiero integra la información contenida en los demás estudios técnicos, y su objetivo primordial es cuantificar el monto de la inversión necesaria para la puesta en marcha de la propuesta, así como estimar los ingresos y egresos de la operación durante el período de evaluación del proyecto.

8.1.2.2. ETAPAS DEL ESTUDIO FINANCIERO

La elaboración del estudio financiero comprende tres etapas: a) inversión inicial, b) ingresos operacionales, y c) costos operacionales.

- **Inversión inicial**

Esta etapa consiste en la identificación y cuantificación monetaria de los costos de la inversión para la puesta en marcha de la propuesta. Estas inversiones están representadas en activos fijos y activos diferidos.

Activos fijos

Son aquellos activos tangibles que se utilizan de forma permanente en la producción de bienes y servicios. El costo de estos activos incluye, además de su precio de adquisición, los demás gastos en que incurre la empresa hasta dejarlos en condiciones de utilización. Algunos ejemplos de este tipo de activos son los terrenos, edificaciones, maquinaria y equipos, vehículos, minas y canteras, entre otros.

A su vez, estos activos fijos se subdividen en tres categorías: a) no depreciables (con vida útil ilimitada), b) depreciables (con vida útil limitada), y c) agotables (representados en recursos naturales cuya cantidad y valor disminuyen al ser extraídos).

Activos diferidos

Son aquellos activos o inversiones que se realizan en contratación de servicios o derechos que se requieren para la puesta en marcha del proyecto. Algunos ejemplos de este tipo de activos son las licencias ambientales para la explotación de recursos naturales, pago de estudios técnicos y pago de permisos o derechos adquiridos, entre otros.

- **Costos operacionales**

Representan el total que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por concepto del pago de salarios al personal y de todos los gastos relacionados con el desarrollo de la operación. En el caso de los proyectos que tienen como objeto la producción de bienes, los costos operacionales se subdividen en costos directos y costos indirectos.

Costos directos

Son aquellas erogaciones o gastos que tienen relación directa con la fabricación del producto. Algunos de estos están relacionados con materia prima, insumos, mano de obra directa (operarios), mantenimiento, depreciación de maquinaria y equipos, etc.

Costos indirectos

Son aquellas erogaciones o gastos que no se relacionan directamente con la fabricación del producto. Algunos de estos están relacionados con mano de obra indirecta (servicios de aseo y vigilancia), servicios públicos, arrendamiento de plantas, etc.

- **Ingresos operacionales**

Entrada de dinero a una empresa por la venta de sus productos, servicios y operaciones financieras, entre otros factores.

8.1.2.3. PROPÓSITO DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera de proyectos tiene como propósito fundamental determinar la conveniencia de emprender o no un proyecto, para lo cual es necesario valorar la rentabilidad de la inversión a la luz de las exigencias de rentabilidad propias del inversionista.

8.1.2.4. ETAPAS DE LA EVALUACIÓN FINANCIERA

La evaluación financiera de proyectos comprende esencialmente dos etapas: la construcción del flujo de caja del proyecto y la aplicación de métodos de evaluación para establecer la conveniencia de emprender o no un proyecto.

- **La construcción del flujo de caja del proyecto**

El flujo de caja constituye una herramienta esencial para la evaluación de proyectos, pues contiene el registro sistematizado de la información financiera necesaria para construir los indicadores de rentabilidad del proyecto. En efecto, esta herramienta permite determinar los flujos netos de efectivo que se utilizan en las técnicas de evaluación de proyectos.

La inversión en compra de maquinaria y equipos requeridos para la adecuación de la planta se recupera descontando su valor de las utilidades que se reportan a la DIAN para efectos de pagar el impuesto de renta.

Se puede precisar que una inversión es conveniente si al final del período de evaluación esta se logra recuperar con intereses y deja un excedente.

El valor anual del desgaste de la maquinaria y de los equipos por uso (depreciación) se debe incluir en el flujo de caja del proyecto como gasto deducible de los impuestos que hay que pagar.

Los componentes del flujo de caja son: a) inversión inicial del proyecto, b) ingresos y egresos reales de efectivo, c) depreciación y amortización, d) Impuestos causados y pagados.

Debe tenerse en cuenta que, en la construcción del flujo de caja se consideran los ingresos y egresos en el momento en que ocurren.

• Aplicación de métodos para evaluar proyectos de inversión

Entre los métodos más reconocidos para la evaluación financiera de proyectos de inversión se encuentran el valor presente neto (VPN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio-costos (RB/C).

El valor presente neto (VPN) es una cifra monetaria que resulta de comparar el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos, es decir, es el valor de la diferencia entre los ingresos y egresos del proyecto (flujos netos de efectivo), en pesos de la misma fecha.

Valor Presente Neto

El valor presente neto es una cifra monetaria que resulta de comparar el valor presente de los ingresos con el valor presente de los egresos, es decir, es el valor de la diferencia entre los ingresos y egresos del proyecto (flujos netos de efectivo), en pesos de la misma fecha.

Para comparar la diferencia de los ingresos y egresos del proyecto en pesos de una misma fecha se requiere trasladar estas cifras monetarias del futuro al presente, para lo cual es necesario definir una tasa de descuento.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando el VPN son los siguientes

- Si el VPN es mayor de cero, se acepta el proyecto (el inversionista gana más de lo que quería ganar: el VPN indica cuánto más ganó en pesos del presente).
- Si el VPN es igual a cero, es indiferente aceptar el proyecto (el inversionista gana lo que quería ganar después de recuperar la inversión inicial).
- Si el VPN es menor de cero, se rechaza el proyecto (el VPN indica la cantidad de dinero en pesos del presente que faltó para que el inversionista ganara lo que pretendía ganar —esto no indica pérdida—).

Tasa Interna de Retorno (TIR)

La tasa interna de retorno (TIR) es un indicador de rentabilidad financiera que indica hasta cuánto el inversionista podría aumentar su rendimiento a partir de lo invertido en el proyecto (tasa de descuento). En este caso, la TIR es la tasa que hace que el VPN sea igual a cero.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando la TIR son los siguientes

- Si la TIR es mayor que la tasa de descuento, se acepta el proyecto (el inversionista obtiene un rendimiento mayor del esperado).
- Si la TIR es igual a la tasa de descuento, es indiferente aceptar o no el proyecto (el inversionista es indiferente respecto a emprender o no el proyecto).
- Si la TIR es menor que la tasa de descuento, se rechaza el proyecto (el inversionista gana menos de lo que pretendía ganar).

Análisis de la Relación Beneficio – Costo (RB/C)

En este análisis se mide la relación beneficio-costos de un proyecto, que resulta de dividir la suma total de los ingresos del proyecto en el horizonte de evaluación (tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto) entre la sumatoria de los costos del mismo, ambas sumas en pesos de hoy.

Para calcular la relación beneficio-costos es necesario aplicar la fórmula del VPN para traer a valor presente los valores futuros de los ingresos y costos del proyecto.

Los criterios para aceptar o rechazar un proyecto utilizando la relación Beneficio – Costo (RB/C) son los siguientes

- Si la RB/C es mayor que uno, se acepta el proyecto (los beneficios son mayores que los costos, aún si se incluye la inversión inicial).
- Si la RB/C es igual a uno, es indiferente aceptar o no el proyecto (los beneficios son iguales a los costos).
- Si la RB/C es menor de uno, se rechaza el proyecto (los beneficios son menores que los costos).

8.2. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO – ZONA MINERA DE QUINCHÍA

En esta sección se enseña la metodología que se emplea en cada una de las etapas del estudio y evaluación financiera del proyecto, correspondiente a la zona minera de Quinchía (Vereda Miraflores), al mismo tiempo que se exponen las recomendaciones técnicas (provenientes de los estudios geológico, metalúrgico y químico - ambiental) que soportan la definición de las variables de operación de la planta de beneficio que representa las condiciones típicas de la zona y, se presentan los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y egresos de la operación futura, durante el horizonte de evaluación definido.

VARIABLES DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO – QUINCHÍA (VEREDA MIRAFLORES)

Para la realización del estudio se establecieron unas variables de operación de la planta de beneficio que fueron determinadas por el equipo técnico, a partir de la información recolectada en campo y los resultados de los estudios técnicos efectuados.

• Capacidad de procesamiento	1 t/h
• Funcionamiento de la planta	8 h/día
• Volumen de procesamiento	8 t/día
• Turnos por día	1 día
• Días de operación al mes	26 días
• Volumen de procesamiento	208 t/mes
• Tenor por tonelada de material de mina	4,3
• % Total de recuperación de oro	79%
• Recuperación total de oro	3.4 g/t

Las inversiones que se requieren para la adecuación de la planta (maquinaria y equipo, instalaciones eléctricas e hidráulicas y montaje de laboratorio) dependerán de las características de cada planta y de la negociación del minero con su proveedor.

8.2.1. ESTUDIO FINANCIERO

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente las inversiones en activos fijos y diferidos que se requieren para la puesta en marcha de la propuesta, como se explica enseguida.

8.2.1.1. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE LA INVERSIÓN INICIAL

ACTIVOS FIJOS

La inversión en activos fijos está representada en la adquisición de maquinaria y equipo (incluyendo el costo de instalaciones eléctricas e hidráulicas para su funcionamiento) y el costo del montaje del laboratorio.

- **Maquinaria y equipo**

Este rubro comprende el costo de la maquinaria y los equipos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están llevando a cabo en la operación actual de las plantas de beneficio, e implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica contenida en esta guía.

Para la definición de la maquinaria y los equipos que deben comprarse se partió del inventario inicial de las plantas de la zona, con el objetivo de no incurrir en costos innecesarios y optimizar, así, los recursos disponibles.

La puesta en marcha de la propuesta de modernización requiere la compra total de la maquinaria que se relaciona en seguida. Estas especificaciones técnicas corresponden a la capacidad de procesamiento de la planta de beneficio definida por el equipo técnico.

En la siguiente tabla se detalla la maquinaria y equipos nuevos que se requieren para cada proceso, de acuerdo al inventario inicial de la zona minera de Quinchía (Vereda Miraflores).

PROCESOS	MÁQUINA Y DESCRIPCIÓN	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	CANTIDAD
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Tolva para material triturado	4 m x 4m x 2m	1
	Caja de Pulpa	0,80m x0,80m x 1m	2
	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	2
	Hidrociclón 1	6"	1
	Hidrociclón 2	4"	1
CONCENTRACIÓN	Tanque acondicionador	1m3	1
	Celdas de flotación circulares	1,2 m	3
	Tanque espesador	2,5m	1
	Blower para sistema de aire	2,5HP; 120CFM	1
MANEJO AMBIENTAL	Tanques auxiliares de lámina para neutralización	D= 3m, H=3,5m	1

- **Instalaciones eléctricas e hidráulicas**

Este rubro comprende el costo de materiales y pago de honorarios del personal calificado que llevará a cabo las adecuaciones eléctricas e hidráulicas necesarias para la instalación y puesta en funcionamiento de la maquinaria y equipos nuevos. (La descripción del alcance del trabajo de instalaciones eléctricas puede consultarse en el Informe técnico que soporta la presente guía).

- **Montaje de laboratorio**

Este rubro comprende el costo del montaje del laboratorio requerido para obtener información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones implicadas en el proceso y de los impactos ambientales de tipo químico que se estén causando con el proceso de beneficio.

Para el desarrollo de la explotación minera y el beneficio de oro se debe contar con dos criterios básicos. 1) trabajar bajo el amparo de un título minero y 2) contar con un instrumento ambiental.

ACTIVOS DIFERIDOS

La adquisición del siguiente activo diferido está sujeta a las condiciones propias de cada planta.

- **Licencia ambiental**

Este rubro comprende el costo de los estudios previos que se deben realizar para tramitar la solicitud de la licencia ambiental y el valor que se debe pagar a la autoridad ambiental competente, una vez sea aprobada la licencia.

8.2.1.2. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE COSTOS DE OPERACIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente cada uno de los costos (directos e indirectos) de la operación de la planta de beneficio, conforme a la ruta metalúrgica propuesta.

De acuerdo con el diagrama de operaciones de la ruta metalúrgica propuesta (diagrama7.3.), los costos de operación se cuantificaron y clasificaron para cada uno de los siguientes procesos:

- Trituración y molienda
- Concentración (gravimétrica y por flotación)
- Cianuración
- Fundición
- Manejo ambiental

COSTOS DIRECTOS

Los costos directos del proceso de beneficio tienen que ver con la adquisición de materia prima e insumos, la contratación de mano de obra, mantenimiento de maquinaria y equipos, análisis y pruebas de laboratorio, pago de servicios públicos (energía eléctrica y agua) y depreciación de bienes físicos.

- **Materia prima**

El costo de materia prima corresponde al valor que se debe pagar por cada tonelada de material de mina (mineral) puesto en tolva. En este ejercicio, el costo de la materia prima se estimó en un porcentaje equivalente al 30 % del valor de venta final del oro que se recupera por cada tonelada de material procesado.

Fórmula para calcular el costo de la materia prima

Costo de material de mina (\$/t) = Au recuperado (g/t) × precio de venta (\$) × 30%

- **Insumos**

Respecto al rubro de insumos, se tiene en cuenta el costo de los reactivos y elementos químicos que se emplean en cada proceso, según se detalla en la siguiente tabla:

PROCESOS	DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CONSUMO / TONELADA*	CONSUMO MENSUAL**
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Cuerpos moledores	kg	1	208,00
	Revestimientos trituradora primaria	kg	1	208,00
	Revestimientos molino primario	kg	1	208,00
	Tambor remolador	kg	0,9	187,20
CONCENTRACIÓN	Aero 7020 (contratipo A31)	kg	0,045	9,36
	Aero 8255 (contratipo A31)	kg	0,045	9,36
	Xantato isopropilico Z6	kg	0,085	17,68
	Espumante Aero-Froth65	kg	0,04	8,32
	Sulfato de cobre	kg	0,05	10,40
	Cianuro de sodio (NaCN)	kg	4	832,00
CIANURACIÓN	Cal (CaO)	kg	4	832,00
	Hidróxido de sodio (Potasa)	kg	0,0391	8,13
	Acetato de plomo	kg	0,003	0,62
	Polvo de zinc	kg	0,024	4,99
	Xelite (diatomita)	kg	0,013	2,70
	Bórax	kg	0,044	9,15
FUNDICIÓN	Carbonato de sodio	kg	0,008	1,66
	Silice	kg	0,025	5,20
	Floculante	kg	0,004	0,83
MANEJO AMBIENTAL	Ácido sulfúrico	kg	0,3	62,40
	Peróxido de hidrógeno	kg	0,23	47,84

Nota: (*) La dosificación por tonelada fue determinada por el Equipo Técnico. (**) La cantidad consumida mes se estimó para 208 toneladas, conforme a las variables de operación de la planta.

- **Mano de obra**

En este rubro se cuantifica el pago mensual de los salarios del personal vinculado a la operación, los aportes a seguridad social que deben ser asumidos por el empleador con base en la ley 100 de 1993 (Salud Pensión y ARP), los aportes para-fiscales que deben destinarse al Instituto de Bienestar Familiar (ICBF), al SENA y a las Cajas de Compensación Familiar, así como la respectiva provisión mensual para el pago de las prestaciones sociales (prima, vacaciones, cesantías, e intereses de cesantías).

Salarios de los empleados:

El costo de mano de obra se calcula para un total de tres empleados, conforme a la distribución de operarios por proceso y la asignación salarial, que se muestran en la siguiente tabla:

PROCESO	CARGO	CANTIDAD DE OPERARIOS	SUELDO BÁSICO X MES (COP)	AUX. TRANSPORTE X MES (COP)	SALARIO TOTAL X MES (COP)*
Trituración y molienda	Operario	1	\$ 781.242	\$ 88.211	\$ 869.453
Concentración	Operario	1	\$ 781.242	\$ 88.211	\$ 869.453
Cianuración	Operario	1	\$ 781.242	\$ 88.211	\$ 869.453
Total:					\$ 2.608.359

Nota: (*) El salario total asignado para los operarios corresponde al valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia para 2018. El operario del proceso de cianuración se encarga del proceso de neutralización.

Aportes al Sistema General de Seguridad Social (SGSS)

El cálculo de aportes a cargo del empleador, con destino al Sistema General de Seguridad Social se realizó con base en los sueldos básicos por mes que se indicaron en la tabla anterior.

Fórmula para calcular los aportes a seguridad social

Aportes a seguridad social (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aportes (EPS, pensión, ARL)

Aportes parafiscales

El cálculo de aportes parafiscales que corresponden a una contribución obligatoria del empleador con destino al Servicio Nacional de Aprendizaje, al Instituto Colombiano de Bienestar Familiar y a las cajas de compensación familiar, con el propósito de que dicho aporte permita a estas entidades ejecutar las labores para las cuales fueron creadas, se estimó conforme a los salarios básicos asignados a los empleados.

Fórmula para calcular los aportes a parafiscales

Aportes parafiscales (\$/mes) = sueldo básico (\$) × % aporte (SENA, ICBF, CCF)

Prestaciones sociales

El cálculo de la provisión mensual sobre el valor de la nómina, para el pago de prestaciones sociales a los trabajadores, se estimó con base en el salario mensual total asignado a cada operario.

Fórmula para calcular la provisión.

Provisión mes = salario total (\$) × % de carga prestacional (prima, vacaciones, cesantías)

Fórmula para calcular la provisión para intereses de cesantías.

Provisión mes intereses de cesantías = cesantías (\$) x 12 %

El cálculo de los aportes al SGSS y contribuciones parafiscales se debe realizar sobre la base del sueldo básico, es decir, sin tener en cuenta el auxilio de transporte. En tanto que la liquidación de las prestaciones sociales se debe tomar como base del cálculo del salario total, esto es, el sueldo básico más auxilio de transporte.

CONCEPTO	APORTE SGSS COP (\$)	DESCRIPCIÓN
EPS (salud)	\$66,406	Aporte total: \$97.655 Empleador: (8,5%) \$66,406 Trabajador: (4%) \$31,250
Pensión (AFP)	\$93,749	Aporte total: \$ 124.999 Empleador: (12%)\$93,749 Trabajador: (4%)\$31,250
ARL	\$ 54,374	Riesgo V (6,96%): \$ 54,374 Empleador \$54.374
Total:	214.529	

Cálculo con base en Ley 100 de 1993, valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia para 2018.

CONCEPTO	APORTES PARAFISCALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Caja de Compensación Familiar	\$ 31.250	4% a cargo del empleador
ICBF	\$ 23.437	3% a cargo del empleador
SENA	\$ 15.625	2% a cargo del empleador
Total:	\$70.312	

Cálculo con base en % establecidos en Código Sustantivo del Trabajo, valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia para 2018.

CONCEPTO	PRESTACIONES SOCIALES COP(\$)	DESCRIPCIÓN
Cesantías (8,33%)	\$72.425	Equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado.
Intereses de cesantías (12%)	\$ 8.691	Corresponde al 12% sobre el valor a pagar de las cesantías.
Prima de servicios (8,33%)	\$72.425	Equivale a un mes de salario por cada año trabajado o según el tiempo laborado.
Vacaciones (4,17%)	\$ 36.256	La Ley del Trabajo establece 15 días hábiles consecutivos de vacaciones anuales remuneradas.

Cálculo con base en Ley 1607 de 2012, valor del salario mínimo mensual vigente en Colombia para 2018.

MANTENIMIENTO DE LOS BIENES FÍSICOS

En este rubro se cuantifican todos los gastos necesarios para conservar la maquinaria y equipos en buenas condiciones, a efectos de que trabajen con rendimiento normal durante su vida útil.

El costo del mantenimiento de la maquinaria y de los equipos se estableció como un porcentaje equivalente a 0.75% del valor comercial de la maquinaria. (Este valor incluye el costo del mantenimiento preventivo y correctivo y la compra de repuestos).

Fórmula para calcular el costo de mantenimiento

Costo de mantenimiento (\$) = valor comercial total (\$) x 0.75%

ANÁLISIS Y PRUEBAS DE LABORATORIO

Este rubro comprende el costo de los ensayos de laboratorio que deben realizarse cada mes con el objetivo de disponer de información oportuna y veraz acerca de la eficiencia de las operaciones en cada uno de los procesos, así como de los impactos ambientales de tipo químico que se estén generando.

En la siguiente tabla se relacionan los tipos de ensayos, tipos de muestras y cantidades mínimas que se deben realizar en cada mes de la operación.

PROCESOS	TIPO DE ENSAYO	TIPO DE MUESTRA	CANTIDAD (UNIDAD/MES)
TRITURACIÓN	Ensayos al fuego	Cabeza general	4
	Ensayos al fuego	Cola de flotación	4
CONCENTRACIÓN	Ensayos al fuego	Concentrado de mesa	4
	Ensayos al fuego	Superconcentrado	4
	Ensayos al fuego	Cola de cianuración	4
CIANURACIÓN	Absorción atómica	Oro en solución de cianuración	4
	Absorción atómica	Oro en solución pobre	4
	Absorción atómica	Zinc en solución pobre	1
	Absorción atómica	Cobre en solución	1
FUNDICIÓN	Ensayos al fuego	Fundido	4
MANEJO AMBIENTAL	Absorción atómica	Ambientales	4

SERVICIOS PÚBLICOS

Es necesario precisar que en los costos indirectos de fabricación (CIF) usualmente se tienen en cuenta los costos de los servicios públicos. Sin embargo, en este ejercicio financiero se clasifica el costo del consumo de agua y energía como costos directos del proceso de operación, con el objetivo de establecer un punto de referencia para evaluar el aumento de consumo de energía que se generaría en la planta, a partir de la implementación de la propuesta tecnológica y estimar el costo del consumo de agua en el proceso de beneficio.

• Costo de energía eléctrica

En este rubro se cuantifica el costo de la energía eléctrica mensual que se consume en el proceso de beneficio.

El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia nominal de los motores empleados en la planta y el número de horas al día que se utilizarían, de acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio. La siguiente tabla contiene el detalle del consumo de energía eléctrica por mes para cada equipo.

El costo total por energía eléctrica mensual se calcula con base en el consumo en kWh-mes, y la tarifa por kW que se paga a la empresa que suministra el servicio.

Fórmula para calcular el costo mensual de energía eléctrica

Costo de la energía eléctrica (\$) = consumo energía (kWh-mes) × tarifa kW (\$)

PROCESOS	EQUIPO	ESPECIFICACIÓN TÉCNICA	POTENCIA MOTOR (HP)	POTENCIA MOTOR (kW)	CANTIDAD	HORAS DE TRABAJO	kW/DÍA	kW/MES
TRITURACIÓN Y MOLIENDA	Trituradora de mandíbulas	12cm x 25cm	5	3,75	1	8	30	780
	Molino de bolas primario	0,7m x 1,60m	10	7,5	1	8	60	1.560
	Molino de bolas secundario	0,7m x 1,2 m	10	7,5	1	8	60	1.560
	Bomba de sólidos	2,5" x 2"	7,5	5,625	2	8	90	2.340
	Total trituración y molienda							6.240
CONCENTRACIÓN	Mesa de concentración primaria	1,50 m x 3 m	2	1,5	1	8	12	312
	Mesa de concentración secundaria	1,50 x 3 m	2	1,5	1	8	12	312
	Celdas de flotación circulares	1,2 m	7,5	5,625	3	8	135	3.510
	Tanque espesador	2,5m	2	1,5	1	8	12	312
	Jig		0,5	0,375	1	8	3	78
	Tanque acondicionador	1m ³	5	3,75	1	8	30	780
	Bomba recirculación agua	2	2	1,5	1	8	12	312
Blower para sistema de aire	120 CFM	2,5	1,875	1	8	15	390	
	Total concentración							6.006
CIANURACIÓN	Tanque agitación (Lixiviación)	D= 3 m; H= 3 m	15	11,250	2	8	180	4.680
	Merril Crowe	5	5	3,75	1	5	18,75	488
	Bomba soluciones	3	3	2,25	1	5	11,25	293
	Total cianuración							5.460
MANEJO AMBIENTAL	Tanque agitado para neutralización	D= 3 m; H = 3 m	12	9	1	8	72	1.872
	Bombas para recirculación aguas	5 HP	3	2,25	1	8	18	468
	Total manejo ambiental							2.340
TOTAL								20.046

• Costo del agua

En este rubro se cuantifica el costo por consumo de agua en el proceso de beneficio de la planta, de acuerdo con la tarifa reportada por la empresa prestadora del servicio en la zona.

Para determinar la cantidad de agua que se consume en el proceso de beneficio de la planta, el equipo técnico realizó un ejercicio experimental basándose en un balance de masa hídrico, mediante el cual se logró establecer que el consumo específico de agua por tonelada de mineral procesado es de 0.53 m³.

Fórmula empleada para calcular el costo mensual de agua

Costo del agua (\$) =
consumo de agua (m³/mes) × tarifa m³ (\$)

DEPRECIACIÓN

En este rubro se cuantifica la disminución del valor original de la maquinaria como consecuencia de su uso durante su tiempo de vida útil. Debe tenerse en cuenta que, pese a que la depreciación no representa una salida de efectivo, este mecanismo debe considerarse a efectos de recuperar la inversión en activos fijos.

El valor de depreciación mensual de cada equipo se estimó por medio del método en línea recta, utilizando como referencia un tiempo de vida útil de diez años.

El método de línea recta está reconocido por la DIAN para efectos de descontar el valor de la depreciación de la base de cálculo del impuesto de renta y complementarios.

Fórmula para calcular la depreciación de la maquinaria y equipo

Costo depreciación (\$) = valor comercial del equipo (\$) / tiempo de vida útil (meses)

COSTOS INDIRECTOS

En este análisis, los costos indirectos de fabricación (CIF) se calculan en un 10% de la suma de los costos directos de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular los CIF

$\text{CIF (\$)} = \text{valor de costos directos (\$)} \times 10\%$

El costo e ingreso unitario, es decir, el valor por cada gramo de oro, se calcula dividiendo el valor de los costos totales del mes sobre el número de gramos recuperados y viceversa.

COSTOS TOTALES

Los costos totales de la operación mensual de la planta de beneficio se determinan mediante la suma de los costos directos e indirectos.

Fórmula para calcular el costo total

$\text{Costos totales mensuales (\$)} = \text{total de los costos directos mensuales (\$)} + \text{total de los costos indirectos mensuales (\$)}$

8.2.1.3. IDENTIFICACIÓN Y VALORACIÓN DE INGRESOS DE OPERACIÓN

En esta etapa se identificaron y valoraron monetariamente los ingresos mensuales que se obtienen de la operación de la planta de beneficio. Para esto se debe multiplicar la cantidad de oro producido en gramos por el precio al que se vende cada gramo de oro.

Fórmula utilizada para determinar la cantidad de oro que se recupera por cada tonelada de material procesado

$\text{Oro recuperado} \times t \text{ (g)} = \text{tenor (g)} \times \% \text{ de recuperación total}$

CANTIDAD DE MATERIAL PROCESADO (t)	RECUPERACIÓN TOTAL (%)*	CANTIDAD RECUPERADA (g/t)
1	100	4,3
1	79,0	3,4

(*) Con la implementación de la propuesta tecnológica se puede alcanzar mínimo un 79% de recuperación de oro por tonelada.

(**) Para la zona minera de Quinchía (Vereda Miraflores) se determinó un tenor de 4,3 gramos, por tonelada.

Una vez se ha determinado la cantidad de oro recuperado por cada tonelada de material de mina procesada, se emplea la siguiente fórmula para establecer la cantidad de oro que se produce en un mes:

$\text{Producción de oro (g)} = \text{oro recuperado (g)} \times \text{material de mina procesado mensualmente (t)}$

Finalmente, se utiliza la siguiente fórmula para determinar los ingresos mensuales por la venta de oro producido

$\text{Ingresos totales mensuales (\$)} = \text{producción mensual de oro (g)} \times \text{precio del oro (\$/g)}$

8.2.2 EVALUACIÓN FINANCIERA

En esta sección se presenta la metodología que se emplea en las dos etapas de la evaluación financiera, y, se exponen los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación, durante el horizonte definido para la evaluación del proyecto.

Recordemos que, la evaluación financiera de proyectos comprende esencialmente dos etapas: la construcción del flujo de caja del proyecto y la aplicación de métodos de evaluación, para establecer la conveniencia de emprender o no un proyecto.

8.2.2.1 CONSTRUCCIÓN DEL FLUJO DE CAJA DEL PROYECTO

El tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto, u horizonte de evaluación del proyecto, es de cinco años.

A continuación se explican cada uno de los componentes del flujo de caja y los supuestos que se utilizaron para la proyección de ingresos y costos de operación de la planta de beneficio, en cada uno de los años que comprende el horizonte de evaluación.

INVERSIÓN INICIAL

El monto de la inversión inicial se registra en la estructura del flujo de caja en el año cero. Esto se debe a que la inversión se realiza antes de poner en marcha el proyecto.

INGRESOS GRAVABLES

Los ingresos gravables que se registran en el flujo de caja del proyecto son los mismos ingresos operacionales que resultan de la venta de oro producido en cada año.

- **Supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de los ingresos gravables**

La producción anual se mantiene constante en el horizonte de evaluación del proyecto (cada año se produce la misma cantidad de oro). A partir del segundo año, el precio del oro aumenta en una proporción del 3% anual.

Fórmula para calcular los ingresos gravables anuales

Ingresos gravables en el año 1 (\$) = producción de oro en el año 1 (g) × precio del oro en el año 1 (\$/g)

EGRESOS DEDUCIBLES

Los egresos deducibles que se registran en el flujo de caja del proyecto son los costos de operación, la depreciación y el pago de regalías.

La tasa para la liquidación de regalías por explotación de oro es del 4% sobre la producción en boca de mina.

Fórmula para la liquidación de las regalías

Regalías del año 1 (\$) = (producción de oro año 1 (g) × precio fijado por el Banco de la República en el año 1 (\$/g)) * 4%

- **Supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de los egresos deducibles**

- A partir del 2.º año, el costo de la materia prima (material de mina) aumenta en una proporción del 3% anual.
- A partir del 2.º año, el costo de los insumos aumenta en una proporción del 2% anual.
- A partir del 2.º año, el costo de mano de obra aumenta en una proporción del 4% anual.
- A partir del 2.º año, el precio para la liquidación de las regalías aumenta en una proporción de 3% anual.

Los demás costos de operación (mantenimiento, análisis y pruebas de laboratorio, servicios públicos y costos indirectos de fabricación) permanecen constantes en el horizonte de evaluación del proyecto, es decir que para cada año el costo es el mismo.

Las regalías son una contraprestación económica que recibe el Estado por la explotación de un recurso natural no renovable cuya producción se extingue con el transcurso del tiempo. De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de las Constitución Política, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación económica.

UTILIDAD OPERACIONAL

La utilidad operacional es la ganancia obtenida por la empresa, antes del pago de impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad antes de pagar impuestos

Utilidad operacional del primer año (\$) = ingresos gravables en el primer año (\$) - egresos deducibles en el primer año (\$)

MARGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio.

Fórmula para calcular el margen de utilidad operacional

Margen de utilidad operacional del primer año (%) = (utilidad operacional en el primer año (\$) / ingresos gravables en el primer año (\$)) × 100

IMPUESTOS

En el flujo de caja del proyecto se debe estimar el impuesto de renta, que corresponde al impuesto que grava todos los ingresos que obtenga un contribuyente en el año, que sean susceptibles de producir incremento neto del patrimonio en el momento de su percepción, siempre que no hayan sido expresamente exceptuados, y considerando los costos y gastos en que se incurre para producirlos.

En la última reforma tributaria, contenida en la Ley 1819 del 29 de diciembre de 2016, se estableció el 33% como tarifa general del impuesto de renta para las personas jurídicas.

Fórmula para calcular el impuesto de renta

Impuesto de renta del primer año (\$) = utilidad antes de pagar impuestos (\$) × 33%

UTILIDAD NETA

La utilidad neta es la ganancia obtenida por la empresa después de haber pagado impuestos.

Fórmula para calcular la utilidad neta

Utilidad neta del primer año (\$) = utilidad operacional en el primer año (\$) – impuesto de renta del primer año (\$)

MARGEN DE UTILIDAD NETA

Este indicador determina el porcentaje que queda por cada peso de venta, después de deducir todos los costos y gastos de la operación de la planta de beneficio, incluyendo el pago de impuesto de renta.

Fórmula para calcular el margen de utilidad neta

Margen de utilidad neta del primer año (%) = (utilidad neta en el primer año (\$) / ingresos gravables en el primer año (\$)) × 100

FLUJO NETO DE EFECTIVO

Los flujos netos de efectivo son los beneficios futuros que genera el proyecto en cada año que comprende el horizonte de evaluación.

Fórmula para calcular el flujo neto de efectivo

Flujo neto de efectivo en el primer año (\$) = utilidad neta en el primer año (\$) + depreciación en el primer año (\$)

8.2.2.2 APLICACIÓN DE MÉTODOS PARA EVALUAR PROYECTOS

En seguida se presentan las fórmulas que se emplearon para calcular los indicadores de evaluación financiera del proyecto.

VALOR PRESENTE NETO (VPN)

Para el cálculo del VPN se utilizaron dos tasas de descuento: la primera equivalente al 20% y la segunda, del 25%. Recordemos que la tasa de descuento (TD) se utiliza para trasladar los flujos netos de efectivo del futuro al presente.

Fórmula para calcular el VPN

$$\text{VPN} = - \text{Inversión inicial } (\$) + \frac{\text{FNE } (\$)_{\text{año 1}}}{(1 + \text{TD})^1} + \frac{\text{FNE } (\$)_{\text{año 2}}}{(1 + \text{TD})^2} \dots \frac{\text{FNE } (\$)_{\text{año 5}}}{(1 + \text{TD})^5}$$

TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)**Fórmula para calcular la TIR**

$$\text{TIR} = \frac{- \text{Inversión Inicial } (\$) + \sum_{t=1}^5 \text{FNE } (\$)}{\sum_{t=1}^5 (\text{TD}(\%) * \text{FNE}(\$))}$$

RELACIÓN BENEFICIO-COSTO (RB/C)

Antes de calcular la relación Beneficio - Costo se requiere estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos. Para esto se utilizaron dos tasas de descuento: la primera, equivalente al 20%, y la segunda, del 25%.

Fórmulas para calcular el valor presente de los beneficios y de los costos

$$\text{VPN Ingresos} = \frac{\text{Ingresos operacionales año 1}}{(1+TD)^1} + \frac{\text{Ingresos operacionales año 2}}{(1+TD)^2} \dots \frac{\text{Ingresos operacionales año 5}}{(1+TD)^5}$$

$$\text{VPN Costos} = \frac{\text{Costos operacionales año 1}}{(1+TD)^1} + \frac{\text{Costos operacionales año 2}}{(1+TD)^2} \dots \frac{\text{Costos operacionales año 5}}{(1+TD)^5}$$

Después de estimar el valor presente neto (VPN) de los beneficios y de los costos, se procede a calcular la relación beneficio - costo (RB/C).

Fórmula para calcular la relación beneficio-costo (RB/C)

$$\text{Relación Beneficio - Costo} = \frac{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN}) \text{ Ingresos}(\$)}{\sum_{t=1}^5 (\text{VPN}) \text{ Costos}(\$)}$$

*En los costos operacionales no se tiene en cuenta la depreciación de los bienes físicos y la maquinaria.

8.3. ESTUDIO Y EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA

En esta sección se presentan los resultados de la estimación del monto de recursos económicos que se requieren para la inversión inicial, los costos totales y el valor de la producción en función de los parámetros de operación definidos para la planta, y los indicadores que comprueban la viabilidad financiera del proyecto, acorde con las condiciones iniciales de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores).

Inversión inicial

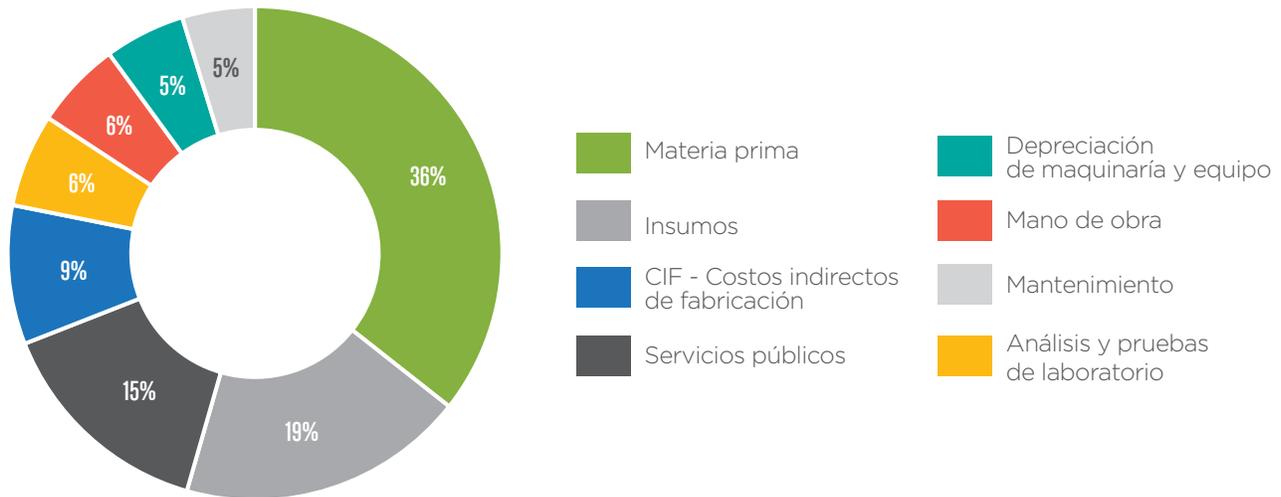
DESCRIPCIÓN	COSTO	% PARTICIPACIÓN EN INVERSIÓN
Activos fijos		
Maquinaria y equipo	\$ 329.987.000	87%
Instalaciones eléctricas e hidráulicas	\$ 50.000.000	13%
Total activos fijos	\$ 379.987.000	100%

Los precios cotizados se encuentran detallados en el informe técnico.

Costo operación - mes

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
Costos directos	
Materia prima	\$ 25.111.358
Insumos	\$ 13.263.537
Mano de obra	\$ 4.032.276
Mantenimiento	\$ 3.351.015
Análisis y pruebas de laboratorio	\$ 4.300.000
Servicios públicos	\$ 10.294.222
Depreciación de maquinaria y equipo	\$ 3.723.350
Total costos directos	\$ 64.075.758
Costos indirectos	
CIF - Costos indirectos de fabricación	\$ 6.407.576
Total costos indirectos	\$ 6.407.576
Total costos: (directos + indirectos)	\$ 70.483.334

Estructura de costos de operación futura - Planta de Beneficio Modelo



Ingresos de operación – mes

PROCESO	RECUPERACIÓN DE ORO %	RECUPERACIÓN DE ORO (gr/t)	PRODUCCIÓN DE ORO (gr/mes)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/gr)*	COP (\$)
Concentración gravimétrica	70	3,01	626	\$ 118.465	\$ 74.168.567
Cianuración	9	0,39	80	\$ 118.465	\$ 9.535.959
Total:	79	3,40	707	\$ 118.465	\$ 83.704.526

*Corresponde al precio promedio internacional en 2017.

Fuente: cálculo propio con base en información Equipo Técnico y Banco de la República de Colombia.

Flujo de caja del proyecto (5 años)

CONCEPTO	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
(1) INVERSIÓN INICIAL (-)						
Activos fijos	\$ 379,987,000					
Activos diferidos						
TOTAL INVERSIÓN INICIAL	- \$ 379,987,000					
(2) INGRESOS GRAVABLES (+)						
Ingresos operacionales		\$ 1,004,454,310	\$ 1,034,587,939	\$ 1,065,625,578	\$ 1,097,594,345	\$ 1,130,522,175
(3) EGRESOS DEDUCIBLES (-)						
Costos operacionales		\$ 801,119,808	\$ 816,694,521	\$ 832,722,750	\$ 849,218,252	\$ 869,911,115
Depreciación		\$ 44,680,200	\$ 44,680,200	\$ 44,680,200	\$ 44,680,200	\$ 44,680,200
Regalías		\$ 32,142,538	\$ 33,106,814	\$ 34,100,018	\$ 35,123,019	\$ 36,176,710
TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES		\$ 877,942,546	\$ 894,481,535	\$ 911,502,969	\$ 929,021,471	\$ 950,768,025
(4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS		\$ 126,511,764	\$ 140,106,404	\$ 154,122,609	\$ 168,572,874	\$ 179,754,151
(5) MÁRGEN UTILIDAD OPERACIONAL		12.6%	13.5%	14.5%	15.4%	15.9%
(6) IMPUESTOS (-)						
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)		\$ 41,748,882	\$ 46,235,113	\$ 50,860,461	\$ 55,629,048	\$ 59,318,870
TOTAL IMPUESTOS		\$ 41,748,882	\$ 46,235,113	\$ 50,860,461	\$ 55,629,048	\$ 59,318,870
(7) UTILIDAD NETA		\$ 84,762,882	\$ 93,871,291	\$ 103,262,148	\$ 112,943,825	\$ 120,435,281
(8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA		8.4%	9.1%	9.7%	10.3%	10.7%
(9) DEPRECIACIÓN (+)		\$ 44,680,200				
(10) FLUJO NETO DE EFECTIVO	- \$ 379,987,000	\$ 129,443,082	\$ 138,551,491	\$ 147,942,348	\$ 157,624,025	\$ 165,115,481

8.3.1 RESULTADOS E INTERPRETACIÓN DE INDICADORES DE EVALUACIÓN FINANCIERA - ZONA MINERA DE QUINCHÍA

El VPN del proyecto, a una tasa de descuento del 25%, correspondiente a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), es de seis millones seiscientos cincuenta y cuatro mil setecientos cuarenta y cuatro pesos m. cte. (\$6654744).

El VPN del proyecto, a una tasa de descuento del 20%, correspondiente a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), es de cincuenta y dos millones ochenta y cuatro mil doscientos catorce pesos m. cte. (\$52084.214).

Teniendo en cuenta que el VPN es mayor que cero (para ambas tasas de descuento), se concluye que el proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, pues los dineros invertidos en el proyecto rinden más que estas tasas de interés de oportunidad.

La TIR del 26% anual es mayor que las dos tasas de interés de oportunidad del inversionista, definidas en este proyecto como el 20 y 25% anual. Se concluye que este proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, en la medida que los dineros que permanecen invertidos en el proyecto rinden a una tasa del 26% anual.

Para este proyecto, la relación beneficio-costos (RB/C), a tasas de interés de oportunidad del 20 y 25%, es de 1.22 en ambos casos. De este resultado se concluye que el proyecto se justifica desde el punto de vista financiero, pues los beneficios son mayores que los costos.

Indicadores de evaluación financiera - Proyecto zona minera de Quinchía

INDICADOR	TD 20%	TD 25%
Valor presente neto (VPN)	COP \$ 52.084.214 USD* \$ 17.361	COP \$ 6.654.744 USD* \$ 2.218
Tasa interna de retorno (TIR)	26%	26%
Relación beneficio / costo (RB/C)	1,22	1,22

Tasa de cambio utilizada COP \$3000/USD.

8.4. ESTUDIO FINANCIERO OPERACIÓN ACTUAL VS OPERACIÓN FUTURA - ZONA MINERA DE QUINCHÍA

En esta sección se exponen los resultados del estudio financiero de la operación actual de la planta que corresponde a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) a partir de los cuales se estableció una base de comparación (en términos de porcentaje de recuperación, cantidad de oro recuperado, costo unitario de producción, margen de utilidad operacional y de utilidad neta), para analizar la viabilidad económica de la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

VARIABLES DE OPERACIÓN DE LA PLANTA DE BENEFICIO ACTUAL

• Capacidad de procesamiento	0.63 t/h
• Funcionamiento de la planta	8 h/día
• Volumen de procesamiento	5 t/día
• Turnos por día	1 día
• Días de operación al mes	26 días
• Volumen de procesamiento	130 t/mes
• Tenor por tonelada de material de mina	4,3
• % Total de recuperación de oro	53%
• Recuperación total de oro	2.28 g/t

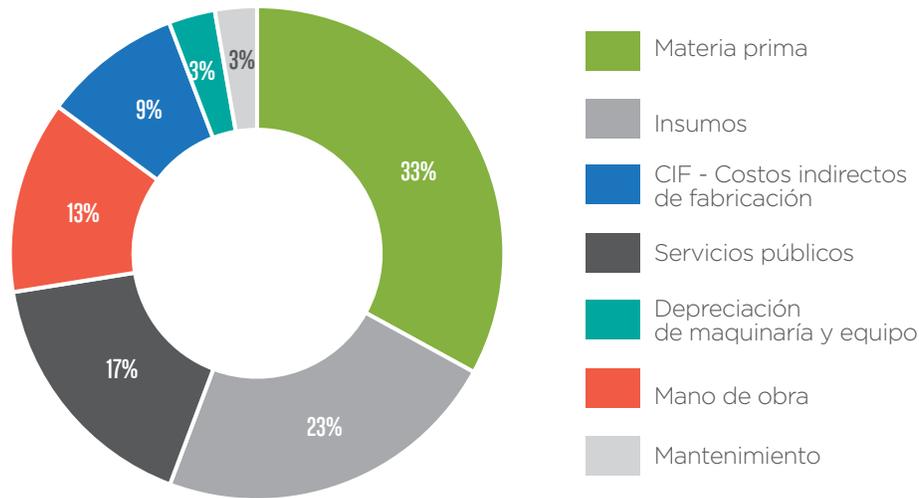
Costo operación - mes planta actual

DESCRIPCIÓN	COP (\$)
Costos directos	
Materia prima	\$ 10.529.288
Insumos	\$ 7.262.910
Mano de obra	\$ 4.032.276
Mantenimiento	\$ 876.113
Servicios públicos	\$ 5.345.734
Depreciación de maquinaria y equipo	\$ 973.458
Total costos directos	\$ 29.019.778
Costos indirectos	
CIF - Costos indirectos de fabricación	\$ 2.901.978
Total costos indirectos	\$ 2.901.978
Total costos: (directos + indirectos)	\$ 31.921.756

Debe tenerse en cuenta que la información de la operación actual de la planta de beneficio típica de la zona, se construyó a partir de pruebas de laboratorio efectuadas por el equipo técnico con base en información recolectada en trabajo de campo.

8.4.1 RESULTADOS DE LA OPERACIÓN ACTUAL

Estructura de costos de operación actual



Ingresos de operación actual – mes

PROCESO	RECUPERACIÓN DE ORO %	RECUPERACIÓN DE ORO (g/t)	PRODUCCIÓN DE ORO (gramos)	PRECIO UNITARIO DE ORO (\$/g)*	COP (\$)
Concentración gravimétrica	43	1,85	240	\$ 118.465	\$ 28.475.432
Cianuración	10	0,43	56	\$ 118.465	\$ 6.622.194
Total:	53	2,28	296		\$ 35.097.626

Nota: (*) Corresponde al precio promedio internacional en 2017.

Fuente: cálculo propio con base en información equipo técnico y Banco de la República de Colombia

Flujo de caja de la operación actual (5 años)

CONCEPTO	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
(2) INGRESOS GRAVABLES (+)					
Ingresos operacionales	\$ 421,171,507	\$ 433,806,652	\$ 446,820,851	\$ 460,225,477	\$ 474,032,241
(3) EGRESOS DEDUCIBLES (-)					
Costos operacionales	\$ 371,379,569	\$ 379,595,617	\$ 388,060,263	\$ 396,781,432	\$ 407,802,084
Depreciación	\$ 11,681,500	\$ 11,681,500	\$ 11,681,500	\$ 11,681,500	\$ 11,681,500
Regalías	\$ 13,477,488	\$ 13,881,813	\$ 14,298,267	\$ 14,727,215	\$ 15,169,032
TOTAL EGRESOS DEDUCIBLES	\$ 396,538,558	\$ 405,158,930	\$ 414,040,030	\$ 423,190,147	\$ 434,652,616
(4) UTILIDAD ANTES DE IMPUESTOS	\$ 24,632,949	\$ 28,647,722	\$ 32,780,822	\$ 37,035,330	\$ 39,379,625
(5) MÁRGEN DE UTILIDAD OPERACIONAL	5.85%	6.60%	7.34%	8.05%	8.31%
(6) IMPUESTOS (-)					
IMPUESTO DE RENTA (33%) (-)	\$ 8,128,873	\$ 9,453,748	\$ 10,817,671	\$ 12,221,659	\$ 12,995,276
TOTAL IMPUESTOS	\$ 8,128,873	\$ 9,453,748	\$ 10,817,671	\$ 12,221,659	\$ 12,995,276
(7) UTILIDAD NETA	\$ 16,504,076	\$ 19,193,974	\$ 21,963,150	\$ 24,813,671	\$ 26,384,349
(8) MÁRGEN DE UTILIDAD NETA	3.92%	4.42%	4.92%	5.39%	5.57%
(9) DEPRECIACIÓN (+)	\$ 11,681,500				
(10) FLUJO NETO DE EFECTIVO	\$ 28,185,576	\$ 30,875,474	\$ 33,644,650	\$ 36,495,171	\$ 38,065,849

Nota: Los supuestos que se tuvieron en cuenta para la proyección de ingresos y costos de operación actual, son los mismos que se definieron para la operación futura de la planta de beneficio modelo.

El detalle de cada uno de los cálculos anteriores, pueden ser consultados en el informe técnico que soporta la presente guía.

8.4.2. RESUMEN DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS OPERACIÓN FUTURA

INDICADOR	UNIDAD	OPERACIÓN ACTUAL	OPERACIÓN FUTURA
Recuperación oro (g/t)	%	53%	79,00%
Cantidad de oro recuperado por tonelada	gr	2,28	3,40
Costo de producción unitario por gramo de oro	COP (\$)	\$ 107.745	\$ 99.753
Costo de producción unitario por onza troy de oro	USD (\$)	\$ 1.128	\$ 1.044
Utilidad antes de impuestos por gramo de oro	COP(\$)	\$ 6.929	\$ 14.921
Utilidad antes de impuestos por onza troy de oro	USD(\$)	\$72,53	\$ 156
Margen de utilidad operacional - (promedio 5 años)	%	7,23%	14,37%
Utilidad después de impuestos por gramo de oro	COP (\$)	\$ 4.642	\$ 9.997
Utilidad después de impuestos por onza troy de oro	USD(\$)	\$ 48,59	\$ 105
Margen de utilidad neta (promedio 5 años)	%	4,84%	9,63%
Indicador de productividad (producto/insumo)		1,10	1,19

Precio de venta por gramo de oro: COP \$ 118.465

Precio de venta por Onza Troy de oro: USD \$ 1.228

Tasa de cambio utilizada COP \$3000/USD.

Factor de conversión utilizado: 1 onza troy = 31.1034768 gramos

8.4.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS DE INDICADORES DE OPERACIÓN ACTUAL VS OPERACIÓN FUTURA – ZONA MINERA DE QUINCHÍA

La adopción integral de la propuesta contenida en este guía para mejorar el proceso de beneficio de oro permite a la empresa minera incrementar la productividad total en aproximadamente 8%, al pasar de una razón producto/insumo total de 1.10 bajo las condiciones de la producción actual de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) a una razón de productividad de 1.19 con la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

Lo anterior corrobora la generación de beneficios económicos a la empresa minera, y se espera que represente, desde el punto de vista financiero, un incentivo para que el empresario adopte estas prácticas responsables con el medio ambiente y desarrolle su operación bajo el estricto cumplimiento de estándares técnico-administrativo y legales.

Se resalta que en el escenario de producción actual se estableció que el costo unitario de producir un gramo de oro es de aproximadamente COP 107745, mientras que se espera que, con la operación futura, el costo unitario del gramo de oro sea de COP 99753.

Este resultado indica una reducción efectiva de los costos unitarios equivalente a 7%.

Esta reducción en costos unitarios de producción de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), junto con el aumento del porcentaje de gramos de oro recuperados por cada tonelada de mineral procesado (de 53 a 79%), resulta en un aumento del margen de utilidad neta proyectada para los cinco años evaluados, que pasaría de 4.84%, en la actualidad, a 9.63% en la operación futura.

Como anexo a la presente guía encontrará un simulador en formato Excel en el que podrá introducir las variables de operación deseadas (según las características propias de la planta de beneficio) y efectuar un ejercicio de planeación financiera para estimar los costos unitarios de operación, los márgenes de utilidad operacional y determinar los rendimientos futuros de la inversión necesaria para la implementación de la ruta metalúrgica propuesta.

En el escenario actual de la planta correspondiente a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), el costo unitario de producir un gramo de oro es de COP 107745, mientras que la implementación de la propuesta lo reduce a COP 99753. Esta disminución del costo, junto con el aumento de los ingresos por un porcentaje de mayor recuperación de oro, se traduce en un incremento de la utilidad neta de 99%.



8.5. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN ACTUAL DE LA PLANTA DE BENEFICIO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA

· En el estudio financiero de la operación actual de la planta definida para la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) se utilizó como referencia una cuantía de recuperación de oro de 53% por cada tonelada de material mineral procesado, 43% de la cual se obtendría en el proceso de concentración gravimétrica, y el 10% restante, en el proceso de cianuración, de acuerdo con la información suministrada por el equipo técnico.

· Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) es de 4,3 gramos y que la operación actual permite una recuperación promedio del 53%, en el estudio financiero se estimó una recuperación de 2,28 gramos por cada tonelada de mineral procesado.

· Los rubros más representativos en la estructura de costos de la operación actual de la planta son la materia prima, los insumos y los servicios públicos, cada uno con una participación sobre los costos totales de 33, 23 y 17%, respectivamente. Esta participación elevada de los insumos está representada en un 63% por el costo del kilogramo de cianuro de sodio que se utiliza en el proceso de cianuración.

· Se estableció que las plantas de beneficio de la zona tienen un consumo de agua de aproximadamente 0,53 m³ por cada tonelada de mineral procesado.

· Las plantas de beneficio que corresponden a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) se aprecian en buen estado y sus superficies se prestan a ampliaciones y reformas.

· Se determinó que a partir de la implementación de la ruta metalúrgica propuesta para esta zona es posible incrementar la capacidad de procesamiento de mineral a ocho toneladas por día en un turno de ocho horas.

· El consumo de energía eléctrica de cada equipo se determinó a partir de la potencia nominal de los motores empleados en la planta y el número de horas al día en que se utilizarían. De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio, el consumo de energía actual es de 10.374 kW/mes.

· El costo unitario aproximado, con los parámetros de la operación actual definidos para la planta, es de COP 107.745 por cada gramo de oro y de USD 1.128 por cada onza troy de oro.

· El precio de venta que se utilizó de referencia para el estudio financiero de la operación actual corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2017. Este precio es de COP 118.465/gr y de USD 1.228/onza troy.

· La ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) aproximada es de COP 6.929/gr de oro y de USD 72,53/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 7,23%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

· La ganancia unitaria neta (después de pagar impuestos) en la operación actual de la planta es de COP 4.642/gr de oro y de USD 48,59/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 4,84%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.



8.6. CONSIDERACIONES SOBRE LA OPERACIÓN FUTURA DE LA PLANTA DE BENEFICIO - ZONA MINERA DE QUINCHÍA

· Con base en la capacidad promedio instalada de las plantas de beneficio de la zona, se estableció un potencial de procesamiento anual de 2.496 toneladas de material de mina, lo cual implica un funcionamiento de la planta de 26 días al mes y un procesamiento de ocho toneladas de material mineral al día.

· La implementación de la propuesta de adecuación tecnológica para la sustitución del uso del mercurio en el proceso de beneficio del oro permite alcanzar hasta un 79%. Este porcentaje es mayor si se compara con la recuperación promedio que se tiene en esta zona.

· Teniendo en cuenta que el tenor de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores) es de 4,3 gramos y que la implementación de la ruta metalúrgica en la operación futura permite una recuperación aproximada del 79%, se espera una recuperación de 3,40 gramos por cada tonelada de mineral procesado.

· Se definió un esquema conservador, en el cual se obtiene una recuperación de oro equivalente al 79% por cada tonelada de material mineral procesado. Sin embargo, estos rendimientos pueden ser superiores al 85%.

· A partir de las características de planta y las variables de operación definidas por el equipo técnico se realizó un inventario de la maquinaria y los equipos nuevos que se deben adquirir para mejorar algunos de los procesos que se están llevando a cabo en la operación actual de las plantas de beneficio de la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), con el fin de implementar los nuevos procesos que se detallan en la ruta metalúrgica contenida en la presente guía. El monto de recursos que se van a invertir para la adecuación es de COP 379.987.000.

· La definición del inventario de maquinaria y equipo nuevos, con sus respectivas especificaciones técnicas, se determinó a partir del inventario inicial de las plantas de la zona que corresponden a la zona minera de Quinchía (vereda Miraflores), con el objetivo de evitar costos innecesarios y optimizar los recursos disponibles para la inversión.

· Los rubros más representativos de la estructura de costos de la operación futura de la planta son la materia prima y los insumos, cada uno con una participación sobre los costos totales de 39 y 19%, respectivamente.

· El consumo de energía eléctrica por cada equipo se determinó a partir de la potencia nominal de los motores empleados en la planta y el número de horas al día en que se utilizarían.

De acuerdo con los parámetros de operación previamente definidos para la planta de beneficio, el consumo de energía es de 20.046 kW/mes.

· A partir de experimentos de laboratorio efectuados por el equipo técnico se determinó la dosificación adecuada de los insumos y elementos químicos que se deben utilizar en cada uno de los procesos de la operación. Con esto se espera que en la operación futura de las plantas de la zona minera de Quinchía se realice un uso eficiente de los insumos.

· El costo unitario aproximado que se puede alcanzar con la implementación de la propuesta de adecuación es de COP 99.753 por cada gramo de oro y de USD 1.044 por cada onza troy.

· El costo de los análisis y pruebas de laboratorio que se deben realizar para tener el control de la eficiencia de cada uno de los procesos de la operación y de los impactos ambientales asociados a elementos tóxicos que se pueden generar puede racionalizarse con la inversión futura en el montaje de un laboratorio. Se prevé que este laboratorio puede tener una demanda potencial de las empresas mineras de la zona.

· El precio de venta que se utilizó de referencia para el estudio financiero de la operación futura corresponde al precio del oro promedio internacional del año 2017. Este precio es de COP 118.465/gr y de USD 1.228/onza troy.

· Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria (antes de pagar impuestos) de COP 14.921/gr de oro y de USD 156/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad operacional de 14,37%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

· Con la implementación de la presente propuesta de modernización tecnológica se alcanza una ganancia unitaria neta (después de pagar impuestos) de COP 9.997/gr de oro y de USD 105/onza troy de oro. Esto corresponde a un margen de utilidad neta de 9,64%, en promedio, para los cinco años contemplados como horizonte de evaluación.

· Se estableció que la inversión en adecuación de las plantas de beneficio de la zona que minera de Quinchía (vereda Miraflores) se justifica desde el punto de vista financiero, ya que los resultados de los indicadores demuestran que los beneficios son mayores que los costos, incluyendo la inversión inicial, y que los dineros invertidos en el proyecto rinden más que las tasas de interés de oportunidad de 20 y 25%, anual.

· El período de recuperación de la inversión con las tasas de interés de oportunidad del 20 y 25% anual es de aproximadamente dos años.

Panorámica de la Cordillera Occidental sobre la cual se ubican los municipios de la zona minera.
Fotografía tomada por: Benedicto Galindo / Servicio Geológico Colombiano

9. GLOSARIO

Aa

Activo: Conjunto de todos los bienes y derechos con valor monetario que son propiedad de una empresa, institución o individuo, y que se reflejan en su contabilidad.

Adecuación ambiental: Acción de manejo o corrección destinada a hacer compatible una actividad, obra o proyecto con el ambiente, o para que no lo altere significativamente.

Administradora de Riesgos Profesionales: Entidad aseguradora de riesgos profesionales reglamentada por el Decreto número 1722 de 1994 que se refiere a la afiliación y a las cotizaciones del Sistema General de Riesgos Profesionales.

Alteración: (1.) Cambio en la composición química o mineralógica de una roca, producido generalmente por meteorización o por acción de soluciones hidrotermales. (2.) En general, se refiere a cambios físicos o químicos sufridos por rocas y minerales después de su formación, promovidos por procesos exógenos tales como meteorización, o por procesos endógenos tales como magmatismo o fallamiento.

Alteración argílica: Tipo de alteración hidrotermal también denominado argílica intermedia: caracterizada por la presencia de caolinita o montmorillonita.

Alteración filica: Tipo de alteración hidrotermal, también denominada cuarzo sericítica o simplemente sericítica: caracterizada por el desarrollo de sericita y cuarzo secundario. Es el resultado de una hidrólisis moderada a fuerte de los feldespatos, en un rango de temperatura de 300° - 400°C.

Alteración potásica: Alteración desarrollada en presencia de soluciones casi neutras y a altas temperaturas (400°-600°C), la cual se caracteriza por la formación de nuevos silicatos de potasio, tales como feldespato potásico secundario o mica (biotita) secundaria con posible presencia de anhidrita.

Amortización: Reconocimiento contable de la pérdida gradual de valor de un activo fijo a lo largo de su vida física o económica. Los activos amortizables permiten dar como gasto del ejercicio un porcentaje de su valor.

Análisis: Proceso de identificar una pregunta, modelar un evento, investigar modelos, interpretar resultados y dar recomendaciones.

Arcilla: (1.) La palabra arcilla se emplea para hacer referencia a rocas sedimentarias y, en general, a un material terroso de grano fino que se hace plástico al ser mezclado con una cantidad limitada de agua. Las arcillas son siempre de grano muy fino, el límite superior en el tamaño de los granos corresponde, por lo general, a un diámetro de 0,004 mm (menores de 4 micras). En mineralogía y petrografía se conocen como arcillolitas.

Arena (rocas sedimentarias): El término arena es un término textural y sirve para designar materiales o partículas, producto de la desintegración natural o artificial de rocas preexistentes cuyo tamaño oscila entre 0,0625 y 2 mm de diámetro.

Arenisca: Roca sedimentaria detrítica terrígena compuesta de mínimo un 85% de materiales tamaño arena, generalmente granos de cuarzo más o menos redondeados, con tamaños entre 0,0625 y 2 mm. Son rocas comunes, y se constituyen en componente esencial de numerosas series estratigráficas, en capas regulares o no, y también en lentejones. Estas rocas son de color blanco a gris claro o diversamente coloreadas, según la naturaleza del cemento, como rojo (óxidos de hierro), verde (glauconita) y otros. Las variedades se distinguen por el tamaño del grano, la naturaleza del cemento o la presencia de elementos particulares. Minerales esenciales: cuarzo. Minerales accesorios: feldespato, micas. Cemento silíceo, de óxidos de hierro y de calcita. A veces contiene minerales pesados (como rutilo y otros). Textura: grano medio y redondeado; distribución homogénea y pocas veces contienen fósiles.

Autoridad ambiental: Es la autoridad que tienen a su cargo fiscalizar los recursos naturales renovables, aprobar estudios de impacto ambiental, adoptar términos y guías, aprobar la Licencia Ambiental, delimitar geográficamente las reservas forestales, sancionar de acuerdo con las normas ambientales, no autorizar la licencia ambiental de acuerdo con el artículo 195 de la Ley 685 de 2001, recibir los avisos de iniciación y terminación de las explotaciones mineras.

Autoridad minera: Es el Ministerio de Minas y Energía o, en su defecto, la autoridad nacional, que de conformidad con la organización de la administración pública y la distribución de funciones entre los entes que la integran, tienen a su cargo la administración de los recursos mineros, la promoción de los aspectos atinentes a la industria minera, la administración del recaudo y distribución de las contraprestaciones económicas, con el fin de desarrollar las funciones de titulación, registro, asistencia técnica, fomento, fiscalización y vigilancia de las obligaciones emanadas de los títulos y solicitudes de áreas mineras.

Bb

Bauxita: Roca formada por óxidos de aluminio y de hierro hidratados, fórmula $Al_2O_3 \cdot xH_2O$, que suele presentar aspecto terroso, arcilloso o pisolítico y con colores del blanco sucio al pardo, con zonas más oscuras. Es la única mena, comercial, de aluminio. Su composición química es variable en el detalle, y define su calidad industrial. Las bauxitas se explotan para la extracción metalúrgica del aluminio, del que son la única mena. Los principales yacimientos de bauxitas se localizan en Australia, Brasil, Guayana y Surinam.

Beneficio de Minerales: Conjunto de operaciones empleadas para el tratamiento de menas y minerales por medios físicos y mecánicos con el fin de separar los componentes valiosos de los constituyentes no deseados con el uso de las diferencias en sus propiedades.

Bienes Finales: Bienes y servicios que conforman la Demanda Final y son aquellos cuyo proceso de producción se ha concluido en el período y están disponibles para su utilización; la mayor parte ha sido técnicamente terminada, es decir, no serán objeto de una nueva transformación en el período. BF.

Bioacumulación: Es el proceso de acumulación de sustancias químicas en organismos vivos de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que las concentraciones en su medio o en los alimentos. Las sustancias propensas a la bioacumulación alcanzan concentraciones crecientes a medida que se avanza en el nivel trófico en la cadena alimenticia.

Biogeoquímico/a: Interacción entre los compuestos geoquímicos y los organismos vivos. La biogeoquímica es necesaria para comprender el funcionamiento de los seres vivos, desde el nivel de organización celular hasta el ecosistema que conforman. Además, esta ciencia permite comprender el porqué de muchos de los problemas ambientales (cambio climático, destrucción de la capa de ozono, contaminación ambiental) y de procesos esenciales para la sociedad (producción de cultivos, reciclaje de residuos, depuración ambiental). El desarrollo de la biogeoquímica se adapta muy bien a aquellas regiones que presentan una vegetación muy densa y donde la cartografía geológica es difícil de ser llevada a cabo por ausencia de afloramientos.

Bocamina: (1.) La entrada a una mina, generalmente un túnel horizontal. (2.) Sitio en superficie por donde se accede a un yacimiento mineral.

Cc

Capacidad minera instalada: Es la máxima cantidad de producción que una mina ha sido diseñada para producir.

Capital: 1. Stock de recursos disponibles en un momento determinado para la satisfacción de necesidades futuras. Es decir, es el patrimonio poseído susceptible de generar una renta. Constituye uno de los tres principales elementos que se requieren para producir un bien o un servicio. 2. Es la suma de todos los recursos, bienes y valores movilizados para la constitución y la puesta en marcha de una empresa.

Capital de inversión: Es la suma de todos los recursos, bienes y valores movilizados para la constitución y la puesta en marcha de una empresa. Es su razón económica. Cantidad invertida en una empresa por los propietarios, socios o accionistas.

Chimenea: (1.) Una entrada vertical a una mina hecha hacia abajo desde la superficie. 2. Excavación vertical o inclinada que desemboca directamente en la superficie y está destinada a la extracción del mineral, al descenso y al ascenso del mineral y los materiales. En la chimenea van canalizados los cables eléctricos, las tuberías de conducción de agua y aire comprimido; a través de la chimenea se efectúa la ventilación de todas las labores subterráneas.

Cianuración: Método para extraer oro o plata a partir de un mineral triturado o molido, mediante disolución en una solución de cianuro de sodio o potasio.

Cianuro de sodio: Compuesto químico ampliamente usado en las plantas de tratamiento de minerales de oro para disolver oro y plata.

Ciclo geoquímico: Ocurrencia de cambios geológicos que se dividen en dos etapas: Ciclo mayor: comprende todos

los procesos involucrados en la formación de rocas (ígneas, sedimentarias y metamórficas). Ciclo menor: asociado a la formación de suelos a partir de las rocas preexistentes. Ambas etapas se reintegran en diferentes momentos de la cadena para dar nuevamente inicio al proceso o ciclo geoquímico.

Ciclo minero: Diferentes fases que ocurren durante el desarrollo de un proyecto minero, definidas en el "Plan Nacional de Desarrollo Minero" del Ministerio de Minas y Energía, que abarcan desde la gestación de un proyecto hasta su cierre. El Ciclo minero tiene las siguientes cinco (5) fases: Gestación del proyecto, Exploración, Desarrollo Minero, Producción y Desmantelamiento.

Cinética: Velocidad de disolución de un analito. Para el caso de la cianuración, se denomina velocidad de disolución de oro. Cantidad de sustancia/tiempo

Cizalla: Deformación resultante del esfuerzo que causa o tiende a causar que partes contiguas de un cuerpo se deslicen relativamente una con otra en una dirección paralela a su plano de contacto. Este es el modo de falla de un cuerpo en el cual la porción de masa sobre un lado de un plano o superficie se desliza y pasa sobre el lado opuesto. Este término también se usa para referirse a superficies y zonas de falla por cizalla, y a superficies a lo largo de las cuales han ocurrido movimientos diferenciales.

Clasificación (beneficio): Operación de separación de los componentes de una mezcla de partículas de minerales en dos o más fracciones de acuerdo con su tamaño, forma y densidad. Cuando se realiza en medio húmedo, la operación también depende de las propiedades del fluido en el que se encuentran las partículas, y de las características reológicas de la pulpa.

Código de Minas: Normas que regulan las relaciones entre los organismos y entidades del Estado, y de los particulares entre sí, sobre las actividades de prospección, exploración, explotación, beneficio, transporte, aprovechamiento y comercialización de los recursos no renovables que se encuentran en el suelo o subsuelo, así sean de propiedad de la nación o privada. Todas estas normas están contenidas en la Ley 685 de 2001, Código de Minas vigente.

Comercialización: En minería, compraventa de minerales o de cualquier producto resultante de la actividad minera.

Concentración (beneficio): Operación unitaria en la cual se busca eliminar el material que no es de interés económico con el fin de disminuir el volumen de mineral a procesar. Para esta separación se pueden utilizar propiedades físicas (diferencia de densidad, atracción de campos magnéticos, eléctricos) o físico químicas de los minerales.

Concentración gravimétrica: Método de concentración que aprovecha la diferencia en el peso específico entre los minerales a separar.

Concentración mecánica: Tratamiento del mineral bruto por procedimientos físicos que aumentan su riqueza al eliminar una parte mayor o menor del material estéril, tales como: lavado, clasificación, trituración, molienda, dimensionado y pulido de rocas.

Concentración por medios densos: Método de concentración que se basa en la diferencia de densidades entre el fluido empleado para la operación y los minerales a separar. Durante el proceso, las partículas más densas que el fluido se hunden, mientras las livianas flotan.

Concentración residual: Acumulación de minerales in situ como resultado de procesos de meteorización de las rocas. Las lateritas se producen por este tipo de procesos.
Concentrado: Es el producto enriquecido de las operaciones de concentración de minerales.

Concentrado bulk: Concentrado que contiene más de un metal con valor comercial.

Concentrador (industria minera): 1. Planta donde la mena es separada en "material de valor" (concentrados) y "material de desecho" (colas). 2. Un aparato de la planta de concentración, como las celdas de flotación, jigs, electromagnetos, mesa vibratoria, entre otros. 3. Aparato en el que, mediante aire, agua o gravedad, se lleva a cabo la concentración mecánica de una mena.

Concentrador de espiral: Concentrador conformado por cinco o seis espirales, cerrados, en los cuales se efectúa la separación por efecto de la fuerza centrífuga. El funcionamiento de un concentrador de espiral está basado en el principio de concentración a través de un flujo laminar. Este fenómeno se fundamenta en el hecho que una partícula que se desliza en un canal circular a través de una película de fluido está sujeta, por lo menos, a cuatro fuerzas: 1. Fuerza gravitacional, 2. Fuerza centrífuga; 3. Empuje del líquido, y 4. Roce contra el fondo del canal.

Concentrador Knelson: Concentrador centrífugo que cuenta con un cono invertido, dotado en su interior con una serie de rebordes circulares. La rotación del cono desarrolla fuerzas del orden de 60 veces la fuerza de la gravedad. Al alimentar la pulpa se establece un lecho o zona de concentración donde las partículas más pesadas quedan atrapadas en el lecho. A través de unas perforaciones existentes en la pared del cono se inyecta agua para evitar la compactación del lecho y crear cierta fluidez que permita concentrar las partículas de mayor densidad. Los equipos más grandes de este tipo pueden tratar hasta 90 tm/día.

Concentrador centrífugo: Son equipos que utilizan la fuerza centrífuga generada por la rotación a alta velocidad del depósito al que se alimenta el mineral en forma de pulpa. Uno de estos equipos es el concentrador Knelson.

Concentrados de batea: Fracción pesada de un sedimento que se obtiene por separación mecánica mediante movimiento circular de la batea para determinar el contenido de minerales metálicos o de alto peso específico.

Concordancia: Relación geométrica entre dos unidades estratigráficas superpuestas en las que existe paralelismo entre los materiales infra y suprayacentes.

Contaminación ambiental: Acción que resulta de la introducción por el hombre, directa o indirectamente, en el medio ambiente, de contaminantes, que tanto por su concentración, al superar los niveles máximos permisibles establecidos, como por el tiempo de permanencia, hagan que el medio receptor adquiera características diferentes a

las originales, perjudiciales o nocivas a la naturaleza, a la salud y a la propiedad.

Contrato de concesión: Son contratos administrativos celebrados entre el Estado (Ministerio de Minas y Energía, como representante de la Nación) y un particular (persona natural o jurídica) para efectuar, por cuenta y riesgo de éste, los estudios, trabajos y obras de exploración de minerales de propiedad estatal que puedan encontrarse dentro de una zona determinada y para explotarlos en los términos y condiciones establecidos en la legislación vigente al momento de su celebración. Comprende dentro de su objeto las fases de exploración técnica, explotación económica, beneficio de los minerales y cierre o abandono de los trabajos y obras correspondientes.

Costo (finanzas): 1. En un sentido amplio, es la medida de lo que se debe dar o sacrificar para obtener o producir algo. 2. Es un gasto, una erogación o un desembolso en dinero o especie, acciones de capital o servicios, hecho a cambio de recibir un activo. El efecto tributario del término costo (o gasto) es el de disminuir los ingresos para obtener la renta. 3. La transformación o la destrucción de valor en el transcurso de actividades onerosas destinadas a la producción de bienes o utilidad.

Costo de conversión: Equivale a los recursos invertidos en procesar el mineral de una etapa a otra del beneficio.

Costo por depreciación: Es el que resulta por la disminución en el valor original de la maquinaria.

Costo de inversión: Costo equivalente a los intereses correspondientes al capital invertido en una maquinaria, equipo o en cualquier actividad que conlleve a una mejora en la producción.

Costo por mantenimiento: Costos originados por todas las erogaciones necesarias para conservar la maquinaria en buenas condiciones, a efecto de que trabaje con rendimiento normal durante su vida económica. Se dividen en mayor y menor. En el mantenimiento mayor se consideran todas las erogaciones necesarias para efectuar reparaciones a la maquinaria en talleres especializados, o aquellas que deban realizarse en el campo, con personal especializado, y que requiera retirar la maquinaria de los frentes de trabajo por un tiempo considerable, incluye mano de obra, repuestos y renovación de partes de la maquinaria, así como otros materiales necesarios. En el mantenimiento menor se consideran todas las erogaciones necesarias para efectuar los ajustes rutinarios, reparaciones y cambios de repuestos que se efectúan en las propias obras; así como cambios de líquidos hidráulicos, aceites de transmisión, filtros, grasas y estopas. Incluye el personal y el equipo auxiliar que realizan estas operaciones de mantenimiento, los repuestos y otros materiales que sean necesarios.

Costo de operación: Es el total que se deriva de las erogaciones que hace el contratista por concepto del pago de salarios al personal y de todos los otros gastos relacionados con el desarrollo de la operación.

Crédito: Transacción que implica una transferencia de dinero con el compromiso de que será reembolsado transcurrido un determinado tiempo. Generalmente incluye el pago de

una remuneración en forma de intereses. El que transfiere el dinero se convierte en acreedor y el que lo recibe en deudor.

Cristalización: Formación de porciones de materia con estructura cristalina, y en ciertos casos con formas poliédricas, a partir de una solución o de un líquido, gas o sólido amorfo; cuando los átomos asumen una posición definitiva en la red cristalina, esto es lo que sucede cuando un metal líquido se solidifica. (Nota: la fatiga o falla de los metales debido a esfuerzos repetitivos es, algunas veces, erradamente atribuida a la cristalización).

Dd

Dato: Hecho verificable sobre la realidad; un dato puede ser una medida, una ecuación o cualquier tipo de información que pueda ser verificada (en caso contrario se trataría de una creencia).

Demanda: Precio al que el mercado está dispuesto a comprar (dinero). 2. Es la manifestación de la voluntad de comprar un número de unidades de un título valor a un precio dado en el mercado de valores, expresada por un comisionista según órdenes recibidas de algún cliente.

Depósito mineral: Concentración natural de sustancias minerales útiles, la cual bajo circunstancias favorables puede ser extraído con beneficio económico.

Derecho a explotar: Es el derecho que tiene el beneficiario de un título minero para realizar un conjunto de operaciones que tiene por objeto la extracción o la captación de los minerales yacientes en el suelo o el subsuelo dentro de un área determinada.

Desarrollo sostenible: 1. Desarrollo que conduce al crecimiento económico, a la elevación de la calidad de vida, a la productividad de las personas y al bienestar social, sin agotar la base de los recursos naturales renovables en que se sustenta, ni deteriorar el medio ambiente o el derecho de las generaciones futuras a utilizarlo para la satisfacción de sus propias necesidades, es decir, fundado en medidas apropiadas para la preservación de la integridad de los ecosistemas, la protección del ambiente y el aprovechamiento de los elementos naturales, de manera que no se comprometa la satisfacción de las necesidades de las generaciones futuras. 2. Es el mejoramiento de la calidad de vida humana dentro de la capacidad de carga de los ecosistemas; implican la satisfacción de las necesidades actuales sin comprometer la satisfacción de las necesidades de las futuras generaciones.

Detrítico: Materiales sedimentarios conformados por fragmentos de rocas preexistentes.

Diagrama de operaciones (beneficio): (Diagrama de flujo). Es una representación gráfica de la secuencia de operaciones realizadas durante el procesamiento de un mineral.

Difracción de Rayos X: es una técnica instrumental no destructiva que sirve para analizar un amplio rango de materiales, tales como minerales, polímeros, catalizadores, plásticos, compuestos farmacéuticos, cerámicos y

semiconductores, entre otros.

Dique: Cuerpo tabular de roca ígnea intrusiva, relativamente largo y delgado, que rellena una fisura o una fractura profunda en rocas más antiguas, y las corta discordantemente (que corta a la estratificación de las capas). A veces pueden aparecer varios diques dispuestos paralelamente entre sí. Cuando son afectados por erosión pueden dar lugar a relieves descalzados, al ser los materiales del dique más resistentes que los circundantes, o formar una depresión en forma de fosa en el caso contrario.

Discordancia: Es una superficie de erosión entre dos cuerpos de roca y que representa un hiato o espacio significativo en la sucesión estratigráfica.

Dorsales: Conocidas también como dorsales meso oceánicas, son elevaciones submarinas o sistemas montañosos de las cuencas oceánicas, a lo largo de las cuales se produce episodio de rifting, que implica formación de corteza oceánica nueva, a medida que el magma fluye en forma ascendente y se solidifica. Las dorsales están relacionadas con procesos de tectónica de placas del tipo divergente, que implica que el fondo oceánico (corteza oceánica) vaya creciendo y se expanda.

Ee

Empresa: Unidad institucional o combinación más pequeña de unidades productivas institucionales que abarca y controla, directa o indirectamente, todas las funciones necesarias para realizar sus actividades de producción. Depende de una sola entidad propietaria o de control; puede, sin embargo, ser heterogénea en cuanto a su actividad económica, así como a su emplazamiento. Para Colombia, corresponde a la persona jurídica.

Endógeno: Hace referencia a todos aquellos procesos geológicos que se generan al interior de la tierra, por ejemplo: Metamorfismo, cristalización magmática y segregación magmática.

Erosión: 1. Fenómeno de descomposición y desintegración de materiales de la corteza terrestre por acciones mecánicas o químicas. 2. Pérdida física de suelo transportado por el agua o por el viento, causada principalmente por deforestación, laboreo del suelo en zonas no adecuadas, en momentos no oportunos, con las herramientas impropias o utilizadas en exceso, especialmente en zonas de ladera, con impactos adversos tan importantes sobre el recurso como la pérdida de la capa o del horizonte superficial con sus contenidos y calidades de materiales orgánicos, fuente de nutrientes y cementantes que mantienen una buena estructura y, por lo tanto, un buen paso del agua y el aire. En la minería la erosión hídrica es la más importante y puede ser laminar, en regueros o surcos y en barrancos o cárcavas. 3. Conjunto de procesos externos (exógenos) que mediante acciones físicas y químicas (como agua, hielo, viento), transforman las formas creadas por los procesos endógenos.

Espesor: Ancho o grosor de una veta, estrato u otros; medido perpendicularmente o normal al buzamiento y el rumbo. El espesor real es siempre el ancho de la veta, estrato u otro, en su punto más delgado. El espesor real de una veta muestreada puede hallarse según la fórmula $e = h$

X sená, donde h = espesor horizontal, e = espesor real, y α = ángulo de buzamiento. En esta fórmula, el ángulo " α " se sabe por mediciones previas, y el ancho horizontal puede medirse con un nivel. Es importante que el ancho horizontal sea medido a ángulo recto con respecto al rumbo.

Estratificación: (1.) Estructuración o arreglo en capas de una roca determinada. (2.) Proceso de arreglo de las rocas sedimentarias, originado por algún cambio en la naturaleza de los materiales que están siendo depositados o en las condiciones del ambiente de sedimentación.

Estudio de factibilidad: Comprende toda la información con la que se realiza la evaluación de un proyecto, que habilita para tomar la decisión definitiva sobre la realización o sobre el proyecto mismo. El estudio de factibilidad debe suministrar una base técnica económica y comercial para tomar la decisión sobre inversiones a realizarse en un proyecto minero industrial, lo mismo que sobre sus condiciones operativas y procedimientos asociados.

Estudio de factibilidad minera: Estudio en el cual se recopila la información geológico - minera obtenida desde el reconocimiento hasta la exploración detallada, se modela el yacimiento, se diseña la explotación, se determina el volumen de reservas recuperables, se evalúa la calidad técnica y la viabilidad económica del proyecto de explotación minera. Este estudio permite verificar todas las informaciones geológicas, técnicas, ambientales, jurídicas y económicas relativas al proyecto, lleva a la toma de decisiones en materia de inversiones y constituye un documento aceptable por los bancos para las gestiones de financiación de un proyecto.

Estudio de Impacto Ambiental (E.I.A.) 1. Documento técnico que debe presentar el titular del proyecto del cual se efectuará la declaración de impacto ambiental, que es recopilado antes de iniciar un proyecto; este estudio examina los efectos que tendrán las actividades del proyecto sobre las áreas circundantes naturales de un terreno. 2. Instrumento de planificación ambiental para la toma de decisiones con respecto al desarrollo de acciones o proyectos, exigido por la autoridad ambiental, carácter preventivo, cuyo propósito es identificar, valorar y definir las medidas de preservación, mitigación, control, corrección y compensación de los impactos o consecuencias, y efectos ambientales que las acciones de un proyecto, obra o actividad pueden causar sobre la calidad de vida del hombre y su entorno. El contenido del E.I.A. es: a) Resumen del E.I.A., b) Descripción del proyecto, c) Descripción de los procesos y las operaciones, d) Delimitación, caracterización y diagnóstico de las condiciones ambientales de las áreas de influencia, e) Estimación y evaluación de impactos ambientales, f) Plan de manejo ambiental para prevenir, mitigar, corregir y compensar posibles impactos. Debe incluir plan de seguimiento y monitoreo, y plan de contingencia.

Estudio de prefactibilidad: Es una evaluación preliminar sobre la idea de un proyecto. Es la definición de un plan sobre el cual trabajar, con cálculo de los costos, basado en datos físicos y experimentales limitados. En términos generales, este tipo de estudio consiste en realizar una evaluación más profunda de las alternativas encontradas viables y en determinar la bondad de ellas. Su principal finalidad es tomar la decisión sobre la viabilidad

o no del proyecto, o sobre la necesidad de análisis más detallados.

Estudios geológicos: Recopilación de información geológica de un área o una región, con un objetivo primordial (minería, exploración minera, obras civiles, entre otros). Un estudio geológico provee información sobre litología, estructuras, ocurrencias minerales, entre otros. Un estudio geológico puede ser general o detallado, por ejemplo, en el caso de túneles para obras civiles, un estudio geológico suministra información de la zona a perforar metro a metro, con detalles de la estructura, permeabilidad, niveles freáticos, dureza de las distintas unidades rocosas y otros, para contar con la solución a los problemas que se van a encontrar antes de que la perforación alcance las zonas donde existan estos posibles problemas, para salvar de esta manera tiempo, dinero y hasta vidas humanas.

Exógeno: Hace referencia a todos los procesos geológicos superficiales. Por ejemplo, la meteorización.

Ff

Filón: Un filón es el relleno de minerales que ha colmado una fisura en la corteza terrestre.

Fluidos hidrotermales: Son fluidos que pueden contener agua a alta temperatura y volátiles, químicamente activos, y que pueden tener origen magmático o formados por aguas meteóricas que se calientan y ascienden. Los fluidos hidrotermales pueden transportar y depositar metales, produciendo alteraciones químicas en las rocas con las cuales interactúan.

Flujo de caja (cash flow): Flujo de caja de una empresa que refleja los cobros y pagos del negocio en un período determinado. No incluye partidas de la cuenta de resultados que no corresponden a movimientos de caja, como, por ejemplo, amortizaciones y provisiones.

Fundición: Proceso pirometalúrgico mediante el cual un metal es llevado del estado sólido al líquido.

Gg

Galerías: Túneles horizontales al interior de una mina subterránea.

Ganga: (1.) Minerales que no presentan interés económico en un yacimiento, aquella parte de una mena que no es económicamente deseable, pero que no puede ser desechada en minería. Ella es separada de los minerales de mena durante los procesos de concentración. Este concepto se opone al de mena. Es el material estéril o inútil que acompaña al mineral que se explota. Generalmente son minerales no metálicos, o bien la roca encajante y muy ocasionalmente pueden ser minerales metálicos. Los minerales de ganga son aquellos que no son beneficiables, pero en algunos casos estos minerales pueden llegar a ser económicamente explotables (al conocerse alguna aplicación nueva para los mismos) y, por lo tanto, dejarían de ser ganga, por ejemplo, el mineral de ganga es galena. 2. La roca de derroche que rodea un depósito de mineral; también la materia de menor concentración en un mineral.

Geólogo: Profesional que tiene conocimientos sobre la

composición, la estructura y la evolución de la Tierra; conoce la distribución de las rocas en el espacio y en el tiempo. Esta distribución de las rocas y los minerales permite al geólogo encontrar yacimientos de minerales, petróleo y gas. Además, esta disposición permite conocer la geología para poder asentar edificios, puentes y carreteras sin riesgo para las vidas humanas.

Geoquímica: 1. Estudia la distribución, la dispersión en la naturaleza (ciclos) y la concentración de elementos químicos en minerales, cuerpos mineralizados, rocas, suelos, aguas y atmósfera, y toma como base las propiedades de sus iones y átomos. 2. Estudio espacial y temporal de los elementos químicos y sus especies, y de los procesos fisicoquímicos que controlan su movilidad, su transformación y su acumulación en el medio ambiente. 3. Estudio de los elementos químicos y de los procesos en los cuales intervienen, al interior y sobre la superficie terrestre.

Geoquímica de minerales: Geoquímica de los metales principales y trazas componentes de los minerales.

Grava (rocas sedimentarias): Material redondeado producto de la desintegración, natural o artificial, de cualquier tipo de roca, especialmente de aquellas ricas en cuarzo, cuyo tamaño es superior a dos (2) milímetros de diámetro.

Hh

Horizonte de evaluación del proyecto: Tiempo definido para medir la bondad financiera del proyecto.

Ii

Impacto Ambiental: 1. Alteración o cambio neto parcial, positivo o negativo (adverso o benéfico), en el medio ambiente o en alguno de sus componentes, resultante de actividades, productos o servicios de una organización. Un impacto ambiental conlleva a un problema ambiental. La intensidad de la alteración está relacionada con la capacidad de acogida del territorio donde se desarrolla la actividad impactante. 2. Efecto que las actuaciones humanas producen en el medio.

Impuesto: Pago obligatorio de dinero que exige el Estado a los individuos o empresas que no están sujetos a contraprestación directa, con el fin de financiar los gastos propios de la administración del Estado y la provisión de bienes y servicios de carácter público, tales como administración de justicia, gastos de defensa, subsidios y muchos otros. Sólo por ley pueden establecerse los impuestos de cualquier naturaleza que sean, señalarse sus modalidades, su repartición o su supresión. Las dos categorías fundamentales son los impuestos directos e indirectos.

Impuesto sobre la renta: Contribución que grava el ingreso de las personas y entidades económicas. El impuesto sobre la renta incluye el gravamen al trabajo, al capital y la combinación de ambos. Es un impuesto directo porque incide en forma específica sobre el ingreso de las personas y de las sociedades mercantiles. En Colombia, la tasa del impuesto a la renta es del 33% y se paga anualmente.

Información: Acción y efecto de adquirir conocimiento o

formación mediante el aprendizaje y el entendimiento. La información es un proceso por el cual, del conjunto de datos accesibles, se extrae y elabora aquel subconjunto que tiene relevancia para el sujeto que se informa.

Infraestructura minera: Conjunto de bienes, instalaciones y servicios establecidos (agua, pozos sépticos, acueducto, energía, otros), básicos para el normal desarrollo de una operación minera. La infraestructura minera, como un todo, constituye un gran sistema compuesto por subsistemas, que deben considerarse desde diferentes puntos de vista y no exclusivamente desde el económico. Un subsistema importante es, por ejemplo, el transporte, que está compuesto por caminos, carreteras, vías férreas, aeropuertos, puertos, entre otros, e incluye vehículos, instalaciones y otros muchos bienes más y, desde luego, organizaciones que incluyen a las personas que las manejan.

Ingresos: Entrada de dinero a una empresa derivada de la venta de sus productos, servicios, operaciones financieras y otros.

Interés: Compensación que se debe dar a un sujeto económico por su disposición a desprenderse de dinero, que se formaliza a través de las operaciones de crédito o de préstamo.

Inversión: Bienes comprados por las personas o las empresas para aumentar su stock de capital.

Inversión en bienes de equipo

Equipos y estructuras que compran las empresas para utilizarlas en la producción futura.

Inversionista: Es quien coloca su dinero en un título valor o alguna alternativa que le genere un rendimiento futuro, ya sea una persona o una sociedad.

Inclusiones fluidas: Son fluidos que se encuentran atrapados dentro de un mineral con estructura cristalina. Ocurren en cristales que se forman a partir de fluidos (por ejemplo agua o magma) y no suelen sobrepasar 0.1 mm de diámetro. Según sus orígenes se pueden distinguir tres tipos de inclusiones fluidas: Primarias: Estas inclusiones se forman durante el crecimiento del cristal y pueden ocurrir aisladas, en pequeños grupos de inclusiones fluidas sin orientación particular o alineadas paralelamente a las zonas de crecimiento del cristal. Secundarias: Se forman en fracturas en cristales que han sido penetradas por fluidos para luego sellarse mediante la autoreparación del cristal. Ocurren como lineamientos de inclusiones que llegan a tocar la superficie del cristal e incluso a veces continuar en cristales aledaños. Seudosecundarias: Se trata de inclusiones que por sus lineamientos parecen secundarias aunque en realidad se trata de inclusiones primarias. Se las considera un subgrupo de las inclusiones primarias.

De las inclusiones fluidas se puede obtener información como la temperatura y presión a la cual se formó el mineral que contenedor además del tipo de fluido del cual se formó y la densidad de tal fluido.

LI

Licencia ambiental: 1. Es la autorización que otorga la autoridad competente a una persona natural o jurídica, para la ejecución de un proyecto, obra o actividad. En

ella se establecen los requisitos, las obligaciones y las condiciones que el beneficiario debe cumplir para prevenir, mitigar o corregir los efectos indeseables que el proyecto, obra o actividad autorizada pueda causar en el ambiente. 2. Autorización que otorga la autoridad competente para la construcción, el montaje, la explotación objeto del contrato y el beneficio y para las labores adicionales de exploración durante la etapa de explotación. Se otorga de manera global y comprende además los permisos, autorizaciones y concesiones de carácter ambiental para hacer uso de los recursos necesarios en el proyecto minero.

Litificación: Proceso mediante el cual un material se convierte en roca compacta en la corteza terrestre.

Lixiviable: Material extractable o tratable mediante técnicas de lixiviación.

Lixiviación (beneficio): Proceso hidro-metalúrgico mediante el cual se realiza la disolución selectiva de los diferentes metales que contiene una mena, por medio de una solución acuosa que contiene un reactivo químico apropiado.

Lixiviación (geoquímica): 1. Remoción de elementos químicos desde un material natural (por ejemplo, suelo), mediante su disolución en agua y su transporte o movilización descendente a través de un terreno o medio sólido poroso. 2. Proceso natural mediante el cual, por acción del agua, se liberan y transportan elementos a través de un perfil (suelo) hacia los horizontes inferiores.

Lixiviación a presión: Disolución selectiva de un mineral en medio acuoso ácido o básico, mediante la aplicación de altas presiones y temperaturas. El proceso se realiza en equipos denominados autoclaves.

Lixiviación biológica: 1. Proceso de recuperación de metales de minerales de bajo tenor que se basa en liberar una solución de los metales con la utilización de bacterias. 2. Es el proceso de usar bacterias que ocurren naturalmente para acelerar la oxidación de minerales sulfídicos que contienen algunas formas de oro y a su vez previenen que los químicos lixiviantes alcancen el oro. Cuando la mena es expuesta a grandes concentraciones de estos organismos que consumen sulfuros, se pueden remover cantidades suficientes de material sulfídico para luego recuperar el oro mediante procesos normales de lixiviación.

Lixiviación por percolación: Proceso de lixiviación en el cual la solución lixiviante y las aguas de lavado pueden circular por efecto de la gravedad a través de las partículas de mineral en el interior de un tanque o en el suelo y disolver el metal de interés. Generalmente, las partículas del mineral apto para este proceso deben tener un tamaño entre 6 y 9 mm.

Lixiviados: Solución obtenida por extracción o lixiviación, tal es el caso de la solución resultante de la percolación descendente de agua meteórica a través del suelo o de desechos sólidos que contiene sustancias solubles (por ejemplo, en un relleno sanitario).

Mm

Manejo de aguas (industria minera): Proceso en el que se produce un descenso de la tabla de agua subterránea, en un área minera, mediante bombeo de pozos para luego ser transportada y utilizada o recargada al sistema de aguas subterráneas mediante infiltración, reinyección o irrigación.

Medio ambiente: Conjunto de condiciones físicas, químicas y biológicas que rodean a un organismo.

Mena: (1.) Mineral de base del que es posible extraer otro mineral de mayor pureza e importancia económica. La molibdenita (sulfuro de molibdeno), por ejemplo, es la principal mena del molibdeno. (2.) Minerales que presentan interés económico en un yacimiento. Este concepto se opone al de ganga. En general, es un término que se refiere a minerales metálicos y que designa al mineral del que se extrae el elemento de interés. Para poder aprovechar mejor la mena, suele ser necesario su tratamiento, que en general comprende dos etapas: el tratamiento en el sitio de mina para aumentar la concentración del mineral en cuestión (procesos hidrometalúrgicos, flotación, entre otros), y el tratamiento metalúrgico final, que permita extraer el elemento químico en cuestión (tostación, electrólisis, entre otros).

Metalogénesis: permite definir y, en su caso, mostrar en un mapa las áreas potenciales de contener concentraciones minerales.

Metalogenia: Bajo este concepto se define a la rama de la geología que estudia el origen de los yacimientos minerales, sus relaciones con las rocas que los contienen, las estructuras que los controlan y las leyes que gobiernan la distribución de los depósitos minerales en la corteza terrestre. Esta definición considera todas las variables en el espacio y en el tiempo.

Metalogenética (provincia metalogenética): son regiones en las que una serie de depósitos minerales poseen características comunes.

Metalografía: descripción y clasificación de metales mediante el estudio de la estructura de un metal-aleación y la relaciona con la composición química, con las propiedades mecánicas y físicas.

Metalurgia: (1.) Estudio y tecnología de los metales y aleaciones. (2.) Es la ciencia de extraer metales de las respectivas menas por medios mecánicos y procesos químicos, y de prepararlos para su uso.

Metamorfismo: Proceso por el cual se producen profundas transformaciones mineralógicas, estructurales y químicas sobre rocas o minerales preexistentes, debido a bruscas variaciones en las condiciones de presión y temperatura, y que da lugar a la formación de un nuevo tipo de rocas llamadas metamórficas. Esencialmente es isoquímico y al estado sólido, con cristalización de nuevos minerales, llamados neoformados, y adquisición de texturas y estructuras particulares diferentes de las de la roca originaria. Cualquier roca puede ser afectada por el metamorfismo, ya sea ígnea, sedimentaria o metamórfica.

Hay varios esquemas para distinguir diferentes tipos de metamorfismo: 1) según la extensión sobre la cual tuvo lugar el metamorfismo: metamorfismo regional y local. 2) según las condiciones (ambiente) geológicas: orogénico, de enterramiento, de fondo oceánico, dinámico, de contacto y dinamotérmico. 3) según el principal factor controlante durante el metamorfismo (temperatura (T), presión (P), presión de agua (PH₂O), esfuerzos, deformaciones): térmico. 4) según la causa particular del metamorfismo: de impacto, hidrotermal, por quema de combustibles naturales (raro), por rayos (descargas eléctricas naturales), en esta categoría se puede incluir el metamorfismo de contacto, el piro metamorfismo y el metamorfismo asociado con el emplazamiento de cuerpos tectónicos calientes. 5) según si el metamorfismo es el resultado de un único o de múltiples eventos: monometamorfismo, polimetamorfismo. Una roca o complejo de rocas pueden presentar los efectos de más de un evento metamórfico (por ejemplo, dos metamorfismos regionales o un metamorfismo de contacto y uno regional). 6) según si el metamorfismo está asociado con un incremento o descenso de la temperatura: progrado, retrógrado.

Metasomatismo: (1.) Proceso, prácticamente simultáneo, de solución capilar y deposición, por medio del cual un nuevo mineral o agregado de minerales, de composición química parcial o totalmente diferente, se desarrolla en el cuerpo de un antiguo mineral o agregado de minerales. (2.) Proceso por el cual un mineral es reemplazado por otro de diferente composición química, gracias a un grupo de reacciones que permiten la introducción de material de fuentes externas. (3.) Proceso de solución y deposición simultánea, que ocurre a través de pequeñas aperturas generalmente submicroscópicas, y principalmente por acción de soluciones acuosas hipogénicas, que da como resultado un nuevo mineral de composición total o parcialmente diferente, y que puede desarrollarse en el cuerpo de un antiguo mineral o agregado de minerales.

Metilmercurio: El metilmercurio (a veces escrito como metil-mercurio) es un catión organometálico de fórmula química [CH₃Hg]⁺. Se trata de un compuesto neurotóxico capaz de concentrarse en el organismo (bioacumulación) y concentrarse así mismo en las cadenas alimentarias (biomagnificación),^{1,2} que ocupa un lugar especial debido a que un cierto porcentaje de la población mundial está expuesta a él de una forma u otra y su toxicidad está mejor caracterizada por la investigación médica que la de otros compuestos orgánicos del mercurio.

Mineral: sustancia homogénea originada por un proceso genético natural con composición química, estructura cristalina y propiedades físicas constantes dentro de ciertos límites. 2. Individuos minerales que se caracterizan por una estructura cristalina determinada y por una composición química, que pertenecen a un rango de variaciones continuas y que se encuentran en equilibrio bajo unas condiciones termodinámicas determinadas. 3. El Código de Minas define el mineral como la sustancia cristalina, por lo general inorgánica, con características físicas y químicas propias debido a un agrupamiento atómico específico.

Mineral de alteración: Mineral que se forma como producto de reacciones fisicoquímicas de fluidos hidrotermales o de actividad ígneo - volcánica con minerales que componen las rocas encajantes. Se excluyen los minerales formados

por meteorización o intemperismo. Los tipos de alteración hidrotermal más comunes son: potásica, skarn, filica, propílica, argílica, subpropílica, albitización, piritización, carbonatización, ceolitización, alunitización, caolinización, silicificación, dolomitización, turmalinización, epidotización, argílica avanzada, sericítica, cloritización.

Mineral asociado: Entiéndase por minerales asociados aquellos que hacen parte integral del cuerpo mineralizado objeto del contrato de concesión. Mineral de ganga: 1. Minerales que no presentan interés económico en un yacimiento, aquella parte de una mena que no es económicamente deseable, pero que no puede ser desechada en minería. Ella es separada de los minerales de mena durante los procesos de concentración. Este concepto se opone al de mena. Es el material estéril o inútil que acompaña al mineral que se explota. Generalmente son minerales no metálicos, o bien la roca encajante y muy ocasionalmente pueden ser minerales metálicos. Los minerales de ganga son aquellos que no son beneficiables, pero en algunos casos estos minerales pueden llegar a ser económicamente explotables (al conocerse alguna aplicación nueva para los mismos) y, por lo tanto, dejarían de ser ganga, por ejemplo, el mineral de ganga es galena. 2. La roca de derroche que rodea un depósito de mineral; también la materia de menor concentración en un mineral.

Mineral de mena: Mineral que puede utilizarse para obtener uno o más metales; aunque también pueden estar en forma de metal nativo o como combinaciones de los metales. Los minerales de mena son aquellos que pueden ser beneficiados, lo cual hace que tengan importancia económica, es decir, económicamente explotables bajo condiciones normales, por ejemplo, oro nativo.

Mineralización: Procesos naturales por los cuales los minerales son introducidos en las rocas. Los procesos de mineralización más conocidos son: segregación magmática, diferenciación magmática, hidrotermal, sublimación, metasomatismo de contacto, metamorfismo, sedimentación, evaporación, concentración residual, oxidación y enriquecimiento supergénico, concentración mecánica, eólico.

Mineralogía: Ciencia que estudia los minerales. La manera en que se combinan, cristalizan, presentan y distribuyen estos compuestos, sus diversas características físicas y químicas, su origen y su distribución en la corteza terrestre. Está ligada a la geología (que estudia los procesos físicos que determinaron la formación de la Tierra).

Minería formal: Actividad cuyas unidades productivas desarrollan las labores mineras con título minero vigente o bajo el amparo del mismo, instrumento ambiental y cumplen con los parámetros técnicos, ambientales, económicos, laborales y sociales, de la industria, definidos por la legislación vigente en estos aspectos.

Minería legal: Es la minería amparada por un título minero, que es el acto administrativo escrito mediante el cual se otorga el derecho a explorar y explotar el suelo y el subsuelo mineros de propiedad nacional, según el Código de Minas. El título minero deberá estar inscrito en el Registro Minero Nacional.

Modelo: Una abstracción de la realidad. Un modelo es estructurado como un conjunto de reglas y procedimientos utilizados para derivar nueva información que puede ser analizada para ayudar a resolver problemas de planeación.

Molienda: Operación de reducción de tamaño de un mineral realizada posteriormente a la trituración; puede ser de tipo primario o secundario según el tamaño requerido del producto.

Molienda autógena: Proceso de reducción de tamaño llevado a cabo en un cilindro rotatorio en el cual el efecto molidor es causado por la fricción mutua entre las partículas de mineral.

Molienda semiautógena (SAG): Método de molienda de roca y minerales en el cual el medio molidor está compuesto por trozos grandes del mismo material que se intenta moler y bolas de acero.

Molino: Máquina usada en la molienda de minerales.

Molino de arrastre: Un molino que consiste en una o más piedras grandes arrastradas por un lecho circular, que se utiliza para moler minerales.

Molino de barras: Molinos para molienda fina (última etapa de molienda en la que el material que se entrega pasa por un tamiz de malla de 1 milímetro cuadrado de sección) similares a los molinos de bolas. Son equipos cilíndricos que tienen en su interior barras de acero que cuando el molino gira, caen sobre el material.

Molino de bolas: Cilindro metálico cuyas paredes están reforzadas con material fabricado en aleaciones de acero al manganeso. Estas molduras van apernadas al casco del molino y se sustituyen cuando se gastan. El molino gira y la molienda se realiza por efecto de las bolas de acero al cromo o manganeso que, al girar con el molino, son retenidas por las ondulaciones de las molduras a una altura determinada, desde donde caen y pulverizan por efecto del impacto, el material mineralizado mezclado con agua.

Molino de guijarros: Molino cilíndrico, similar al molino de barras, con sólo un compartimiento y una carga de partículas de mineral cribadas como medio de molienda. Muy usados en minas de oro de Sudáfrica. Se utilizan cuando la proporción de tamaños gruesos es demasiado baja, donde la fracción gruesa de la alimentación se separa y el resto se tritura hasta un tamaño más fino, y se introduce todo en el molino de guijarros para completar la molienda fina.

Molino tubular: Aparato que consiste en un cilindro giratorio, lleno aproximadamente hasta la mitad de varillas y bolas de acero, en el cual se introduce la mena triturada para obtener una molienda más fina.

Oo

Oferta: 1. Precio al cual se ofrece un instrumento (título) para la venta. En la cotización de determinado título el offer constituye el precio más bajo que un vendedor está dispuesto a recibir por dicho título en ese momento dado. 2. Situación por la cual una sociedad hace público su deseo de adquirir una participación mayoritaria en otra.

Onza troy: Unidad de masa en la cual son comercializados los metales preciosos tales como oro y platino. Una onza troy equivale a 31.103 gramos.

Pp

Permiso ambiental: Autorización que concede la autoridad ambiental para el uso o el beneficio temporal de un recurso natural.

Petrografía (Petrología): Rama de la geología que estudia las rocas desde el punto de vista genético (origen) y su relación con otras rocas..

Planta de procesamiento de minerales: Instalación industrial o semi industrial en la cual un mineral es tratado para la recuperación de los metales o compuestos de interés mediante una secuencia de operaciones o procesos unitarios, y que utiliza algún tipo de energía (eléctrica, mecánica, hidráulica o térmica) para la operación de los equipos o máquinas.

Presión de vapor: Es la presión de la fase gaseosa o vapor de un sólido o un líquido sobre la fase líquida, para una temperatura determinada, en la que la fase líquida y el vapor se encuentran en equilibrio dinámico; su valor es independiente de las cantidades de líquido y vapor presentes mientras existan ambas.

Producción (aspectos económicos): Es la suma del valor de todos los bienes y servicios producidos por los agentes económicos residentes, ofrecidos para diferentes usos, incluido el consumo intermedio.

Producción (industria minera): Fase del Ciclo Minero que tiene como objetivo la extracción, la preparación o el beneficio, el transporte y la comercialización del mineral. Es la fase de mayor duración, generalmente entre 10 y 30 años, y depende del nivel de reservas, tipo de explotación y condiciones de la contratación.

Productividad: Relación entre lo producido y los medios empleados, tales como mano de obra, materiales, energía, maquinaria, entre otros.

Producto (industria minera): Cantidad de mineral obtenido en un proceso o una operación y que puede servir a la vez como alimento para un tratamiento posterior.

Propiedades físicas: Son las características que se pueden medir u observar sin alterar la composición de la sustancia: Ej: Color, olor, masa, forma, solubilidad, densidad, punto de fusión, etc.

Propiedades químicas: Son aquellas que pueden ser observadas cuando una sustancia sufre un cambio en su composición Ej: oxidación

Proyecto de Inversión: Un proyecto de inversión es un plan que contiene un conjunto de actividades coordinadas entre sí para posibilitar el cumplimiento de un propósito específico o la materialización de una idea. En este sentido, los proyectos son un instrumento básico de información para la toma de decisiones de inversión.

Pruebas de planta piloto: Pruebas que buscan identificar las mejores condiciones de operación de una planta de beneficio del mineral.

Rr

Recuperación (industria minera): Relación entre el peso del componente útil en el concentrado de mineral y el del mismo componente en el alimento de la misma operación unitaria. Generalmente se expresa en porcentaje y en ocasiones sirve como indicativo del rendimiento de una operación de preparación de minerales.

Recursos naturales: Son elementos de la naturaleza susceptibles de ser utilizados por el hombre para la satisfacción de sus necesidades o intereses económicos, sociales y espirituales. Los recursos renovables se pueden renovar a un nivel constante. Los recursos no renovables son aquellos que forzosamente perecen en su uso.

Recursos naturales no renovables: Son los recursos que no tienen capacidad de recuperarse o regenerarse después de ser aprovechados, posiblemente se regeneren en escalas de tiempo geológico grandes.

Recursos naturales renovables: Son aquellos cuya fuente es abundante y se generan a una velocidad tal, que pueden ser utilizados repetidas veces por el hombre, sin arriesgar su agotamiento.

Regalía: 1. Compensación por el uso de la propiedad ajena basada sobre un porcentaje acordado de los ingresos resultantes de su uso. Por ejemplo, un fabricante por el uso de su maquinaria en la fábrica de otra persona. Generalmente, las regalías se asocian con la actividad extractiva, más especialmente con la actividad petrolera. 2. De conformidad con los artículos 58, 332 y 360 de la Constitución Política, toda explotación de recursos naturales no renovables de propiedad estatal genera una regalía como contraprestación obligatoria.

Relave: (o cola) es un conjunto de desechos tóxicos de procesos mineros de la concentración de minerales, usualmente constituido por una mezcla de rocas molidas, agua y minerales de ganga (o sin valor comercial), aunque también se encuentran bajas concentraciones de metales pesados, tales como cobre, plomo, mercurio y metaloides como el arsénico

Roca encajante: (yacimientos minerales): Unidad o cuerpo de roca que contiene un recurso mineral.

Rocas metamórficas: Toda roca que en estado sólido ha sufrido cambios texturales y composicionales (físico - químicos). Causados por variaciones de presión y temperatura. Según el grado de metamorfismo estos cambios pueden ser o no más evidentes.

Rocas Sedimentarias: Son las que se forman por la acumulación y compactación de sedimentos, en un proceso llamado litificación. Se presentan estratificadas y pueden contener fósiles.

Rocas volcánicas, ígneas o magmáticas: Rocas ígneas que se forman a partir de la consolidación de material del

magma que fluyó hacia la superficie terrestre (lava) o fue lanzado violentamente (de forma explosiva) desde un volcán (piroclastos, como, por ejemplo, ceniza). Una característica importante de las rocas volcánicas es que tienen una tasa de enfriamiento alta, es decir, el paso desde magma a roca es rápido. Las formas de solidificación de las vulcanitas están estrechamente relacionadas con su contenido en SiO₂, con el contenido gaseoso de los fundidos respectivos y con la viscosidad de la lava.

Ss

Sector: Conjunto de empresas o instituciones que conforman una misma actividad económica.

Sedimento: Material sólido que se asienta desde el líquido cuando se encuentra en suspensión.

Silicificación: Introducción de sílice o remplazamiento de componentes por sílice. La sílice formada o introducida es generalmente cuarzo de grano fino, calcedonia u ópalo, y puede rellenar poros o remplazar minerales existentes. El término es aplicable a procesos magmáticos, hidrotermales o diagenéticos.

Sistema General de Riesgos Profesionales: Conjunto de normas, entidades y procedimientos destinados a prevenir, proteger y atender a los trabajadores, de los efectos de las enfermedades y los accidentes que puedan ocurrir con ocasión o como consecuencia del trabajo

Sostenibilidad: Es el deber de manejar adecuadamente los recursos naturales renovables, y la integridad y el disfrute del ambiente; es compatible y concurrente con la necesidad de fomentar y desarrollar racionalmente el aprovechamiento de los recursos mineros como componentes básicos de la economía nacional y el bienestar social.

Sulfuros: se refiere a minerales formados a partir del enlace entre el azufre y otro elemento químico, en especial un metal (Zn, Cu, Pb, Hg, Sb, Bi, Ni).

Tt

Tasa de descuento : La tasa de descuento también la podemos definir como el costo de oportunidad en que se incurre al tomar la decisión de invertir en el proyecto en lugar de hacerlo en otras alternativas que nos pueda ofrecer el mercado financiero.

Tasa Interna de Retorno - TIR: Indicador de la rentabilidad de un activo financiero. Es aquella tasa de descuento que iguala el valor presente de los flujos de ingresos futuros (intereses, amortizaciones parciales), con el costo de la inversión inicial. Corresponde al rendimiento que obtendría el inversionista de mantener el instrumento hasta su vencimiento, bajo el supuesto que reinvierte los flujos de ingresos a la misma tasa. En el caso de instrumentos de renta fija es equivalente al rendimiento a vencimiento.

Tenor: Porcentaje neto de mineral económicamente recuperable de una mena.

Tenor de cabeza: La ley promedio de la mena alimentada al molino. Se refiere al dato de tenor del material que entra

a la planta de beneficio, y se calcula tanto para el producto como para los co-productos y subproductos.

Tenor de colas: Tenor, ley o concentración de mineral en las colas que se desechan al final de todo el proceso mineralúrgico (beneficio).

Título minero de exploración: Es el acto administrativo que confiere a una persona el derecho exclusivo a realizar dentro de una zona determinada, trabajos dirigidos a establecer la existencia de minerales y sus reservas en calidad y cantidad comercialmente explotables.

Título minero de explotación: Es el derecho que tiene el titular de la licencia de exploración que ha sido clasificado en forma definitiva como de pequeña minería para convertir su título en licencia de explotación.

Tonelada métrica : Unidad de peso equivalente a 1.000 kg ó 2.205 libras.

Trituración: Reducción inicial del tamaño del mineral hasta un grado que permita su molienda.

Trituración primaria: Proceso por el cual el mineral es triturado entre 1/2 a 1/6 de su tamaño original, en preparación a la siguiente etapa de reducción (segunda o tercera etapa de trituración o circuito de molienda).

Trituración primaria, secundaria y terciario: Etapas en las que se realiza la trituración o la reducción de tamaño de las rocas y los minerales con el fin de reducir los costos de energía; la reducción en una sola etapa incurre en mayores gastos energéticos. Convencionalmente denominadas trituración gruesa, media y fina (primaria, secundaria y terciaria).

Trituración selectiva: Proceso que consiste en evitar triturar excesivamente las partículas que ya han alcanzado el tamaño deseado. Lo que se consigue cribando o tamizando previamente el material triturado.

Trituradora: Maquinaria para romper y reducir de tamaño fragmentos o trozos grandes de roca y otros materiales.

Trituradora de cono: Máquina que tritura el mineral en el espacio entre un cono de trituración, montado en forma excéntrica, y otro cono truncado fijo llamado tazón.

Trituradora de mandíbulas: Máquina que utiliza placas de acero (una fija y otra móvil) para romper las rocas. La trituradora de mandíbulas rompe el material al presionarlo entre las dos placas de acero (mandíbulas) que forman una cámara en forma de cuña.

Trituradora de rodillos: Trituradora en la cual el material es roto entre dos rodillos rotatorios, que se mueven en sentido contrario a las manecillas del reloj; y pasa a través de una ranura en el fondo de la máquina. Cuando la presión es muy grande, los rodillos se separan aumentando la distancia entre ellos y, por lo tanto, el tamaño de grano final. Se utiliza para la trituración de menas quebradizas (frágiles) antes de la separación gravimétrica hidromecánica de fracciones de grano medio.

Uu

Utilidad neta: Ganancia obtenida por una empresa en un período determinado después de haber pagado impuestos y otros gastos.

Vv

Valor en libros: Importe por el que aparece registrado un activo en los libros contables de una empresa.

Ventas: Importe de todas las ventas que ha efectuado una empresa en un período dado, ya sea que se hayan realizado de contado o a crédito

Veta: Cuerpo de roca tabular o laminar que penetra cualquier tipo de roca. Muchos depósitos de minerales importantes se presentan en formas de vetas junto con otros minerales asociados.

Vida útil : La vida útil de un equipo es el lapso durante el cual éste está en condiciones de realizar el trabajo para el cual fue diseñado, sin que los gastos de su operación excedan los rendimientos económicos obtenidos por el mismo, por mínimos que éstos sean. La vida útil de una máquina depende de múltiples y complejos factores, entre los que se pueden enumerar: fallas de fabricación, falta de protección contra los agentes atmosféricos, desgastes excesivos debido a uso anormal, vibraciones y fricción de sus partes móviles, manejo de diferentes operadores e irresponsabilidad de éstos, descuidos técnicos, entre otros.

Vida útil del proyecto: Tiempo durante el cual se espera que el proyecto genere beneficios.

Zz

Zona de falla: Área relacionada con un plano de falla que puede consistir hasta de cientos de metros a los lados del plano de falla. Consiste de numerosas fallas pequeñas en las cataclasitas y milonitas asociadas.

Señal en la montaña indicando el camino hacia las minas y plantas de beneficio.
Fotografía tomada por: Veronica Ruíz / Servicio Geológico Colombiano



- REFERENCIAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aranzazu, J.M. 2014. Deposito tipo porfido de oro y cobre "la cumbre" emplazado en ignimbritas soldadas de la formacion. Combia, en quinchía - risaralda. Universidad de Caldas. Tesis maestría. 165p.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 100 de 1993. "Por la cual se crea el sistema de seguridad social integral y se dictan otras disposiciones". Bogotá, 1993.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 685 de 2001. "Por la cual se expide el Código de Minas y se dictan otras disposiciones". Bogotá, 2001.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1607 de 2012. "Por la cual se expiden normas en materia tributaria y se dictan otras disposiciones". Bogotá, 2012.
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. Ley 1819 del 29 de diciembre de 2016, "Por medio de la cual se adopta una reforma tributaria estructural, se fortalecen los mecanismos para la lucha contra la evasión y la elusión fiscal, y se dictan otras disposiciones". Bogotá, 2016.
- Departamento Nacional de Planeación. Dirección de Regalías, Actualización de la cartilla: "Las Regalías en Colombia". Bogotá D.C. noviembre de 2007
- Rihm, A., Arellano, J., & Sancha, A. M. (1998). Uso de test de lixiviación para caracterización de residuos del área minera y reflexiones sobre gestión de residuos peligrosos en América Latina. In Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 26 (AIDIS 98) (pp. 1-8). APIS.
- Procedure Toxicity Characteristic Leaching. (1992). Method 1311. USA Norm
- MINAMBIENTE (2005). Decreto 4741 de 2005. Concentraciones máximas de contaminantes para la prueba TCLP. Tabla 3 del Anexo III.
- Ingeominas 2004. Plancha geológica de la plancha 186 Riosucio.
- Ingeominas. 1997. Caracterización Química y Mineralógica del Deposito Aurífero De Marmato (Caldas) proyecto p97q03. Evaluación metalúrgica y procesos de beneficio de depositos auríferos y metales asociados. Reporte interno.
- Ingeominas. 2009. Caracterización química, mineralógica y metalúrgica de la zona aurífera del area de reserva especial minera de quinchia (Risaralda). Ingeominas. (Reporte interno).
- SGC.2017. Caracterización mineralógica, metalúrgica y ambiental del distrito minero de Riosucio-Caldas. (Reporte interno)
- McCourt, W. J., Aspden, J. A., Brook, M. 1984. New geological and geochronological data from the Colombian Andes: continental growth by multiple accretion. Journal of the Geological Society, London 141: 831-845
- Santacruz R., L. (2011): Microtermometría de Inclusiones Fluidas Aplicada al Depósito de Marmato. Trabajo de Grado, 23 p. y Anexos. Departamento de Geociencias. Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá. Edificio Manuel Ancizar. Bogotá, Colombia.
- Celada et al. 2016. Mapa Metalogenico de Colombia. Servicio geologico colombiano. grupo de mapa metalogenico de colombia.

REFERENCIAS WEB

- <http://www.marmato-caldas.gov.co/>
- <http://www.quinchia-risaralda.gov.co/>
- <http://www.riosucio-caldas.gov.co/Paginas/default.aspx>
- <http://www.caramanta-antioquia.gov.co/index.shtml>
- <http://www.fabreminerals.com>
- <https://www.mineralesyrocas.com>
- <http://www.directindustry.es/prod/hectron/product-56622-414043.html>



GUÍA METODOLÓGICA
PARA EL MEJORAMIENTO
PRODUCTIVO DEL BENEFICIO
DE ORO SIN EL USO DE MERCURIO

MARMATO, RIOSUCIO, QUINCHÍA
Y CARAMANTA



El futuro
es de todos

Minenergía

ISBN: 978-958-52286-3-4



SERVICIO
GEOLÓGICO
COLOMBIANO

